

機関番号：62615

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2008 年度 ～2010 年度

課題番号：20680013

研究課題名 (和文) 感覚運動情報と言語間の相互変換モデルによる行為知能と対話知能の融合

研究課題名 (英文) Integration of Intelligence for Speech Act and Motion Act based on Mutual Conversion between Sensorimotor Patterns and Symbols

研究代表者 稲邑 哲也 (Tetsunari Inamura)

国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・准教授

研究者番号：20361545

## 研究成果の概要 (和文)：

ロボットが人間と協調してタスクを遂行するためには、センサ情報を認識し適切にアクチュエータを駆動するための行為を司る知能と、状況に応じて質問・確認・提案などを行う対話を司る知能の統合が必要となる。本研究では感覚運動パターンを幾何学的な位相空間で抽象化する手法と、タスクを遂行可能な可能性を確率的に評価する確率モデルを統合することで、動作の計画問題と対話の制御問題を融合して解決できる知能アーキテクチャを実現した。

## 研究成果の概要 (英文)：

Integration of intelligence for speech act and motion act is an important function for intelligent robots that cooperate with human beings. A phase space construction method to abstract sensorimotor patterns is developed for symbolization of motion act. Additionally, stochastic model that evaluate plausibility of behavior and speech strategy is developed. With integration of the two methods, an architecture that control both of speech act and motion act is introduced.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2009 年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2010 年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
年度			
年度			
総計	19,700,000	5,910,000	25,610,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：感覚行動システム・対話的行為システム

## 1. 研究開始当初の背景

人間型ロボットのような知能ロボットが持つべき重要な機能として、人間とのコミュニケーション機能がある。特に、プログラム言語のような専門的な表現方法ではなく、簡単な音声言語等を用いて、目的となる行動をいかにロボットに指令するか、という問題今

後非常に有用となる機能であり、かつ、困難な問題である。大きな理由の一つは、ユーザが思い描く目的行動を言語・記号に変換する際に、その表現が一意に定まらないという問題がある。従来の知能ロボットにおいて行動を設計するには、ロボットの行為に必要となる、目的状態、初期状態、対象物体、注意点、動作パターン、センシング情報等さまざま

まな情報をいかに記号で表現し、それらの因果関係をいかに記述するか、という事が重要な要素となっていた。

一方、人間とロボット間のコミュニケーションが必要となる別の状況として、ロボットが自らの知識を持ってしても適切な行動ができない時にユーザや周辺の人々に質問をする状況や、人間が不適切な指示をした時に確認や訂正を求めるような状況である。いずれの状況にしても、いかに感覚運動情報と言語情報の相互変換を行い、感覚運動情報をいかに人間に分かりやすく表現するか、また逆にいかにユーザからの言語的指示を感覚運動情報に変換し行動を実行するか、という点に問題が集中する。

言葉を豊富に使って動作を表現し、逆に言葉から動作を再現するという、従来の計算機科学で最も困難な処理の一つであった機能が実現されれば、身振り手振りで動作を示しながら言語で指示を出すことでより詳細な行為を伝達することが可能となり、場合によっては動作をすることなく言語だけで動作を指示することも可能となる。また、言語の指示が曖昧だった場合には、予想される動作と言語的説明をユーザに提示し、確認を求めることで、人間同士が行っている自然なインタラクションによる動作伝達・設計が可能となる。

## 2. 研究の目的

上記の背景と問題点を踏まえ、本研究では、高度なプログラミング知識を持つ専門家だけがロボットの行動を設計出来る状況を打破することを目指し、「やさしく豆腐をつかんで」「もっと早く歩いて」などのように言語で指示を出したり、「大きく手を振る、とはこのくらいですか？」と身体動作によるパフォーマンスを行いながらロボットがユーザに質問をしたりすることで、複雑な行動を対話的に遂行することのできる知能アーキテクチャを構築することを目的とする。従来の学術研究では、ロボット工学の分野で発展してきた「行為を実現するための知能」と人工知能の分野で発展してきた「言語対話戦略を練る対話知能」が乖離してきていたが、本研究ではこれらを一つのフレームワークの中で結合させ「行為知能と対話知能の融合」により、新しいユーザフレンドリなロボットの知能の実現を目指すものである。

## 3. 研究の方法

### (1) 連続量の感覚運動情報と離散的言語表現の相互変換モデルの構築

従来までの研究課題において、感覚運動情報を記号で表現するための手法として、隠れマルコフモデルに基づくミラーニューロンモデルを構築し動作パターンの認識・再生・抽象化を行う数理手法を提案した。この従来手法を利用して、「歩行と走行の中間的な動作」「歩いていたが次第に走り出した」というように動作情報と言語的表現の相互変換モデルを構築する。

### (2) 確信度に基づくロボットからユーザへの質問・提案・確認行動の実現（対話知能の基盤構築）

従来までに開発した、実世界で行動するロボットのためのセンサ情報と動作の種類間の対応関係に関する対話システムを拡張する。動作の種類という記号的な情報のみならず、人間の運動パターン、感覚情報、さらには行為の対象となる物体に関する情報も対話の対象となるような発展をさせる。特に、確信度が低いという状況が、学習を始めたばかりの状況でデータ数が足りないのか、学習の対象となる状況が切り替わったために確信度が低いのか、ということを判断する機能を設け、低い確信度の際に適切な対話を生成する手法の確立を目指す。

### (3) 感覚運動情報と言語間のマッピング機構を対話的に学習する機能の構築

個人に特化して言語の使い方、表現の仕方をインタラクティブに学習するシステムの構築を試みる。特に、感覚情報を言語化するために、ロボットが実際に動作を行いながら「いまの動作は重かったですか？」と質問を投げかけたり、『大きく手を振って』というのは、このくらいの大きさですね？』と確認をしたりして、個人の言葉の使い方と言語表現の間の関係性を学習する。

### (4) 最終システム統合と評価実験

自然言語処理とベイジアンネットの統合による実世界指向対話の拡張システム、および、動作パターンの幾何学的空間表現（原始シンボル空間）の拡張を行い、行為知能と対話知能の融合システムの構築を行う。このシステムを用いて以下のような機能を実際のヒューマノイドロボットにおいて実現させ、その有効性について確認と評価を行う。

#### 4. 研究成果

##### (1) 連続量の感覚運動情報と離散的言語表現の相互変換モデルの構築

従来までに提案してきている、運動パターン情報を原始シンボル空間と呼ばれる幾何学的抽象化空間に射影する数理手法を利用して、「歩行と走行の中間的な動作」「歩いていたが次第に走り出した」というように動作情報と言語的表現の相互変換モデルを構築した。具体的には、具体的には運動パターンだけでなく、視覚、視線、圧触覚、聴覚などの多種多様な感覚情報を含めた複雑な感覚運動パターンのシンボル表現を確立するための拡張を行った、また、原始シンボル空間内での状態点の内分・外分操作によって、感覚運動パターンの内挿・外挿操作を行う数理手法を開発することで、限られた個数の有限の基本動作パターンから半無限の種類動作パターンを表現することが可能となる手法を提案した。

##### (2) 確信度に基づくロボットからユーザへの質問・提案・確認行動の実現

ユーザの取る行動の観察に基づいてその行動戦略を学習するロボットにおいて、ユーザへの質問や確認などの発話行為と、ロボット自身の行動決定の双方を同時にプランニングすることのできる手法をBayesian Networkに基づいて構築した。具体的には、移動ロボット上での複数のセンサ情報とロボットの移動方向の間の関係をBayesian Networkで表現し、センサ情報に応じて取るべき移動方向の推論を、確率値と確信度の双方で評価した。確信度の高低による発話行為の制御し、確率値の高低による移動方向の制御で行為知能と対話知能の融合に対する基盤を構築した。特に、ユーザとの対話経験が十分に蓄積されていない際には、確信度が低い傾向が高く、自律行動の決定より先に質問や確認が出力されてしまう問題点があったため、これを防ぐためにディリクレ分布によって確信度を評価する手法を導入し、学習が開始された直後の経験が不足している状況においても、適切に発話行為と自律行動の決定が融合されることを、実際の移動ロボットを遠隔操作するアプリケーションを通じて確認した。

さらに、刻一刻と変化していく環境条件の変動やユーザの意図の変動に素早く追従して逐次学習を遂行するために、学習サンプルデータの重要性をベータ分布およびディリクレ分布を用いて評価し、重要な学習サンプルのみを採用することで効率性の高い、リアルタイムの逐次学習を実現した。

##### (3) 感覚運動情報と言語間のマッピング機構を対話的に学習する機能の構築

前述した(1)での研究成果「感覚運動情報と離散的言語表現の相互変換モデル」は、他者と自己の身体構造が全く同一のものでないと適用ができないという課題点も残されていた。この問題の原因は直接観測できない他者の感覚情報と自己が感じる感覚情報のバインディングができない点にあった。そこで異なる身体を持つ他者と自己が観測可能な動作パターンを共有し、その動作を実行した際に生じる感覚情報を言語化し対話を行うことで、相手の感覚運動パターンを推測しつつ、その感覚パターンを言語化する手法を提案した。

具体的には、自己と他者の2者間で同じ動作を行いつつ、他者に感覚の程度の大小の質問を行い、なるべく少ない回数の質問で感覚をシンボルに変換する規則の推定を可能とした。また、ヒューマノイドロボット間の対話に基づく運動模倣学習実験を行った。その結果、言語表現への変換規則が不明な状態で、かつ、2体のロボットの質量が異なるような条件化であっても、他者のトルク感覚の値の推定が約20%の誤差で実現可能となった。

##### (4) 最終システム統合と評価実験

言語表現と全身運動動作パターンの相互変換モデルの有効性を確認するための評価実験として、ロボットが人間に対して動作パターンを教示するタスクをターゲットとし、動作パターンの直接提示および言語表現による説明、の二つの情報が果たす役割を考察することとした。そのための準備として、360度の周囲をスクリーンで囲まれ、かつ、その空間内で被験者の動作計測を行うことのできるデバイスを構築した。また一方で、複数のロボットエージェントがお互いに動作を行いつつ、言語表現でコミュニケーションを行う身体的・社会的な相互作用を行う仮想実験を通じて、大規模・長時間のインタラクションに基づく言語表現と身体運動のマッピングの獲得実験を行うために、身体運動の力学、視聴触覚の感覚、物理的制約に支配された限定的なコミュニケーション、の3点を融合可能なシミュレータシステムを開発した。

これらのシステムを用いて、テニスのスイング動作を対象として動作教示を行うタスクを対象として動作生成と対話制御の統合実験を行った。初心者未熟な動作と対象となる手本動作の違いを原始シンボル空間法と呼ばれる、時系列動作パターンの幾何学的抽象化表現を用いて表現し、動作の差異を原始シンボル空間の中の空間的位置の差として表現することで、修正すべき動作の差分

を空間内におけるベクトルとして抽出することが可能となった。このベクトルを用いて動作修正のための強調された動作を生成するプロセスと、ベクトルのスカラーに応じて「もっと」や「ちょっと」という修正度合いを表す言語表現を生成するプロセスを統合することで、動作生成と言語生成を融合させ、被験者実験を通じてその有効性を確認した。

#### 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 13 件)

① Saifuddin Md. Tareeq and Tetsunari Inamura: "Management of Experience Data for Rapid Adaptation to New Preferences based on Bayesian Significance Evaluation," *Advanced Robotics*, Vol.25, No.18, 2011. (査読有り)

② Matei Negulescu and Tetsunari Inamura: "Exploring Sketching for Robot Collaboration," 6th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, pp.211-212, 2011. (査読有り)

③ Saifuddin Md. Tareeq and Tetsunari Inamura: "Rapid Behavior Adaptation for Human-centered Robots in Dynamic Environment based on Integration of Primitive Confidences on Multi-sensor Elements," *Journal of Artificial Life and Robotics* Vol.15, No.4, pp.515--521, 2010. (査読有り)

④ 稲邑 哲也, 柴田智広: "動作パターンとシンボルを相互変換する原始シンボル空間における動作パターンの内挿・外挿," *日本ロボット学会誌*, Vol. 28, No. 4, pp. 512--521, 2010. (査読有り)

⑤ Tetsunari Inamura et al: "Simulator platform that enables social interaction simulation --SIGVerse: SocioIntelli-Genesis simulator--, " *IEEE/SICE Int' l Symposium on System Integration*, pp. 212--217, 2010. (査読有り)

⑥ Ohhoon Kwon and Tetsunari Inamura: "Surrounding Display and Gesture based Robot Interaction Space to Enhance User Perception for Teleoperated Robots", *Int'l Conf. on Advanced Mechatronics*, pp. 277--282, 2010. (査読有り)

⑦ Saifuddin Md. Tareeq and Tetsunari Inamura: "Rapid Behavior Adaptation for Human-centered Robots based on Integration of Primitive Confidence on Multi-sensor Elements," *Int'l Conf. on Advanced Mechatronics*, pp. 271--276, 2010. (査読有り)

⑧ Saifuddin Md. Tareeq and Tetsunari Inamura: "Management of Experience Data for Rapid Adaptation to new Policies based on Bayesian significance Evaluation", in *Proc. of International Symposium on Artificial Life and Robotics*, pp.126--129, 2010. (査読有り)

⑨ 稲邑 哲也, 谷江博昭, 中村仁彦: "幾何学的シンボル操作による多様な動作パターンの認識・生成を実現する原始シンボル空間の構成法", *日本ロボット学会誌*, Vol. 27, No. 5, pp. 84--94, 2009. (査読有り)

⑩ Tetsunari Inamura, Kei Okada, Satoru Tokutsu, Naotaka Hatao, Masayuki Inaba and Hirochika Inoue: "HRP-2W: A Humanoid Platform for Research on Support Behavior in Daily Life Environments," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 57, pp. 145--154, 2009. (査読有り)

⑪ Tetsunari Inamura and Keisuke Okuno: "Estimation of other's sensory patterns based on dialogue and shared motion experiences," *IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 617--623, 2009. (査読有り)

⑫ Tetsunari Inamura and Tomohiro Shibata: "Geometric Proto-Symbol Manipulation towards Language-based Motion Pattern Synthesis and Recognition," *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 334--339, 2008. (査読有り)

⑬ Saifuddin Md. Tareeq and Tetsunari Inamura: "A Sample Discarding Strategy for Rapid Adaptation to New Situation based on Bayesian Behavior Learning," *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp.1950--1955, 2008. (査読有り)

[学会発表] (計 30 件)

① 稲邑 哲也: "感覚運動情報のシンボル化と強調動作提示法に基づくコーチングロボット" (招待講演), 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会 (HIP), 2011-02-21, 沖縄国際大学

② 稲邑 哲也: "SIGVerse: 社会的知能発生学シミュレータ~身体的運動・認知と社会的コミュニケーションの統合システム~", デジタルヒューマンシンポジウム 2010 (招待講演), 2010-03-03. 東京.

③ Tetsunari Inamura: "Simulator platform that enables social interaction simulation -SIGVerse: SocioIntelli-Genesis simulator-, " Workshop on Mobiligence: Social Adaptive Functions in Animals and Multi-Agent Systems, in Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2009-10-11, St. Louis, USA.

④ Tetsunari Inamura: Communicative Imitation: -- Estimation of other's sensorimotor patterns based on dialogue, R:SS Workshop on Bridging the gap between high-level discrete representations and low-level continuous behaviors, 2009-06-28, Seattle, USA.

⑤ 稲邑 哲也: "感覚運動情報の抽象化空間モデルによる行動生成", チュートリアル「環境適応 — 予測と内部モデル」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (招待講演), 2009-05-24. 福岡.

⑥ Tetsunari Inamura: Behavior Imitation and Embodied Symbol Manipulation on Humanoid Robots, RSS Robotics: Science and Systems Area Chair Workshop, 2009-03-29. Seattle, USA.

⑦ Tetsunari Inamura and Keisuke Okuno: "Adaptive acquisition of mimesis model based on communication between humanoid robots," International workshop on Imitation and Coaching in Humanoid Robots (joint conjunction with International Conference on Humanoid Robots), 2008-12-02, Daejeon, 韓国

⑧ 稲邑 哲也, "ヒューマノイドロボット間の対話に基づく感覚運動パターンの抽象化空間の適応的獲得," 情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2008), 2008-10-31, 仙台.

⑨ Tetsunari Inamura: "Multimodal

Sensorimotor Integration and Behavior Induction Between Other and Self Based on Mirror Neuron Model", First France-Japan Research Workshop on Human-Robot Interaction, (invited talk), 2008-10-27. 仙台.

⑩ 稲邑 哲也: "ヒューマノイドロボットでの他者自己間行動誘発を実現する感覚運動情報の抽象化," 第 2 回移動知一般公開シンポジウム (招待講演), 2008-10-21.

⑪ 稲邑 哲也, "ヒューマノイドロボットにおける行動模倣とシンボル創発", 豊橋技術科学大学 ADIST シンポジウム (招待講演), 2008-10-17. 豊橋技術科学大学.

⑫ Tetsunari Inamura: "Behavior Imitation and Embodied Symbol Emergence on Humanoid Robots," 総研大学生セミナー (招待講演), 葉山, 2008 年 10 月 10 日.

⑬ Tetsunari Inamura: "Behavior Imitation and Embodied Symbol Emergence on Humanoid Robots," JSPS Summer Program 2008 Special Lecture (Invited Talk), 葉山, 2008 年 6 月 19 日.

[図書] (計 1 件)

Tetsunari Inamura, Tomohiro Shibata: "Interpolation and Extrapolation of Motion Patterns in the Proto-symbol Space," Neural Information Processing of Lecture Notes in Computer Science, pp.193--202, 2008.

[その他]

ホームページ等

<http://web.iir.nii.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

稲邑 哲也 (Tetsunari Inamura)

国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・准教授

研究者番号: 20361545

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし