

平成22年5月10日現在

研究種目：特定領域研究
 研究期間：2005～2009
 課題番号：17075010
 研究課題名（和文） 移動知の力学的共通原理の発見と展開—人工物と生物の共通理解—
 研究課題名（英文） Discovery and Development of Dynamical Common Principle of
 Mobiligence - Common Understanding of Artificial and Living Things
 研究代表者
 大須賀 公一 (OSUKA KOICHI)
 大阪大学・工学研究科・教授
 研究者番号：50191937

研究成果の概要（和文）：

無限定環境に適応することを行動仕様として与えられた移動主体は、それが生物であっても非生物であっても、環境の複雑さに対処する必要がある。その能力を移動知と呼んでおく。その具体的方法は「種」によって異なってくるが、本研究班では、その中心には共通の原理が存在しているとする。以上のような背景のもと本研究では、移動主体ごとに内在する移動知の共通原理をさらに貫く共通原理を、力学的アプローチにより解明する。

研究成果の概要（英文）：

Not only artificial objects but also living things, all objects which can adapt to un-known environment have to have a kind of adaptive ability. We call the ability as Mobiligence. We assume that there exist common principles of the adaptive ability. Therefore in this research, we discover the common principle by means of dynamical formulation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	17,900,000	0	17,900,000
2006年度	18,000,000	0	18,000,000
2007年度	18,800,000	0	18,800,000
2008年度	7,300,000	0	7,300,000
2009年度	8,100,000	0	8,100,000
総計	70,100,000	0	70,100,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：移動知，陰的制御，陽的制御，共通原理，受動的ロコモーション

1. 研究開始当初の背景

無限定環境に適応することを行動仕様として与えられた移動主体は、それが生物であっても非生物であっても、すなわち「種」が異なっても、環境の複雑さに対処する必要がある。その具体的方法は「種」によって異なってくるが、本研究班では、その中心には共通の原理が存在しているとの作業仮説に立

脚する。すなわち、生物であれば2脚動物、4脚動物、昆虫（群）など、あるいは、人工物であれば種々の脚ロボット、移動ロボット、あるいは群ロボット等は、全く異なった「種」ではあるが、いずれも力学法則に支配されている3次元物理世界に存在している点では共通していると捉える。そのため、それぞれの種に対応した移動知が個々に存在してい

ることは確かであるが、それらの核心部分には共通の力学的な柱が貫かれていると捉える方が自然であると考え。さらにこのような原理は元来存在するもので、発見されるものであるという仮説も設けることにする。

2. 研究の目的

以上のような背景のもと本研究では、他の班によって構築されるそれぞれの想定されている移動主体ごとに内在する移動知の共通原理をさらに貫く共通原理を、力学的アプローチにより解明する。そしてその解明の正当性を示すためにさまざまな「種」のメカニカルシステムを構築し、他の班で得られた知見が内挿できることを示し、さらに外挿することで新しい人工物における移動知が発現できることを示す。

3. 研究の方法

本班における力学的共通原理の発見指針は、「移動主体が無限定環境に適応してゆくメカニズムは「種」によって見かけ上異なっているがそれは手段の違いであって、その駆動力には共通的な力学的原理が働いている」という作業仮説に基づく。この作業仮説の妥当性を示すためには、さまざまな複雑度を有する移動主体を同時に考察する必要がある。そのため本班における研究の基本的な進め方は、

- (1) 初動段階からA班、B班、C班との密接な関連性を持たせる。その際、本班の構成員に対して主担当を次のように定めておく。
- (2) A班、B班、C班の研究に関連するケーススタディを毎年実施する、
- (3) A班、B班、C班の各班における共通原理に関する成果を毎年吸収する、
- (4) 本班で発見する共通原理を毎年度A班、B班、C班にフィードバックする、というものとする。そして、最終年度には複数の移動主体に対する移動知を貫く力学的共通原理のプロトタイプを明示する。

4. 研究成果

D班では様々な生き物に見られる移動知の共通原理について考察する。これまでにD班では、「階層構造」、「多重フィードバック構造」、「多重最適化」、「予測構造」などの作業仮説を示してきた。これらを力学系の言葉で統一的に表現できれば移動知の共通原理の一つがみえてくると考えられる。本稿では、そのような指針に基づいた研究活動の結果表出した「移動知の原理の候補」を示す。それは「移動知の陰的制御と陽的制御による双対構造」である。

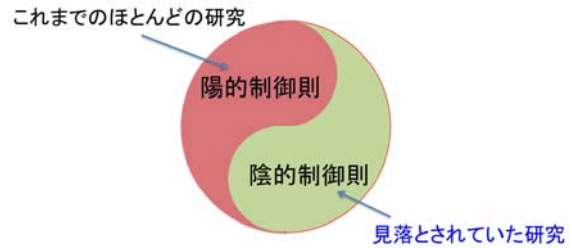


Fig. 1 移動知の双対構造

本章では、D班の研究内容を総合した結果生まれた移動知の共通原理の候補を紹介する。

まず、移動知の設計原理を理解するためには、生物の運動制御系の設計原理を解明する必要がある。そこで、生物を従来の制御工学的に表現しようとする、いくつかの問題点にぶつかる。中でも、制御対象と制御則、場（環境の一部）を明確に分離できないという「不可分性」が本質的である。そのような考えから生物制御系を表現しようとするときFig2 のようになる。

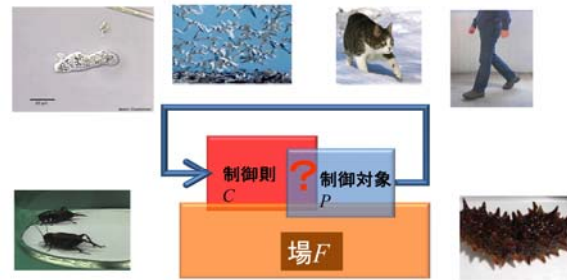


Fig. 2 生物制御系のとらえ方

ここで生物を制御系として捉えたときこれまでのとらえ方と異なる点がいくつかあり、それを下に示す。

- ・ 制御対象と制御則と場の境目がはっきりしない。
- ・ 基本的に閉ループ系である。
- ・ 制御対象と制御則の境界は固定的ではない。
- ・ 自己言及的である（目標値を内部で発生できる）。
- ・ 内部エネルギー発生源をもっている。

このうち、第一番目の性質が最も重要であり、それが解決できるとそれ以外の項目も理解できるようになると考える。そこでのポイントは「如何に重なり部分を捉えるか」である。

このような議論をより深く進めるにあたって、議論展開が不明確にならないためには、制御対象や制御則などの用語を改めて定義しておかねばならない。そしてそのためには、定義の起点として、その対象物を注目してい

る「主体とその意図」の存在を仮定することからはじめよう。詳細な検討は省略するが、多くの人工物の場合、主体はその人工物の設計者や使用者になる。あるいは生物の場合、主体はその生物に興味がある解析者、あるいは自然界（あるいは遺伝的に発現する本能）であるとみなそうということである。また、考えるレベルによっては、ここで注目している運動制御系よりも上位に構成されている情報処理系（例えば脳など）が主体と考えた方がいい場合もある。

上のような準備のもとで、まず、すべてが含まれている空間全体を「環境 E 」としよう。その中に、主体の「意図（あるいはそれによって生成された運動目的） T 」が存在し、それに従って運動させたいと意図されている考察の対象が存在しているとする。このとき、その対象のことを「制御対象 P 」と呼ぶ。すなわち

$$P=P(T) \quad (1)$$

である。本稿では、制御対象は意図があっではじめて意味が生まれるものという立場をとっている。

そして、環境の一部であって制御対象を含み、かつ、特にいま注目している意図に直接関連し、その意図の達成に効果的に働く集合が存在する場合、それを「場： F 」と定義する。環境は主体とその意図とは無関係に存在しているが、場は意図 T や制御対象 P に依存して存在・不存在が定まることがあり、あるいは、物理的には存在していても意図に因って場としての意味が表出したり消失したりすると考えている。すなわち

$$F=F(E, T, P) \quad (2)$$

である。上式における T や P の寄与度は場合によって異なる。またいうまでも無く、環境 E の変化に応じて場 F も変化する。

次に、意図 T 、場 F 、制御対象 P が存在する中で、制御対象を意図にそって運動させるのに有効に働く要素がある場合、それを「制御則 C 」と呼ぼう。すなわち

$$C=C(E, T, P) \quad (3)$$

である。最後に、場 F 、制御対象 P 、制御則 C をあわせた全体を「制御系 S 」と呼ぶ。すなわち

$$S=S(F, P, C) \quad (4)$$

である。

以上のような準備のもとで、要素間の重なりに対する一つの回答として、「制御対象、制御則、場の3要素に加えて、3要素の間に第4の要素を考える」ことを提案する。この第4の要素を「陰的制御則： C_I 」と名付ける。そして従来からの意味の制御則を「陽的制御

則： C_X 」と呼ぶことにする。すなわち、制御則 C は陰的制御則と陽的制御則の合成で構成される。次式参照。

$$C=C_X \oplus C_I \quad (5)$$

ただし、演算 $A \oplus B$ は要素 A と B との間に共通要素がないとしたときの複合を意味するものとする。さらに、形式的に陰的制御則は次のように3つの部分制御則の合成で構成されると考える Fig.3 参照)。

$$C_I=C_F \oplus C_P \oplus C_{FP} \quad (6)$$

ただし、

C_{FP} : 場・制御対象と陽的制御則との相互作用の結果生まれる陰的部分制御則

C_P : 制御対象と陽的制御則との相互作用の結果生まれる陰的部分制御則

C_F : 場と陽的制御則との相互作用の結果生まれる陰的部分制御則

である。

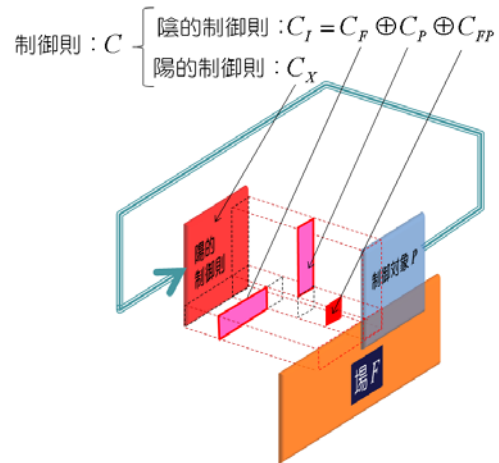


Fig. 3 移動知制御系の内部構造仮説

陰的制御則 C_{FP} は次のような性質を持っていると考えられる。

- 意図 T 、場 F と制御対象 P との相互作用をもつことで生まれた制御則である。
- 場 F と制御対象 P との相互作用がなくなると消える。
- 場 F あるいは意図 T がリアルタイムに変化すると、それと共にリアルタイムに変化する。
- 陰的制御則 C_{FP} は、無数に存在する場 F と制御対象 P との関係を集約して表現されたものである。

以上から「移動知」を以下のように理解する。

[存在] 生物のリアルタイム環境適応機能(=移動知)の必然性は陰的部分制御則 C_{FP} の存在性からきている。

[機能] 生物のリアルタイム環境適応機能(=移動知)とは、環境 E の変化とともに時々刻々変化する場 F に応じて変化する陰的部分

制御則 C_{FP} を有効活用すべく陽的制御則 C_x をリアルタイムに適応させる能力である。

[理解] 生物のリアルタイム環境適応機能 (=移動知) を理解するには、陽的制御則 C_x と陰的制御則 C_{FP} を併せた理解が必要である。その際、陰的制御則 C_{FP} は場を切り離しては議論できないため、生物を場から切り離してその個体の制御能力を解明しても、それは C_x のみの理解にとどまり、望んでいるリアルタイム環境適応能力 (=移動知) の理解には到達しない。

本研究では移動知の共通原理をもとめて活動しているD班において明示化されてきた移動知機構の構造について述べた。現段階での結論の一つは、移動知は「陰的制御と陽的制御の双対構造を持っている」ということである。

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9件)

- 1) K. Ohgane, S. Ei, H. Mahara: Neuron phase shift adaptive to time delay in locomotor control, Applied Mathematical Modelling, 査読有, 33, pp. 797-811, 2009
- 2) K. Ohgane, K. Ueda: Instability-induced hierarchy in bipedal locomotion, Phys. Rev. 査読有, E, 77, p. 51915, 2008
- 3) S. Sakai, M. Iida, K. Osuka, M. Umeda: Design and control of a heavy material handling manipulator for agricultural robots, Auton Robot, DOI 10.1007/s10514-008-9090-y, 2008
- 4) Y. Sugimoto, K. Osuka: Hierarchical Implicit Feedback Structure in Passive Dynamic Walking, Journal of Robotics and Mechatronics, 2008
- 5) 吉田, 大須賀: トルクユニットマニピュレータの全状態変数を制御するための運動軌道に関する考察, 日本ロボット学会誌, 査読有, 25, 7, pp. 86-95, 2007
- 6) 衣笠, 大須賀, 三輪: 膝の伸縮と胴体の姿勢制御による2足歩行と周波数応答解析, 日本ロボット学会誌, 査読有, 25, 3, pp. 116-123, 2007
- 7) M. Iribe, K. Osuka: Design of the Passive Dynamic Walking Robot by Applying its Dynamic Properties, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, 19, 4, pp. 402-408, 2007
- 8) M. Iribe, K. Osuka: A Designing Method of the Passive Dynamic Walking Robot via Analogy with the Phase Locked Loop Circuits, Bioinspiration and Robotics - Walking and Climbing Robots-, Eds.: M. K.

Habib, 査読有, pp. 79-94, 2007

- 9) 杉本, 大須賀, 杉江: 連続型遅延フィードバック制御に基づく脚ロボットの準受動的歩行安定化制御, 日本ロボット学会誌, 査読有, 23, 4, pp. 53-60, 2005

[学会発表] (計42件)

- 1) 吉岡, 杉本, 大須賀: 超多脚型受動的動歩行ロボットの実現に関する研究, 日本機械学会 ROBOMEC2009 講演論文集, 2P1-D02, 2009, 5, 26, 福岡
- 2) 吉岡, 杉本, 大須賀: 超多脚型受動的動歩行の脚数による安定性の変化, 第27回日本ロボット学会学術講演会資料, 3P2-05, 2009, 9, 14, 神奈川
- 3) 大須賀, 石黒, 鄭: 陰的制御則は移動知の共通原理になりえるか?, 第10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論文集, 1H2-1, 2009, 12, 24, 東京
- 4) 末岡, 大須賀, 杉本, 石黒: ある移動ロボットにおける陰的制御則に関する考察, 第10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論文集, 1H2-2, 2009, 12, 24, 東京
- 5) 浪花, 杉本, 大須賀: McKibben型空気圧アクチュエータを用いたロボットの運動生成とその安定解析, 第10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論文集, 1H2-4, 2009, 12, 24, 東京
- 6) 入部, 杉本, 大須賀: 受動的動歩行における力学モデルの実機での検証, 第10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論文集, 1N4-3, 2009, 12, 24, 東京
- 7) 狐塚, 杉本, 大須賀: 膝関節を有した四脚受動的動歩行の実現, 第10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論文集, 2N1-4, 2009, 12, 25, 東京
- 8) 大須賀, 石黒, 鄭: 身体に埋め込まれた適応能力について, 第9回計測自動制御学会制御部門大会資料, TA4-4, 2009, 3, 5, 広島
- 9) 大須賀, 石黒, 鄭: Implicit Control Lawは移動知理解の鍵になるか..., システム・情報部門学術講演会2009資料, pp. 377-378, 2009, 11, 25, 神奈川
- 10) 大須賀 公一: 二足歩行ロボットの適応運動機能, 第32回日本神経科学大会資料, SY1-F1-5, 2009, 9, 16, 愛知
- 11) 大須賀 公一: 受動的動歩行におけるImplicit Control Lawについて, 第53回システム制御情報学会研究発表講演会資料, W13-2, 2009, 5, 20, 兵庫
- 12) 大須賀, 石黒, 鄭: 制御系に埋め込まれたImplicit Feedback Structureについて, 計測自動制御学会第38回制御理論シンポジウム資料, pp. 271-276, 2009, 9, 15, 大

- 阪
- 13) 入部, 大須賀: 適応的に歩容を安定化する機能を備えた受動的歩行ロボット, 第13回ロボティクスシンポジウム, pp. 358-363, 2008, 3, 17, 香川
 - 14) 中谷, 大須賀, 杉本, 赤澤: 四脚受動的歩行の存在証明と歩容解析, 第13回ロボティクスシンポジウム, pp. 364-369, 2008, 3, 17, 香川
 - 15) 入部, 大須賀: 受動的歩行ロボットの受動的な歩容制御と安定解析, 第26回日本ロボット学会学術講演会, 3B1-08, 2008, 9, 11, 兵庫
 - 16) 大脇, 大須賀, 石黒: 受動走行の背後に潜む安定化構造の解明, 第26回日本ロボット学会学術講演会, 3B1-09, 2008, 9, 11, 兵庫
 - 17) 大須賀公一: ロボティック・サイエンスの構成論的アプローチについて, 第26回日本ロボット学会学術講演会, 3B3-02, 2008, 9, 11, 兵庫
 - 18) 大須賀公一: 神戸大学 大須賀研究室のRT-担架構成ロボット技術とFST(Flexible Sensor Tube)応用技術一, 第26回日本ロボット学会学術講演会, 3M2-01, 2008, 9, 11, 兵庫
 - 19) 入部, 大須賀: コンパス型受動的歩行ロボットの歩容解析力学モデルに忠実な実機の開発, 第9回(社)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, 1K1-3, 2008, 12, 5, 岐阜
 - 20) 大須賀公一: 身体に埋め込まれた適応能力について, 第9回(社)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, 1K4-1, 2008, 12, 5, 岐阜
 - 21) K. Osuka, M. Iribe, Y. Sugimoto: On Passive Adaptive Mechanism in Passive Dynamic Walking, Proceedings of the International Conference on Morphological Computation, session27-2, 2007, 3, 27, ベニス
 - 22) K. Osuka, M. Iribe, Y. Sugimoto: Adaptive Function Embedded in Passive Dynamic Walking, Proceedings of the International WORKSHOP on MOBILIGENCE, 2007, 7, 20, 兵庫
 - 23) K. Osuka: On Passive: Adaptive Mechanism in Passive Dynamic Walking, Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems 2007, pp. 2683-2686, 2007, 10, 20, ソウル
 - 24) 大須賀, 西井, 石黒, 鄭: 移動知機構の階層構造に関する一考察, 第25回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1F11, 2007, 9, 13, 千葉
 - 25) 大須賀公一: 2脚, 4脚, 6脚・・・どこまで存在するの, 受動的歩行?, 第8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論文集, 1G4-1, 2007, 12, 20, 広島
 - 26) 大須賀, 中谷, 杉本, 赤澤: 多脚型受動的歩行の存在について--1脚, 2脚, 4脚, 6脚, ...?, 第36回制御理論シンポジウム資料, pp. 95-98, 2007, 9, 5, 北海道
 - 27) 大須賀, 入部, 杉本: 受動的歩行にみる移動知の適応機構構造, 第7回計測自動制御学会制御部門大会, 071-2-5, 2006, 12, 14, 北海道
 - 28) 入部, 大須賀: 力学系の特徴を利用した受動的歩行ロボットの設計, 第12回ロボティクスシンポジウム, pp. 232-238, 2007, 3, 16, 新潟
 - 29) A. Ishiguro, H. Matsuba, T. Maegawa, M. Shimizu: A Modular Robot That Self-Assembles, Proceedings of the 9th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-9), pp. 585-594, 2006, 3, 8, 東京
 - 30) M. Iribe, K. Osuka: Analogy between Passive walking robot and Phase Locked Loop circuit, Proceedings of the SICE-ICASE International Joint Conference 2006 (SICE-ICCAS 2006), CD, 2006, 10, 19, ソウル
 - 31) M. Iribe, K. Osuka: Analysis and stabilization of the passive walking robot via analogy with the Phase Locked Loop circuits, Proceedings of the IEEE-RAS/RSJ International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2006), CD, 2006, 12, 6, イタリア
 - 32) M. Iribe, K. Osuka: A designing method of the passive dynamic walking robot via analogy with the Phase Locked Loop circuits, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2006), CD, 2006, 12, 19, 中国
 - 33) 清水, 川勝, 石黒: 力学系の時空間構造に基づく移動知理解に向けての一考察 -モジュラーロボットを用いた事例研究-, 第18回自律分散システム・シンポジウム資料, pp. 217-222, 2006,
 - 34) 松場, 前川, 清水, 石黒: 制御系-機構系間の有機的連関を通じた自己組み立て・自己修復, 第18回自律分散システム・シンポジウム資料, pp. 61-66, 2006
 - 35) 大脇, 石黒: 非線形弾性要素を有する二脚受動走行機械の安定性解析, 第18回自律分散システム・シンポジウム資料, pp. 111-116, 2006, 1, 26, 東京
 - 36) 山田, 渡邊, 石黒: 可変弾性要素を活用した制御系と機構系の有機的連関に関する一考察 -へビ型ロボットを用いた事例研究

- , 第 18 回自律分散システム・シンポジウム資料, pp.135-138, 2006, 1, 26, 東京
- 37) 入部, 大須賀: PLL 回路との相似性を用いた受動歩行ロボットの一設計方法, 第 49 回自動制御連合講演会, SU8-1-3, 2006, 11, 26, 神戸
- 38) 大須賀公一: 移動知の適応機構についての一推測, 第 7 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講演論文集, pp. 862-863, 2006, 12, 15, 兵庫
- 39) 大須賀公一: 受動的動歩行に隠されている環境適応機能, 第 7 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講演論文集, pp. 29-32, 2006, 12, 14, 兵庫
- 40) 松場, 前川, 清水, 石黒: 制御系と機構系間の相互作用を活用した自己組み立て, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2005 (SSI2005) 講演論文集, pp.101-106, 2005, 11, 28, 福岡
- 41) 大脇, 石黒: 非線形バネを活用した安定な二脚受動走行の実現, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2005 (SSI2005) 講演論文集, pp. 95-100, 2005, 11, 28, 福岡
- 42) 大須賀公一: 受動的動歩行のどこがおもしろいの?, 第 6 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 (SI2005), 2005, 11, 28, 福岡

[図書] (計 1 件)

- 1) 浅間, 矢野, 石黒, 大須賀: シリーズ移動知, 第 1 巻移動知—適応行動生成のメカニズム—, オーム社, 2010

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大須賀 公一 (OSUKA KOICHI)
大阪大学・工学研究科・教授
研究者番号: 50191937

(2) 研究分担者

鄭 心知 (ZHENG XIN-ZHI)
研究者番号: 10262966

足立 二郎 (ADACHI JIRO)
研究者番号: 20374184

(H20-H21 分担者)

石黒 章夫 (ISHIGURO AKIO)
研究者番号: 90232280

(H20-H21 他班に移動)

清水 正宏 (SHIMIZU MASAHIEO)
研究者番号: 50447140

(H18-H19 分担者, H2-H2 他班に移動)

(3) 連携研究者

大金邦成 (OHGANE KUNISHIGE)
研究者番号: 90435868

(H20-H21 連携研究者)