

機関番号：12102

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20680012

研究課題名（和文） 長期・継続的な身体的経験から学ぶ人間型ロボットの研究

研究課題名（英文） A Study on Humanoid Robot that learns from long-term and continuous embodied experiences

研究代表者

鈴木 健嗣 (KENJI SUZUKI)

筑波大学・大学院システム情報工学研究科・講師

研究者番号：30350474

研究成果の概要（和文）：これまでに、ロボットの身体的経験に基づく学習機構の実現を目的とし、人間-機械系における相互作用に関わる自己知覚と学習・能動探索と学習・相互作用と学習・関係性の学習のそれぞれのサブテーマにおいて、着実な成果を挙げてきた。特に、ロボットが自発的な動作により環境に働きかけ、異なるモダリティのパターン間の関係を学習するとともに、人間が観察して外部より直観的な指示を行うことで、長期・継続的に学習する人間型自律ロボットを実現した。

研究成果の概要（英文）：In order to develop a learning mechanics based on the embodiment of the robot, several studies such as self-perception, active sensing, learning and interaction have been done. The developed robot is capable to behave to explore objects in the surrounding environment and build its own knowledge through interaction with the environment. Online learning between different modalities based on given subjective evaluation by the observer is also realized.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2009年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2010年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
年度			
総計	19,300,000	5,790,000	25,090,000

研究分野：情報機械工学

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：知能ロボティクス，機械学習，ヒューマノイド，認知工学，認知発達ロボティクス，対話的学習

## 1. 研究開始当初の背景

これまでロボットの行動や稼動範囲に関しては、主に外部より予め想定された場面における規則を与え、その枠組みの中でロボットは記号的記述に基づく行動を行うため、実環境において起こりうる予期せぬ状況に対処できなくなる本質的な問題がある。一方、高度複雑化するロボットに対する動作指令

も複雑になるため、人による効果的な動作指示は特に重要な課題である。このように、実環境や人間との相互作用、さらにロボット自身から得られるモダリティの異なる膨大なセンサ情報をいかにして適切な行動パターンと関連付けるか、という学術的な課題がある。

ここでは、ロボットが自発的な動作により環境に働きかけ、異なるモダリティのパター

ン間の関係を学習するとともに、人間が観察して外部より直観的な指示を行うことで、長期・継続的に学習する人間型自律ロボットが実現できる段階であると考えた。これは、幼児が自身の自発的な行動により環境を学ぶとともに、親が幼児に事象の表現ややり方を教えるようにロボットを訓練させたい、という申請者の強い要求から着想を得た研究である。ステージでの短時間のデモだけに留まらず、物理的頑健性を有することで長期・継続的に安定して動作する技術的な進展を示すとともに、身体的経験からなる頑健で柔軟な知能を備えて環境に適応できる人間型ロボットの研究に寄与するものである。

## 2. 研究の目的

本研究は、人間-機械系の相互作用の研究にあたり規範となる構成論的な方法論として、「長期・継続的に人間とロボットが相互作用する環境」を実証するため、ロボットが自身の痛みや内部状態を自覚し、人間や環境との相互作用の情報を長期・継続的に蓄積することで、自身の身体的経験として「自他を含む事象の関係性を学ぶ」という、24 時間 365 日稼働を目標とし、物理・知能両面に頑健な人間型ロボットの実現に関する基礎的な研究開発である。

## 3. 研究の方法

ここでは、人間-機械系における相互作用に関わる各個別の達成目標に基づき、物理的機構(1)・知能処理(2)(3)の両面に関し、また、長期・継続的に動作し、人間と相互作用しながら学ぶロボットを構築する。

(1) (自己知覚と学習) 自己知覚に基づく能動的な稼働範囲の獲得・動作計画の実現：一般にロボットは、自身の稼働範囲を外部より与えられるため、環境の変化や自身の機能異常があった場合、稼働範囲を自身で新たに定めることができない。そこでロボットに、関節部位において生じる異常状態を記憶・学習する、いわば人間の「痛み」に相当する内部制約を持たせこれにより稼働範囲を能動的に獲得し、動作計画を行うロボットを実現する。

(2) (能動探索と学習) 視聴覚と力覚の統合による能動的マルチモーダル物体環境認識：ロボットに内発的動機に相当する機構を持たせ、自発的に目の前にある物体を抽出し、物理的に触れることで、視覚情報、及び自身のアームとロボットハンドによる力覚情報の協調による物体操作が可能になることを

実証する。

(3) (相互作用と学習) 人間との相互作用による経験・教示の蓄積に基づく行動計画：また、人間の主観的・直感的な評価を用いたロボットの動作教示の実現を目指すため、ロボットに与えられたタスクの達成・失敗を教師(人間)が観察することにより、主観的・直感的な評価として直接的にロボットに与えることが出来ることを示す。

(4) (関係性の学習) 視聴力覚のセンサ情報と、ロボット動作との関係性の学習：またこれらを統合するために、力学系の位相空間により記述されたロボットの動作と、視覚・聴覚・力覚から得られるセンサ情報を、それぞれ記号(シンボル)ではなく時系列のパターンとして取り扱い、相互部分空間法と提案する新しい学習機構により、別のN次元の意味空間(パターン空間)上に写像することで、異なるモダリティ間の関係性を学習する、というこれまでにない新しい性質をもつ人間型ロボットの実現が可能となる。

## 4. 研究成果

実証実験での利用と並行して、人間型自律ロボット(上半身 35 自由度・駆動部 28)の頑健性を向上させるために整備を進めるとともに、比較対照実験で利用する小型人間型ロボットを1体導入し、各課題の目的に基づき着実な成果を得た。

### (1) 自己知覚と学習：

痛み計測実装と、内部制約を用いた制御理論の考察を行う「自己知覚と学習」の課題については、人間型ロボットの腕部を制御対象として、アクチュエータにかかる過負荷を検出することによる衝突検知を用いることで、外部環境のモデルを用いることなく、ロボット自身の能動的な動作による稼働範囲の逐次更新により、稼働範囲を獲得するとともに、獲得した稼働範囲に基づき動作を行うことが出来るようになった。特に、関節駆動部モータにおける過負荷の検出に基づき、異常な接触が発生した時点の関節角度の履歴から、その近傍を避けるように動作計画を行うことで、駆動部の保護を行いながら連続した能動的な動作により作業空間の構築が出来るなどなど、一定の成果を得た。

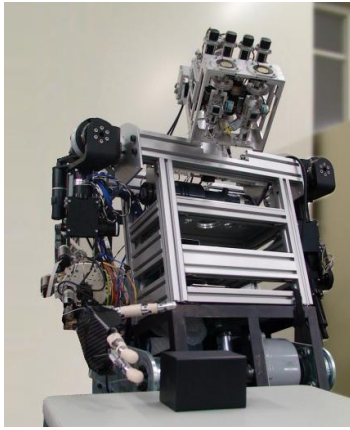


図 1. 開発・改良した上半身人間型ロボット

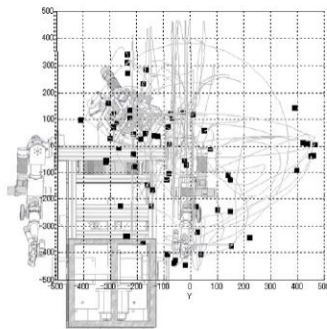


図 2. 能動的動作に基づく自己知覚：動作に応じた関節部の内部センサに基づく自己モデル構築の例

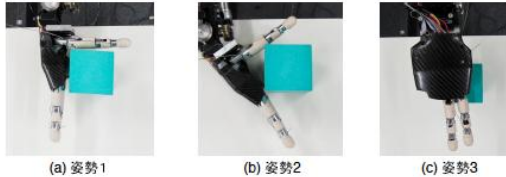


図 3. 異なる運動・把持姿勢に応じた物体挙動の学習実験の例

## (2) 能動探索と学習

視覚の統合による能動的マルチモーダル物体環境認識を実現する「能動探索と学習」の課題においては、好機動機に基づく自発的探索アルゴリズムの基礎研究、及び音声を用いた言語学習の研究に取り組み、ロボット実機による実証実験を行い、その有効性を明らかにするなど、一定の成果を得た。特に、物体間の外観・挙動を考慮した類似度の指標を取り入れるとともに、複数の物体を用いた実験から、提案手法によりロボットが探索時に得た知見を用いて物体間の材質の違いを評価出来ることを示した。また、本システムをロボットが物体の把持可能姿勢を探索するタスクにも適用可能であること、及び探索により獲得した知見の目的に応じた利用についてもあわせて実現した。

## (3) 相互作用と学習

さらに、人間との相互作用による経験・教示の蓄積に基づく行動計画を実現する「相互作用と学習」の課題については、提案手法を人間型アームに実装し、実証実験を行うことで有効性を示した。人間との相互作用による経験・教示の蓄積に基づく行動計画を実現するため、人がロボットの動作を観察しながら、逐次非常に簡便で直観的な評価を与える新しいインターフェースの開発を行うとともに、対話的学習と組み合わせる研究を実施して成果を収めた。ここでは、人間の主観的な評価によって学習を行う手法であるコーチングを用いて、人間の教示者が報酬関数を動的に調節することで、エージェントの学習を促進させる新しいエージェントへのオンライン行動学習支援法を提案した。これにより、従来の強化学習法のみでは学習困難なタスクにおいても、効率的に行動学習が行えることをシミュレーションおよび人間型ロボットアームを用いた実機実験により示した。提案手法による行動獲得を通じて、教示者もどのようにエージェントを学習させるか、ということと同時に学習しており、このことから提案手法は人間とエージェントによる相互学習型手法であるといえる。



図 4. 人間型ロボットアームへの教示と相互学習の例

## (4) 関係性の学習

このように、(1)(2)の課題を組み合わせることで、視覚・聴覚・力覚から得られるセンサ情報を、それぞれ記号（シンボル）ではなく時間長の異なる時系列のパターンとして取り扱い、関係性を学ぶ学習機構により、別のN次元の意味空間（パターン空間）上に写像することでその因果関係である類似度を学習することで一定の成果を得た。ここでは、発展的課題として、別なロボットプラットフォームに提案手法を応用し、可能な限り記号的表現を用いずに、異なるモダリティ間の関係を長期的に学習する人間型ロボットが実現する可能性を見出しており、現在も研究を継続している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計10件）

- ① 廣川 暢一, 鈴木 健嗣: 教示者による学習支援に基づくエージェントのオンライン行動獲得, 人工知能学会論文誌, 25(6), 2010, pp. 694-702. (査読有)
- ② Hirokawa, M., Suzuki, K.: Coaching to Enhance the Online Behavior Learning of a Robotic Agent, Lecture Notes in Computer Science, Springer, 6276, 2010, pp. 148-157. (査読有)
- ③ Kim, M., Suzuki, K.: A Card Playing Humanoid for Understanding Socio-emotional Interaction, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer, 6243, 2010, pp. 9-19. (査読有)
- ④ Ye Pan, Kim, M., Suzuki, K.: A Robot Musician Interacting with a Human Partner through Initiative Exchange, Proc. of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression, 2010, pp. 166-169 (査読有)
- ⑤ Harada, A., Suzuki, K.: Action oriented bayesian learning of the operating space for a humanoid robot: Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2009, pp. 633-638 (査読有)
- ⑥ Jin, G., Suzuki, K.: Action oriented bayesian learning of the operating space for a humanoid robot, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2009, pp. 1495-1500 (査読有)
- ⑦ Berenz, V., Suzuki, K.: Sensory-objects network driven by intrinsic motivation for survival abilities, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2009, pp. 871-876 (査読有)
- ⑧ Harada, A., Suzuki, K.: Action oriented self-modeling and motion planning for a humanoid robot, Proc. of 8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2008, pp. 367-372 (査読有)
- ⑨ Suzuki T., and Suzuki, K.: Motivation oriented action selection for understanding dynamics of objects, Proc. of 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008, pp. 846-851 (査読有)
- ⑩ Suzuki, K., Harada, A. Suzuki, T.: Learning from long-term and multimodal interaction between human and humanoid robot, Proc. of Industrial Electronics, 2008, pp. 3419-3424 (査読有)

[学会発表] (計6件)

- ① Hirokawa, M., Suzuki, K.: Coaching to Enhance the Online Behavior Learning of a Robotic Agent, KES2010, 2010年9月7日, 英国
- ② Suzuki, K.: Augmented Human Technology to Enhance Cognitive Capabilities, International Seminar on Intelligent Systems, 2010年9月6日, スロバキア
- ③ Kim, M., Suzuki, K.: A Card Playing Humanoid for Understanding Socio-emotional Interaction, International Conference on Entertainment Computing, 2010年6月5日, 韓国
- ④ 廣川 暢一, 鈴木 健嗣: コーチングによる報酬関数の動的生成に基づくエージェントの行動学習, HAI シンポジウム 2009 (HAI-2009), 2009年12月5日, 東京.
- ⑤ Suzuki, K.: Toward coaching a robot by utilizing bioelectrical signals, Imitation and Coaching in Humanoid Robots Workshop, IEEE Humanoids' 08, 2008年12月2日, 韓国・大田市
- ⑥ 原田 篤, 鈴木 健嗣: 人間型ロボットによる環境変化に応じた作業空間の構築と動作計画, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008 (ROBOMECH 2008), 2008年6月6日, 長野県

[図書] (計2件)

- ① 鈴木 健嗣 (分担執筆): ロボット情報学ハンドブック (6.7 ロボットの行為選択), ナノオプトニクスエナジー, 2010.
- ② 鈴木 健嗣: 次世代センサハンドブック (第II編第12章 12.5 力覚センサ), 培風館, 2008.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鈴木 健嗣 (KENJI SUZUKI)

筑波大学・大学院システム情報工学研究科・講師

研究者番号: 30350474

### (2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者 なし