

サービスシステムとしてのITSと適応性実現のための移動知<sup>\*1</sup>

ITS as a Service System and Mobiligence for Realization of Adaptive Function

東京大学人工物工学研究センター 教授 工学博士 浅間 一  
Hajime ASAMA

## 1. はじめに

ここ数年、急速にサービス・イノベーションが注目されるようになった。新産業創造戦略2005<sup>1)</sup>や第三次科学技術基本計画<sup>2)</sup>の中でも「サービス」が取り上げられ、各省庁においてサービス・イノベーションのための人材育成や、サービスの生産性を向上させるための施策が実施されている。また、2008年度には産業技術総合研究所にサービス工学研究センターが設立された<sup>3)</sup>。

一方、東京大学人工物工学研究センター<sup>4)</sup>では、すでに2002年に、持続性社会構築に向けてのパラダイムシフトと、第三次産業における生産性の向上という社会的ニーズに基づき、サービス工学研究部門が設置され<sup>5), 6)</sup>、これまでにサービス工学に関する研究活動が行われてきた。

サービスは、プロバイダ（ヒト）がユーザ（ヒト）に対して提供するものが基本であろう。しかし、労働力不足や労働環境の問題から、すべてのサービスをヒトによって提供することができない、または好ましくない場合がある。サービス工学では、脱物質化の観点から人工物を、サービスを提供するためのデバイスと捕える<sup>5)</sup>。すなわち、人工物であるITSやロボットも、ヒトにサービスを提供するための道具と考える。

サービスを提供する人工物（サービスシステム）において重要となるのが、これまでの工学であまり陽に扱ってこなかった、「適応」、「誘導」、「実感」といった技術である<sup>7)</sup>。ユーザが求めるものは、高齢者と若者、男性と女性、健常者と身体障害者など、その特性によって異なるし、主観的価値観も個人差があり千差万別である。また、同一のユーザでも、その状態によって、求めるもの

は変化する。サービスシステムには、そのような多様で変化するニーズに対応できる「適応性」が必要となる。我々は、サービス設計者が目標として与えたサービスをユーザに対して実時間で適応的に供給する媒体という意味で、図1に示すようなサービスメディアという概念を提案した。

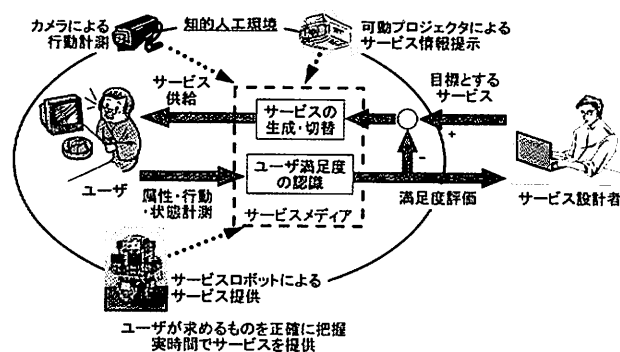


図1 サービスメディアの概念

これまでに、知能化された人工環境として、レスキュー、動線誘導、アシスト、セキュリティなど、様々なサービスシステムを実現してきた<sup>8)</sup>。しかしながら、サービスシステムである人工物において、その適応性はどのようにしたら実現できるのか、その方法論が確立しているわけではない。サービスロボットの研究においても、古くからその適応性（知能）を実現するための技術開発が行われているものの、実用として活用できる技術は極めて限られているのが現状である。

一方、生物は、どんな生物でも適応性を有している。適応性を実現するには、まず生物を手本とし、それを見習って実現することが有効な戦略であろう。しかし、生物がどのようなメカニズムによって適応的行動を生成しているのか、生物学の専門家に尋ねても、ほとんどわかっていないという回答しか得られない。すなわち、適応性実現の

\*1 原稿受理 2008年9月9日

方法論を見出すには、まず生物が有する適応的行動を生成するメカニズムを明らかにすることから始める必要があるという結論に達した。

そのような動機から、我々は移動知<sup>9), 10)</sup>の研究を開始した。文科省科研費特定領域研究「身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現－移動知の構成論的理解－」が、2005年度から5年間のプログラムとして立ち上がった<sup>11)</sup>。本稿では、移動知の概念や、移動知研究の目的、そのアプローチ、最近の成果などについて紹介する。

## 2. 移動知研究とは

### 2.1 移動知研究の目的

人間、動物、昆虫などは、様々な環境において適応的に行動することができる。このような適応行動は、これらの生物が生存する上で、最も基本的で必須な知的機能（生存脳機能）である。この適応的行動能力は、脳や身体の損傷によって損なわれることが知られている。パーキンソン病は、典型的な適応的運動機能障害の例であるし、自閉症や統合失調症なども社会的な適応機能障害であると考えられることができる。近年、高齢化や社会環境の変化によって、このような適応的行動障害を持つ人の割合が急激に増加しており、それに対する取り組みが急務となっている。しかし、このような適応行動がどのようなメカニズムで発現するかについてはほとんど明らかになっていない。移動知研究は、まさにこのような生物の適応的行動がどのようなメカニズムで発現するのかを解明することを目的としている。

### 2.2 移動知の概念

本特定領域では、これら生物が有する適応的行動能力は、「動く」ことによって発現すると考えている。生物は、静止している状態では、極めて限定された環境情報しか得ることができない。しかし、一旦身体を動かすと、身体を動かすための信号が脳から身体に活発に出力され、また身体と環境との相互作用が生まれる。それによって、動的に環境情報を取得し、適応的な行動が生成されると考えることができる。このように、動くことで生じる、「脳」と「身体」と「環境」の動的な相互作用によって適応的に行動する知が発現するという考え方を「移動知」(Mobiligence)と呼ん

でいる。移動によって得られる、適応的な行動を生成する上で重要となる情報は、以下のようにまとめられる。

- 場所を変えることによって得られる多様な情報
- 運動・動作によって得られる動的（力学的）情報
- 経験

移動知の考え方は、従来のロボティクスの考え方とは異なる。従来のロボティクスでは、図2 (a)に示すように、環境をセンサによって知覚し、認識することが最初のステップである。認識結果に基づき、知識を適用することによって運動や行動を計画し、アクチュエータを制御して、身体を動作させることによってその運動や行動が実現される。その結果、行動主体（ロボット）は環境に何らかの変化をもたらす。しかし、移動知の考え方では、図2 (b)に示すように、行動が知覚に先立つ。行動することによって、豊富な情報を環境から動的に取得する。得られた情報は、経験として知に蓄えられると同時に、得られた情報に応じて実時間での行動選択、運動生成に活用される。これらの二つの考え方を結合させることで、認知と行動の連続的なループを形成することができる。

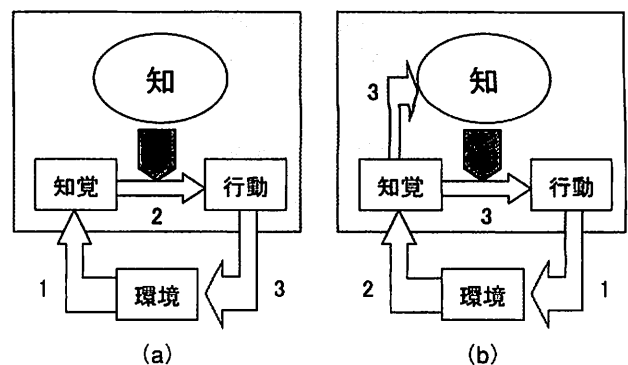


図2 (a) ロボティクスの考え方と (b) 移動知の考え方

### 2.3 生工融合による構成論的アプローチ

これまでの生物学の研究によって、神経回路や、そこで働く神経修飾物質などに関して、多くのことが明らかになってきた。その知見の多くは、動物実験など、解析的手法によって得られたものであるが、このアプローチでは、動物が静止した状態での脳単体の機能しか観測することができない。すなわち、運動中の生体内の状態、脳と身体と環境の動的相互作用を計測する手段は極めて少なく、従来の生物学の分析的アプローチだけによ

って移動知発現のメカニズムを解明することは難しい。そこで、移動知研究では、神経生理学、生態学などの生物学的方法論と、システム工学、ロボティクスなどの工学的的方法論を融合させ、動的な生体システムモデルから適応的運動や行動を構成することによって、それが生成されるメカニズムの理解に迫ることとした。我々は、それを生工融合による構成論的アプローチと呼んでいる。図3に移動知、および生工融合による構成論的アプローチの概念図を示す。

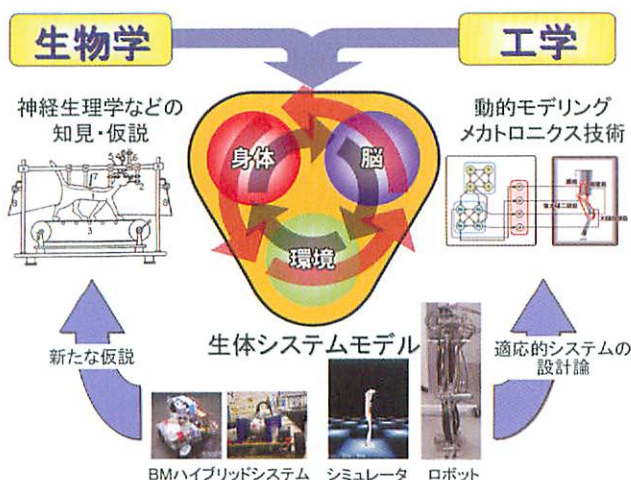


図3 生工融合による構成論的アプローチ

### 2.4 移動知の研究体制

移動知研究では、適応的行動機能の中でも、環境の変化を認知し情報を生成するメカニズム（環境適応）、環境に対して身体を適応させ制御するメカニズム（身体適応）、他者ならびにその集合体としての社会に適応させるメカニズム（社会適応）の三つの適応メカニズムに注目し、それぞれA班、B班、C班という研究班を組織し、具体的な適応行動の発現メカニズムの解明に関する研究を行っている。また、A、B、C班で、個々の生物のある特定の適応行動に注目して、そのメカニズムの解明に向けた研究を行う一方で、それらの適応的行動のメカニズムの背後にある、移動知生成共通の力学的原理（共通原理）の導出を目的とした研究を、D班という研究班を組織化し、行っている。移動知生成の共通原理の解明により、適応的なシステムの設計原理が得られることを期待している。図4に特定領域研究「移動知」の体制を示す。

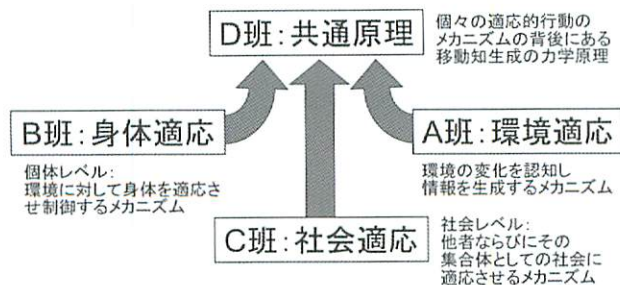


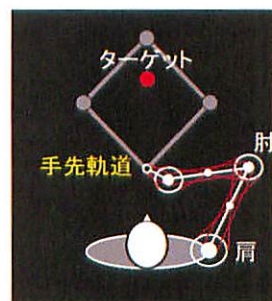
図4 移動知研究の体制

## 3. 移動知の主な研究成果

### 3.1 各研究班における研究成果

移動知の研究成果の例について紹介する。

A班（班代表：伊藤宏司先生（東工大））では、環境適応研究として、環境の変化を認知し身体を動作させるのに必要な情報を生成するメカニズムに関する研究を行っている。特に、生物が外部環境を内部に表象する（内部モデル）ことで、予測不可能な環境変化に対し、実時間で予測的に運動指令を生成するメカニズムについて研究が進められている<sup>12)</sup>。これまでに、図5のような上肢到達（リーチング）運動を例として、局所的な拘束条件（みなし情報）の競合により、実時間で適応行動を生成する工学モデルを開発した。また、到達運動、キャッチング動作を例に、内部モデル形成とそれに基づく予期適応のメカニズムを実験的に解析し、行動発現がフィードフォワード的にプログラムされていることを明らかにした。この機能を予期適応（Anticipatory Adaptation）と呼び、適応のメカニズムを、生成の複雑性に応じて、パラメータ適応、状態適応、文脈適応という三層に分類した。



$$M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) = \tau - J(\theta)^T F_h$$

図5 上肢到達（リーチング）運動

B班（班代表：土屋和雄先生（同志社大））では、身体適応研究として、個体レベルで、環境に対して身体を適応させ制御するメカニズムに関する研

究を行っている。特に歩行に関する研究に関しては、System Biomechanics<sup>(注1)</sup>と呼ぶ方法論に基づき、環境変動に対応した適応的歩行運動パターンの選択と実時間形成のメカニズムの解明、および環境適応機能を持ったロボットの開発に焦点をあてて研究を行っている。これまでに、筋緊張の抑制に関与する脊髄内の介在細胞の同定と機構の解明を行い、ニホンザルのX線CTデータ、解剖データを元に、図6に示すような筋骨格系の要素モデルを開発した<sup>(13)</sup>。また、ニホンザルなどを用い、大脳皮質から大脳基底核、脳幹、脊髄へ投射する皮質出力系の機能分化に注目し、どこの領域が、肢運動・姿勢・行動開始に寄与するかを同定した<sup>(14), (15)</sup>。



図6 ニホンザルの筋骨格系モデル

C班（班代表：青沼仁志先生（北大））では、社会適応研究として、群レベルで、他者ならびにその集合体としての社会に適応させるメカニズムに関する研究を行っている。これまでに、Synthetic Neuroethology<sup>(注2)</sup>と呼ぶ方法論に基づき雄コオロギどうしの喧嘩行動（図7）を題材として生理学実験と行動学実験を基にモデルを構成し、シミュレーションによって、個体間の相互作用と密度に応じて、図8に示すように攻撃的な個体数が変容し、異なる社会が創発されることを明らかにした<sup>(16), (17)</sup>。系統的に異なる動物（昆虫、トリ、サル、ヒト等）

の社会的適応行動の発現機構についても、コミュニケーション行動に注目し、社会的順位形成やカースト形成の生理機構におけるフェロモン、神経伝達物質・修飾物質、ホルモン等の作用の重要性を、行動学や生理学の実験、およびモデル構築、シミュレーション実験から解明しようとしている。また、カイゴガの脳の適応的行動生成機能については、Brain Machine Integrated System<sup>(注3)</sup>と呼ぶ方法論に基づき、図9のような触角や脳などの生体要素と、アクチュエータで駆動可能な移動ロボットの機械的身体を統合したハイブリッドシステム（サイボーグ）を構成することによって、その生体要素の機能とメカニズムの解明に迫っている<sup>(18)</sup>。



図7 雄コオロギの喧嘩行動

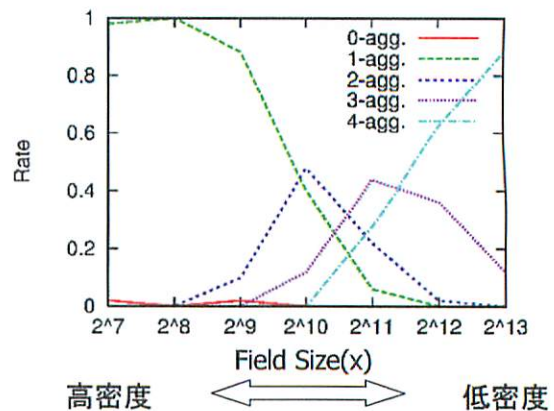


図8 個体密度（フィールドサイズ）に応じて攻撃的な個体数が変化するシミュレーション結果

注1 System Biomechanics：神経生理学研究で得られた脳神経系モデルと人類学および工学的手法によって得られた筋骨格系モデルを統合し、システム論的に適応的運動の生成メカニズムを解明。  
 注2 Synthetic Neuroethology：断片的に得られた神経生理学知見を工学的手法によって統合し、システム論的に適応的行動選択のメカニズムを解明する生工融合の方法論である。  
 注3 Brain Machine Integrated System：生体要素と工学要素を統合し、ハイブリッドシステム（サイボーグ）を構成することによって、生体の適応行動生成のメカニズムを解明する生工融合の方法論である。

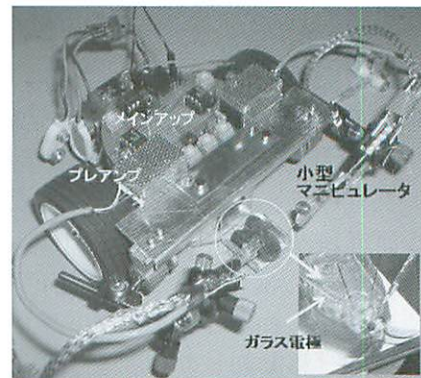


図9 カイゴガの脳を組み込んだ移動ロボット

D班（班代表：大須賀公一先生（神戸大））では、共通原理研究として、移動知生成の力学的原理に関する研究を行っている。特に、適応行動のための制御メカニズムの複雑化を防ぐ機構の受動性と自己安定性に注目した研究が行われている。これまでに、受動的動歩行とアメーバ型群ロボットを例に、力学的側面からの移動知の共通原理に関する議論を行っている。受動歩行に関しては、歩行力学系自体に歩行を安定化させるフィードバック構造が内在していることが明らかになった<sup>19)</sup>。また、真性粘菌とアメーバ型ロボットを対比させ、アメーバ型ロボット（図10）の要素間の連結度合いの強度と環境適応機能に相関があることを明らかにした<sup>20)</sup>。また、これらの受動的動歩行やアメーバ型ロボットの研究を通して、身体自身にもある種の適応機能が内在しており、身体（機構系）と脳神経系（制御系）のバランスが重要であることが指摘された。

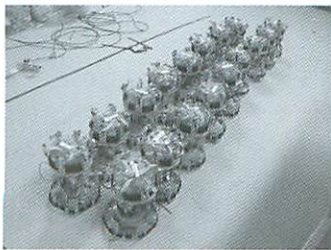


図10 アメーバ型ロボットSlimebot

### 3.2 移動知の共通の性質

移動知の研究はまだ発展途上であり、その共通原理がまだ解明されたわけではない。しかし、これまでの移動知の研究から、移動知生成メカニズムの共通の性質がわかってきた。それを図11に示す。我々は、移動（運動）することで、無限定な環境（外界）の膨大な情報を、感覚機能によって圧縮しながら知覚し、取得する。しかし、それは必ずしも、行動（運動）を生成するのに十分であるとは限らない。我々生物は、そのような状況でも「みなし」<sup>21)</sup>によって、脳の中で情報（すなわち行動（運動）のための拘束条件）を生成し、それによって超多自由度の身体を動かすことができる。そこでは、当然ながら身体性が重要となる。行動（運動）を実時間で生成するには、脳の中に内部モデルを構成することが必要であり、我々は、それを生成したり、切り替えながら、認知と行動を結び付けているのである。

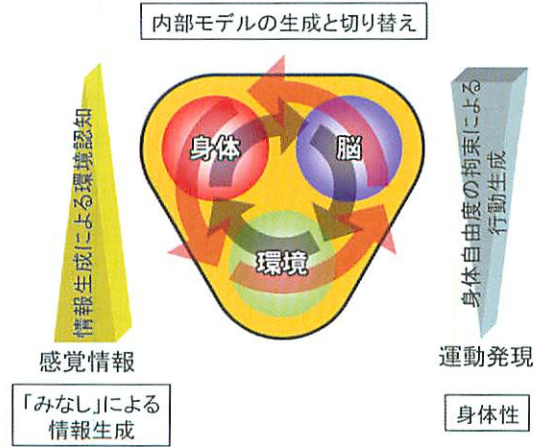


図11 移動知生成メカニズムの共通の性質

本稿で紹介した研究成果は、移動知研究のごく一部であり、このほかにも、より多様な生物の多様な適応メカニズムについて多数の興味深い研究成果がこれまでに得られている。なお、その成果の詳細に関しては、すでに学会の会誌の特集号や論文誌など<sup>22-24)</sup>で発表を行っているため、それをご参照いただきたい。また、最新の研究成果については、2008年10月に行われる第2回移動知国内シンポジウムや、2009年11月に開催予定の第3回移動知国際シンポジウムで発表される予定である<sup>10)</sup>。移動知研究に興味のある方は、是非ご参加いただきたい。

### 4. おわりに

本稿では、移動知の概念や、移動知研究の目的、アプローチ、最近の成果などについて紹介した。移動知は、生物が適応的行動を生成するメカニズムを解明することを主な目的としているが、生物学分野における貢献のみならず、医療分野においては、運動障害の新治療法の発見、リハビリ支援システムの開発など、さらに工学分野においては、サービスロボットなどの知的人工システムの設計原理の導出へ、大きな波及効果が期待される。その意味において、移動知は、サービス工学<sup>25)</sup>のための一つの基礎学問である。

特定領域研究「移動知」では、若手の会を組織し、若手研究者数の育成にも力を注いでおり、現在51名の若手研究者が熱い議論を交わしている。これまでの研究で生工融合が順調に機能し、研究が活発化するとともに、これまでの方法論で得られない新たな知見が次々と得られている状況か

ら、我々は、移動知という新しい研究領域が着実に形成されつつあると考えている。

最後に、ITSをサービスシステムと考えれば、移動知の研究は、ITSの設計に有用な知見や方法論を提供できると考えている。自動車は、もはや単なる機械でなく、自ら制御する知的機能を具備した自律システムである。車々間通信、車路間通信などを利用して、情報を共有して、それをサービスに活かすということは、まさに社会的昆虫が行っている情報共有とそれに基づく社会的適応行動と重なる。自動車が「移動」という機能を持ち合わせている以上、移動知による適応的な行動機能を実現できる可能性がITSに内在しており、移動知研究の成果を利用することで、さらなる高度な適応的サービス提供機能の実現が期待される。今後、ITS開発と移動知研究がさらに深い関連を持つようになるであろう。

#### 謝 辞

本講演で紹介する移動知の概念や研究は、これまでに、土屋和雄先生、伊藤宏司先生、矢野雅文先生、高草木薫先生、神崎亮平先生、太田 順先生、石黒章夫先生、青沼仁志先生、大須賀公一先生、荻原直道先生をはじめ、本特定領域研究の計画班のメンバーと議論してきた内容をまとめたものである。すべての移動知研究計画班メンバーに、この場を借りて御礼申し上げる。また、移動知研究の評価にあたっては、Prof. Sten Grillner (Korolinska Inst.), Prof. Avis H. Cohen (Univ. Maryland), Prof. Rolf Pfeifer (Univ. of Zurich), 森 茂美先生 (生理学研), 鈴木良次先生 (金沢工大), 北村新三先生 (神戸大) に貴重な助言やコメントをいただいた。ここに御礼を申し上げる。

#### 参考文献

- 1) 新産業創造戦略2005, 経済産業省 (2005)
- 2) 第三期科学技術基本計画, 総合科学技術会議 (2006)
- 3) [http://www.mext.go.jp/b\\_menu/houdou/19/04/07042015.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/19/04/07042015.htm)
- 4) <http://www.race.u-tokyo.ac.jp/>
- 5) 富山哲男: サービス工学の展開, 第6回人工物工学国内シンポジウム論文集, p.45-58 (2002)
- 6) 新井民夫: 製造物価値創出のためのサービス工学, 学術の動向, p.68-73 (2006)
- 7) 浅間 一: サービス工学, 精密工学会誌, Vol.45, No.1, (2009) (掲載予定)
- 8) 上田完次ほか: 人工物の価値とサービス研究, 人工知能学会誌, Vol.23, No.6 (2008) (掲載予定)
- 9) 高草木薫, 浅間 一: 移動知: 行動からの知能理解—構成論的観点と生物学的観点から, 計測と制御, Vol.44, No.9, p.580-589 (2005)
- 10) 浅間 一: 移動知, 知能と情報, Vol.19, No.5, p.44 (2007)
- 11) <http://www.robot.t.u-tokyo.ac.jp/mobiligence/>
- 12) 近藤敏之, 伊藤宏司: 移動知における環境適応—リーチング運動を例とした環境認知と運動適応の神経回路モデル—, 第1回移動知一般公開シンポジウム講演資料集, p.21-25 (2006)
- 13) 荻原直道ほか: ニホンザル歩行運動のシステムバイオメカニクス—神経筋骨格モデルによる歩行知能の探求—, 第1回移動知一般公開シンポジウム講演資料集, p.17-20 (2006)
- 14) 高草木薫: 歩行における基底核の役割, 第21回日本大脳基底核研究会 (2006)
- 15) 中階克己ほか: ニホンザルの四足歩行運動における一次運動野の神経細胞活動, 第29回日本神経科学大会 (2006)
- 16) 藤本智久ほか: 昆虫の適応的行動選択を実現する神経回路モデルに関する研究—NO/cGMPカスケードによる適応的行動選択のモデル化—, 第16回インテリジェントシステムシンポジウム講演論文集, p.23-26 (2006)
- 17) 足利昌俊ほか: ココロギ群における社会的行動選択のモデル化, 第17回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集, p.191-196 (2007)
- 18) 鳥井原茂ほか: 脳—機械融合システムを用いた昆虫適応脳の評価, 第20回自律分散システム・シンポジウム資料, p.343-348 (2008)
- 19) 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, p.29-32 (2006)
- 20) 清水正宏ほか: 移動知発現の理解へ向けたアメーバ様モジュラーロボットの力学的解析, 第20回自律分散システム・シンポジウム資料, p.157-162 (2008)
- 21) 矢野雅文ほか: 随意運動のための「見なし情報」の創発, 計測と制御, Vol.44, No.9, p.590-595 (2005)
- 22) 計測と制御「特集: 移動知: 能動的な移動機能がもたらす創発的知能」, 計測自動制御学会, Vol.44, No.9 (2005)
- 23) 計測と制御「特集: 生物の社会適応機能の解明とその工学的应用」, 計測自動制御学会, Vol.46, No.12 (2007)
- 24) Journal of Robotics and Mechatronics, Special Issue on "Mobiligence: Emergence of Adaptive Motor Function through Interaction among the Body, Brain and Environment", Vol.19, No.4 (2007)
- 25) 浅間 一: サービス工学とシステム・インテグレーション, 計測と制御, Vol.44, No.4, p.278-283 (2005)