

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 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：学術創成研究費

研究期間：2007～2011

課題番号：19GS0208

研究課題名（和文） 記号過程を内包した動的適応システムの設計論

研究課題名（英文） Design Theory for Dynamical Systems with Semiosis

研究代表者

榎木 哲夫（SAWARAGI TETSUO）

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10187304

研究成果の概要（和文）：

複雑なシステムの中におかれたヒトや生体は、自らを取り巻くところの環境や社会を能動的に意味づけ、価値づけ、自らの棲む世界として秩序化していくことができる。本研究課題では、このような自律的主体の「多様性の生成と選択」の機構を「記号過程」に求め、記号の生成・利用のダイナミズムの観点から、生体細胞から環境適応機械（ロボット）、社会組織に亘る様々なレベルにおける適応システムの同型性を見だし、個々のシステム要素が外部・内部の物理的環境との相互作用を介して機能が形成される一般的過程について追究した。5カ年の成果により、目的をもって生きる存在としての自律的な主体（人、ロボット、細胞）が、他者主体を含む環境との相互作用を通して、意味の世界を創出して伝達する仕組み（記号過程）を解明し、システムが人を育て、人がシステムを育てる相互主導性を担保できるシステムの設計論を確立することができた。

研究成果の概要（英文）：

In this research project, by mingling technologies with the idea of semiosis, we jointly approach to the common design issues varying from how organisms make predictions about, and adapt to, their semiotic niche in the world, and to an aspect of the wider systems including architects, robots, product innovation and human-machine and/or human social interactions. Wherein, the design of the mutual and inseparable relationships between the external environment and the internal of the cognitive agent that is an actor, an observer, a cognizer, and an interpreter is becoming fundamental. Semiotic technology offers us an indispensable tool for the creation of a truly sustainable society and human-oriented technology, leading a paradigm shift from conventional “design for manufacture” to novel “design for nurture”.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	51,200,000	15,360,000	66,560,000
2008年度	42,200,000	12,660,000	54,860,000
2009年度	46,300,000	13,890,000	60,190,000
2010年度	44,500,000	13,350,000	57,850,000
2011年度	28,900,000	8,670,000	37,570,000
総計	213,100,000	63,930,000	277,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，知能機械学・機械システム

キーワード：記号過程，自律ロボット，人間-ロボット系，インタフェース，人間-機械系，人間-環境系，認知，適応学習

1. 研究開始当初の背景

現代の設計では，設計者と生活者，設計者と利用者の立場が分離し，創出した人工物がいかなる帰結をもたらしているかについての配慮に欠けている．生産現場においては，情報技術を活用したスキルのデータベース化やロボットによる自動化が進められてはいるものの，それは熟練者育成や作業者の意味理解を促すことに逆行する．また今日の細胞の人為的改変・合成のための技術の進歩が目覚ましいが，人工の容器の中での細胞は細胞自身の自律性が失われ，元来細胞がもっていた環境世界・社会との見えないリンクを喪失させたまま人間の欲求に合わせて作動する機械と同じ設計原理が適用されようとしている．これらの問題を背景に，システムが人を育て，人がシステムを育てる相互主導性を担保できる新しいシステムの設計論の確立が求められる．

2. 研究の目的

目的をもって生きる存在としての自律的な主体（人，ロボット，細胞）が，物質の世界にありながら，他者主体を含む環境との相互作用を通して，意味の世界を創出して伝達する仕組み（記号過程）を解明し，工学的な構成論を展開する．そして，環境を多様化の進行する範囲の境界条件として使い，その条件下で対象が固有に有するダイナミクスに沿って適応させていくことのできるシステムの設計論を確立する．

3. 研究の方法

本研究では，自律ロボット，生物（ヒト）の歩行，人間機械系，人間-ロボット系，マルチロボット系，人間環境系，ヒューマンインタフェース，神経ネットワーク，生体環境設計，生産現場での組織的知識創造，の諸分野において，各々の自律的行動主体の適応行動と他主体を含む環境との相互作用の設計について研究を展開した．これらのシステムに共通するのは，事前に定められた規則や物理学法則によって生成される構造のみではなく，組織あるいは社会生態系の広がりの中で分散した単位がその置かれた環境を読み取り，それに応じて行動をとることができる要素群から構成され，常に安定と変化が作り出されながら変容を続けることのできる「可塑的」なシステムであるという特徴である．ここでのデザインとは，モノを作ることではなく，「系を変化させていく仕組み」を作ることとを目的とし，過度に設計せず，環境

を多様化の進行する範囲の境界条件として使い，その条件下で対象が固有に有するダイナミクス・自律性に沿って適応させていくことのできるシステムの設計論の構築を進めてきた．

本研究では，上記のような可塑性の原理を広義の「記号過程（セミオーシス）」に求め，システム論的観点から，『無限定（悪構造）な対象に対して，主体の能動的な介入によって個々の要素に対する意味のまとまりを生成し，その要素間の関係，ならびに要素と全体との関係を構造化して把握する際の「普遍的」な過程』として再定義を行ない，このもとで，数理モデル構築に基づく構成論的アプローチ，システム工学的手法による記号過程の解析手法の開発，ならびにヒトの実践共同体でのフィールド観察，等に基づいて，個々の分野に特異な記号過程について究明を進めることで，記号過程を内包した人工物システムの設計論を確立した．

4. 研究成果

本研究の学術的新規性は，設計対象物の固有の「実体的特性」の設計のみに注目する従来の機械論的設計論に代わり「関係的特性」に根差した新しいシステム設計論の構築である．すなわち，構造に対して固定的な機能を二項関係として対応づける閉じた設計ではなく，第三の要素としての上位の合目的系や人為的な制約条件の加わった中で，もともとの二項関係のあり方が質的に変化するようなシステムの設計・制御に関する新しい学術領域の創成を目指してきた．

研究の進行に合わせて，記号過程の本質を「意味作用」と「伝達」の側面に限定し，上記の多様な分野に通底する記号過程の構成原理を以下の3つに設定した．

(A) 内部モデル構成原理

記号過程とは，自らを取り巻く外界や他者との相互作用に対して，主体的に意味づけ，価値づけ，自らの棲む世界として秩序化していく過程である．ここでの記号は，環境を主体的に意味付けるための「内部モデル」であり，適応は，相互作用の集積に応じて自律的な個体の内部では常にダイナミックに内部状態が作り替えられることである．当初はランダムに近い形で集められた経験の集積が，無秩序状態に陥ることなく，統合された全体として内部で維持され，これに個体自らが「意味」を付与していくことで，環境に適応し，さらに他者とのコミュニケーションや，より高次な社会行動を可能にしている．

(B) 二重分節構造と2種類のコンテキスト

「分節化のシステム」とは、分節を形式的単位として、その組み合わせによってかたちと意味が生みだされるシステムのことを言う。一般に最小の分節を形づくる形式的単位には意味はなく、それらの形式的単位の組み合わせによって、かたちが生まれ、「記号」として意味をもつことになる。この二重分節の原理は、言語のみならず、運動や生物系の構成においても普く認められており、これにより、一見無限定に見える世界の中に、対立と差異による要素間の相互規定の関係と、分節化された全体と部分との有機的な関係を介して秩序を見いだすことができる。このような構造化・組織化を支配しているのが、「範列 (パラディグム)」と「連辞 (サンタグム)」の関係である。

(C) 共感を創出する複数の記号過程の相互作用場

記号は、複数主体による活動を「媒介」するものでもある。コミュニケーションにおいては、語り手と聞き手とが音声や身振りといった記号を使うことによって結びつけられている。記号表現と記号内容の関係は、排他的な一対一の固定的対応ではなく、双方の主体的な働きによって、既成コードの拘束を破り、外に対しても開かれ、より豊かなコードのもとに動的にコミュニケーションの体系が創り上げられていく。このような外部に対する「開いた」過程こそが、人を育てる過程の根幹にあると考える。

以下では、以上の記号過程の構成原理に則り、各グループの研究成果についてまとめる。

(1) 観察による動作認識の記号過程

観察からの動作認識においては、観る側は、提示された動きの手がかり (=記号) に対して、それが何を意図した動きであるのか (=対象) をイメージするための過程に積極的に参加する個人的経験として達成される (=解釈項の働き)。我々の身体は、意図するかしないに関わらず、常に何かを表すサインを外に向けて送っている。意図する場合には、自分を観る他者やその結果を意識したものとなり、その場合には動きそのものが、社会的な「表現」(シンボル)として機能することになる(例として「パントマイム」)。このように動作認識は、行為者・観察者双方の記号過程が交錯する場での活動として捉えることができる。本研究では、運動認識における記号現象の多層性をモデル化するために、観察される身体部位の光点時系列を、階層的な記号のネットワークとして記述した。さらに人間の表出する身体動作には限られた数の「動作素」が共有されており、個々の動きはその中から選択された動作素の変形・結合によって「基本動作」として実現されている仕組み(二重分節

構造)を明らかにした。このようなヒトの表出する動作についての類似と差異の構造に着目し、動作認識の記号過程について、分節による同化作用と差異作用を機械的に実現するための手法を開発した[1]。

(2) 環境適応ロボットの記号過程

本研究では「変動する未知環境の中で、厳しい物理拘束のもと、適応的行動を実時間で実現できる人工物システムの構成原理を明らかにする」ことを目的として、内部モデルの学習的形成(言語と文法)と適応的行動の実時間形成(選択と創発)を課題として設定した。外部環境との相互作用を通して自己組織的に主体内部に機能を内部モデルとして生成し、予測し得ない外部変動に対して、内部に埋め込まれている運動パターンの中から適切な運動パターンを実時間で選択・実現する機能を持った運動制御系の設計原理を明らかにした。中枢神経系と筋骨格系に対応する階層型自律分散システムを特徴づけるロボット内部での相互作用系の構築により、外界の環境変動(ゆらぎ)に対する恒常性あるいはロバスト性(stability)と積極的なゆらぎ(variability)という相補的な応答を実現した。また、ヒトの歩行運動について、身体の力学と周囲の環境、中枢神経系の3者が関わるシステムとしてモデル化し、その相互作用によって安定性と適応性を両立している機構について明らかにした。また、ロボットによる折り紙作業を対象として、作業系列の分節化による記号過程について解明したほか、小型無人航空機(エアロロボット)を対象とし、非線形性・非定常性をもつ環境のもとで、そのさまざまな状態や動作モードに最適な制御則を学習し、それらを適応的に切り替え、組み合わせるモジュール型学習法の提案を行うとともに、この学習に伴うモジュールの変化とその表象的意義について考察した[2, 8, 9, 10]。

(3) 適応環境の記号論

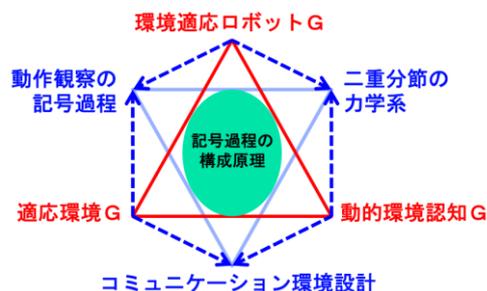
本研究では、「設計対象を事物としての環境から人間-環境系へと拡張し、記号過程を内包する適応環境を設計するとともに、個人的な行為を超えて、集合的活動の展開に向けた「ガバナンス」(governance)を実践すること」を目的とした。個体(生活者、利用者)と環境(建築物、インタフェース)との関係のデザインに相当するが、ここでの環境のもつ意味は、設計者と使用者との関係において存在する。さらに、設計の対象を街並みや景観に拡張し、複数の生活者の記号過程が交錯する場の設計の問題に展開した。ここでは個人の主体と環境との関係が、他の主体を含む共同体という高次階層から付与される目的のもとに変動することになり、系外の存在との相対関係において、マイクロ・マクロの記号

過程の交錯する場の設計論を展開し、住民参加の協働設計の方法論を確立した[3, 11].

また人と機械をつなぐユーザ・インタフェース (UI) に求められる機能は、目的を達成するために両者をうまく協働させる仕組みを提供することである。ここでのコミュニケーションは UI 上の有形無形の「記号」を媒介として実践されており、記号を契機としたさまざまな記号解釈の活動がその共同作業場に生起している。本研究では、この UI のデザインがユーザの記号過程に、さらには協働のためのコミュニケーションにどう影響するのかを調査し、人間と機械で共有される作業環境 (task ecology) の設計理論を、そこで生起する動的な記号過程との関係において構築した。とくに、複雑な自動化機械を用いる作業環境について、作業者の記号過程の観点から明らかにし、ユーザ・インタフェースとして実現した[4]。さらに、生産活動としての人間による改善活動を対象として、個人や共同体の中での解釈の変遷の過程と、組織におけるルールや分業との関係から、変化を起こす個人と組織が相互に関係しながら変化する過程の分析手法を開発したほか、集合知による複数の記号過程の交錯する場での合意形成手法を開発した[12].

(4) 動的環境認知の記号過程

本研究では、言語と動作、生体細胞の組織化において通底する二重分節構造の有用性を構成論的に明らかにすると同時に、その数理モデルを構築することで、集団における記号系の創発と組織分化の構成論[4]、非分節インタラクティブな相互作用を通じたロボットの模倣によるジェスチャ獲得に関する研究を遂行した。言語・動作・細胞組織に共通するのは、いずれの主体も、事前に辞書的に定義された語彙素や動作素の集合やその統語則によって世界を分節しているのではなく、語彙素の集合がそれを使用する主体にとっての世界 (意味論的世界) を形作っているのであって、これにより観察対象に対する意味の付与作用と他者個体への伝達を可能にしているという点である。本研究では、二重分節の数理モデルを構築することで、集団における記号系の創発と組織分化の構成論、非分節インタラクティブな相互作用を通じたロボットの模倣によるジェスチャ獲得に関する研究を遂行した[6, 7, 14]。またニューロン間の同期発火と、神経ネットワークのマクロ・ダイナミクス間の関係を理論モデルにより構築し、複数の特徴の組合せで表わされる概念刺激を与えた際に、独立特徴ごとの領野形成を可能にし、特徴の組み合わせによる意味の分散表現が自動的に生成できる学習モデルを提案したほか、振動子の相互作用による自己組織化モデルを開発した[5,



13].

以上に述べた研究成果の相互の関係について上図に示す。本研究では、各グループにおける研究成果を遂行するとともに、グループの枠を超えた新規融合テーマの創出を行った。この結果、コミュニティ・ガバナンスとエンパワメントに関する「場」のデザイン論に関する研究、セミオティック・ロボティクスなどの新規テーマを創成することができた。すなわち、「育てる設計論」を具現化するものとして、個体としての主体が集団としての社会に媒介された適応性を獲得していく問題対象では、コミュニティ・ガバナンスとエンパワメントとの関係を実証的かつ構成論的に明らかにすることができた。一方、ロボットに代表される人工物の対象では、主体性が埋め込まれ、常に遭遇する変動に対して、適応的に自己内部での自己組織化 (自律性) とヒトとの関係 (社会性) の様態を変えていける能力を有する機械システムを実現するための途を拓くことができた。いずれも設計因子として、内発的動機付けとゆらぎとしての自発的の発生源、二者間対話の過程の収束メカニズムの解明が鍵となることも明らかにした。これらの成果は、国際会議でのオーガナイズド・セッション/国際ジャーナル誌で、本研究テーマでの論文特集号を企画し、情報発信を行ってきた。

最後に、本研究を通じて得られた知見は、人とのインタラクションやコミュニティの形成、グローバル社会の制度設計にも活かせるものであり、温暖化・災害復興・エネルギーなど、今日我々が直面する複合的な問題において求められている社会のシステムやアーキテクチャまで含めたデザイン論に発展させることができる。本研究代表者ほか複数の研究分担者は、平成 24 年度に申請を予定しているリーディングプログラム (情報分野) として京都大学発の「デザインスクール構想」に参画し、本研究での実績をもとに研究・教育両面から本研究課題を継続的に発展させていく予定である。この他、本研究の継続テーマについては、国内学協会による公募プログラムへ応募し採択を受けたほか、複数の包括的産学連携研究テーマの開始が平成 24 年度以降に開始することが決定している。

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 127 件)

- 1) Hiroaki Nakanishi, Sayaka Kanata, Hirofumi Hattori, Tetsuo Sawaragi and Yukio Horiguchi, Extraction of Coordinative Structures of Motions by Segmentation using Singular Spectrum Transformation, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 15(7), 1019- 1029, 2011
- 2) S. Aoi, T. Yamashita, and K. Tsuchiya, Hysteresis in the gait transition of a quadruped investigated using simple body mechanical and oscillator network models, Physical Review E, 83(6), 061909, 2011
- 3) 山口純, 門内輝行, C. S. パースの記号分類に基づく設計プロセスの分析, 日本建築学会計画系論文集, 76(664), 1111-1120, 2011
- 4) 堀口由貴男, 黒野晃平, 中西弘明, 榎木哲夫, 永谷達也, 野田哲男, 田中健一, 産業用ロボット教示作業支援のための複合情報 GUI, 計測自動制御学会論文集, 47, 656-665, 2011
- 5) Takaaki Aoki and Toshio Aoyagi, Self-organized network of phase oscillators coupled by activity-dependent interactions, Physical Review E, 84(6), 21903, 2011
- 6) Yang Zhang, Tetsuya Ogata, Shun Nishide, Toru Takahashi, Hiroshi G. Okuno, Classification of Known and Unknown Environmental Sounds based on Self-organized Space using Recurrent Neural Network, Advanced Robotics, 25(17), 2127-2141, 2011
- 7) Tadahiro Tagniguchi, Keita Hamahata and Naoto Iwahashi, Unsupervised Segmentation of Human Motion Data Using Sticky HDP-HMM and MDL-based Chunking Method for Imitation Learning, Advanced Robotics, 25(17), 2143-2172, 2011.
- 8) S. Aoi, N. Ogihara, T. Funato, Y. Sugimoto, and K. Tsuchiya, Evaluating functional roles of phase resetting in generation of adaptive human bipedal walking with a physiologically based model of the spinal pattern generator, Biological Cybernetics, 102, 373-387, 2010
- 9) T. Funato, S. Aoi, H. Oshima, and K. Tsuchiya, Variant and invariant patterns embedded in human locomotion through whole body kinematic coordination, Experimental Brain Research, 205(4), 497-511, 2010
- 10) 中西弘明, 金田さやか, 榎木哲夫, 堀口由貴男, 自律型無人ヘリコプタの環境適応方位制御, 計測自動制御学会論文集, 46(1), 8-15, 2010
- 11) 守山基樹, 門内輝行, 京都の街並み景観の記号化と記号のネットワークの記述: 街並み景観における関係性のデザインの分析 その1, 日本建築学会計画系論文集, 75(652), 1507-1516, 2010
- 12) H. Mizuyama and T. Komatsu, A Prediction Market Approach to Facilitating Consensus Building among Supply Chain Partners, E-Journal of Advanced Maintenance, 2(3), 149-159, 2010
- 13) Takaaki Aoki and Toshio Aoyagi, Co-evolution of phases and connection strengths in a network of phase oscillators, Physical Review Letters, 102(3), 034101, 2009
- 14) Tadahiro Taniguchi and Tetsuo Sawaragi, Incremental acquisition of behaviors and signs based on a reinforcement learning schemata model and a spike timing-dependent plasticity network, Advanced Robotics, 21(10), 1177-1199, 2007 ほか

[学会発表] (計 687 件)

[図書] (計 9 件)

- 1) 榎木哲夫, スキルと組織, 財団法人国際高等研究所, 276 頁, 2011 ほか

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: 細胞・組織供給用支持体, 細胞・組織供給体及びその製造方法, 組織再生方法並びに多孔質体の製造方法

発明者: 玉田靖、小島桂、富田直秀、平方栄一

権利者: 国立大学法人京都大学

種類: 特願

番号: 2009-192600

出願年月日: 2009 年 8 月 21 日

国内外の別: 国内

名称: 応答戦略獲得装置、リアクション選択装置、コンピュータプログラム、及びロボット

発明者: 谷口忠大, 岩橋直人, 中西弘門

権利者：立命館大学 NICT
種類：特願
番号：2009-181828
出願年月日：2009年8月4日
国内外の別：国内

○取得状況（計0件）

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.syn.me.kyoto-u.ac.jp/s-emiosis/index.html>

報道関連情報

- 1) 日本経済新聞, 2007年11月30日, 「器用に紙折るロボット」
- 2) マイコミジャーナル, 2009年7月15日, 「三菱と京大、セル生産方式に対応するロボットの知能技術を開発」
- 3) 日刊工業新聞, 2009年9月28日 「ロボット“共存”社会へ 夢と現実 「産業用」メーカー間で温度差」
- 4) 修徳まち通信, 2010年2月25日
- 5) 京都新聞, 2010年3月1日, 「住民が景観デザイン」
- 6) 鉄鋼新聞, 2012年3月13日, 一面, 「試練を超える：環境などのゆらぎに対応 「しなやかな耐性」を：製鉄所の潜在リスク産学連携で検証」ほか

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榎木 哲夫 (SAWARAGI TETSUO)
京都大学・工学研究科・教授
研究者番号：10187304

(2) 研究分担者

土屋 和雄 (TSUCHIYA KAZUO)
京都大学・工学研究科・名誉教授
研究者番号：70227429
門内 輝行 (MONNAI TERUYUKI)
京都大学・工学研究科・教授
研究者番号：90114686
富田 直秀 (TOMITA NAOHIDE)
京都大学・工学研究科・教授
研究者番号：50263140
横小路 泰義 (YOKOKOJI YASUYOSHI)
神戸大学・工学研究科・教授
研究者番号：30202394
尾形 哲也 (OGATA TETSUYA)
京都大学・情報学研究科・准教授
研究者番号：00318768
青柳 富誌生 (AOYAGI TOSHIO)
京都大学・工学研究科・准教授
研究者番号：90252473
水山 元 (MIZUYAMA HAJIME)
青山学院大学・工学部・准教授

研究者番号：40252473
中西 弘明 (NAKANISHI HIROAKI)
京都大学・工学研究科・講師
研究者番号：50283635
堀口 由貴男 (HORIGUCHI YUKIO)
京都大学・工学研究科・助教
研究者番号：50362455
青井 伸也 (AOI SHINYA)
京都大学・工学研究科・助教
研究者番号：60432366
谷口 忠大 (TANIGUCHI TADAHIRO)
立命館大学・情報理工学部・准教授
研究者番号：80512251

(3) 連携研究者 なし