

---

# 動的環境下における知的エージェント集団の 創発的知能の開発

---

－ 日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)(2) －  
平成14, 15, 16年度報告, 課題番号: 14350209

平成17年6月

研究代表者 平田 廣則

(千葉大学大学院自然科学研究科)

# 動的環境下における知的エージェント集団の創発的知能の開発

## 平成14～16年度科学研究費（基盤研究(B)(2)）

研究成果報告書 課題番号: 14350209

### はしがき

本研究報告書は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)「動的環境下における知的エージェント集団の創発的知能の開発」平成14年度、15年度、16年度の研究成果をまとめたものである。

**研究の概要** 本研究は、動的な環境下で知的エージェント集団が行動するための知能を創発的に構築する手法を開発する。従来の学習法が学習効率化のための単純化に起因して対象問題（環境）のわずかな変動に対して追従不可能になる欠点を克服する新たな自律分散型学習理論を研究する。特に、学習主体者（エージェント）のミクロな振る舞いが、集団のマクロな統一性を創発する機構を解明し、これを自律移動系ロボットの制御に応用する。

**研究の目的と有用性** 知的エージェントが動的環境下で自律的な行動を獲得するための、自律分散機構を中心とした新たな創発的学習手法を開発する。この手法を用いた具体的応用例として、自律・協調・協同行動を発現する知的車椅子を開発する。さらに、同様の自律移動・集団協調学習が必要とされるITS(Intelligent Transport System)やMCE(Multi-car Elevator)等のインテリジェントシステムへの応用を検討する。このように本研究は、近未来の知能社会システムを支える基盤技術を開発し、その応用例を示すことを目的としており、工学的に有用な試みといえる。

**研究の独創性** 本研究の最も独創的な部分は、高精度の計測と計算を前提とする従来の制御方式を用いず、実センサーの精度と制約のある環境との相互作用を用いて、生物に近い環境反応適応型の創発的知能を実現しようとする点にある。

以下にこれらの研究成果を関連結果とともに報告する。

**研究組織** 研究代表者: 平田 廣則(千葉大学・大学院自然科学研究科 教授)  
須貝 康雄(千葉大学・工学部助教授(H.16.4 から同 教授))  
小坪 成一(千葉大学・大学院自然科学研究科 助教授)  
濱上 知樹(千葉大学・大学院自然科学研究科助手(H15.3 まで)  
(現在 横浜国立大学・大学院工学研究院助教授))

**研究経費** 平成14年: 9,900千円  
平成15年: 4,800千円  
平成16年: 1,800千円  
(合計) 16,500千円

# 1 研究成果

本研究は、「動的環境下における知的エージェント集団の創発的知能の開発」というテーマのもと、理論構築から応用展開まで、シミュレーション検証から実機検討までをそれぞれ網羅する4つの研究領域を相補的に進めることにより、包括的かつ実践的な研究成果を得ることができた(図1)。

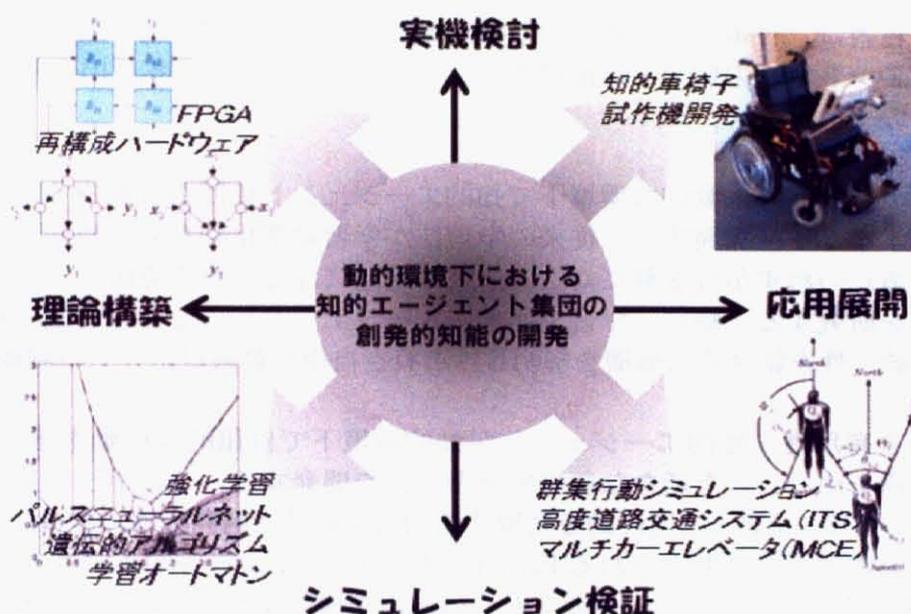


図1: 「動的環境下における知的エージェント集団の創発的知能の開発」の展開

本研究の中心的成果である「知的車椅子の開発研究」では、市販の電動車椅子をベースにした試作機を開発した。この試作機の仕様のもとで実現可能な知的振る舞いとして自律・協調・協同行動に注目し、それぞれの行動システムの実現に至った。

群としての振る舞いに注目した本研究は、知的エージェント群によるマクロ行動についても基礎的検討を進めた。「マルチエージェントによる群行動の創発シミュレーション」では、群集の複雑な振る舞いや交通システムを事例に、その制御方法の検討を進めた。

実機・シミュレーションの検討のいずれにおいても、知的エージェント集団が動的環境で適切な振る舞いを得るためには、適応的な学習、進化的なアプローチが必要である。本研究では、「動的環境下における強化学習法、進化手法の開発」をすすめることで、知的車椅子や、マルチエージェントシミュレーションに応用可能な基礎技術の開発を行った。

さらに、近年注目されている進化型ハードウェアを、故障時におけるエージェントの自律的修復機能として利用するために動的再構成システムの検討を行い、ロボットの迷路巡航問題にてその効果を確認するに至った。

以下、各論について詳細をまとめる。

## 1. 知的車椅子の開発研究

自律・協調・協同行動を獲得する知的車椅子試作機を作成した。ここで自律行動とは、障害物回避や定型の行動をとる機能である。協調行動とは、複数の車椅子同士の群としての振る舞いである。さらに協同行動とは、利用者および他の機器と連携しあい、簡便な操作や新たな機能を実現することである。

本研究では、これらの諸機能を実現する知的構造を開発し、さらにサブサンクションアーキテクチャにより諸機能を統合する方法を採用した。さらに、知的機構の研究に必要な専用シミュレータを開発し、ネットワークを介してエージェントが実機あるいはシミュレータクライアントを操作する環境を構築した。

本研究で実現した知的システムは以下の通りである。

- 実数値 GA により進化するニューラルネットワークを用いて、障害物回避行動を獲得した。
- 単純なスカラパラメータ（フラストレーションコスト）の通信と、GP により進化させた行動決定木により、単純なセンサ構成に起因するデッドロック状態を回避する協調行動を獲得した。
- シミュレータと実機の誤差をオンライン学習を進めながら共進化プロセスで修正することで、高い精度のシミュレーション実験を可能にした。

その他、単眼カメラによる撮像画像とタッチパネルを用いた移動指示インタフェースや、非接触 IC タグを用いた環境情報の取得機能を試作機に実装し、利用者や他のシステムとの協同行動の実現を可能にした。

## 2. マルチエージェントによる群行動の創発シミュレーション

多数の自律的主体が群として振舞うときの制御方法について、群集行動、ITS(Intelligent Transportation System), MCE(Multi-Car Elevator) を事例に、シミュレーションによる解析・方法の検討を行った。

群集行動シミュレーションにおいては、セルラオートマトンを環境とするマルチエージェントシステムを開発した。本システムの開発にあたり、汎用のマルチエージェントシミュレーションパターンをフレームワークとして実現した。群集行動シミュレーションの結果、エージェントのミクロな特徴、特に、エージェント同士の多様性と、行動決定に必要な情報空間の大きさが、群であるマクロ現象の組織化と密接な関係があることが明らかになった。

実時間制御が要求される交通システムへの応用に対しては、研究代表者が発案した学習オートマトンの応用を図った。実応用をターゲットにした際問題となる2つの要求、すなわち、収束速度の向上と協調動作の獲得を実現するために複数環境学習オートマトン(LA) ネットワークと LA 集団モデルを考案した。ITS と MCE の2つのシミュレーションにて考案手法を応用し、その効果を確認するに至った。

### 3. 動的環境下における強化学習法，進化手法の開発

エージェントが動的環境に適応するために必要な，機械学習，進化的手法の基礎的検討をおこなった。

まず，不完全知覚問題によって生じる「知覚のみなし (perceptual aliasing)」に対し，「誘因価値」という新たな価値関数を導入し，時系列の変化に対する価値を学習に組み込む手法を提案した。

また，環境の変化に応じて適応的に状態空間を分割することで，状態数の爆発を防ぎ，効率的な学習が可能な手法を提案した。

さらに，離散センサ空間の次元が変化した場合に，過去の学習結果を再利用するための手段として，ロボットのスポットターンから得られるセンサパターンを保持する状態空間構成法を開発し，知的車椅子にてその効果を確認した。

### 4. 動的再構成システムの検討

ハードウェア故障の際，動的にシステムを再構成し，目的の動作を継続するための進化ハードウェアについて検討を行った。特にブロック構造型ニューラルネットワークを用い，再利用を進めるための構成法を開発した。

## 2 研究成果を記した論文・発表等

### 学会論文誌等

- [1] 濱上知樹，小坏成一，平田廣則：“誘因価値に基づいて行動選択確率が変化する強化学習法”，電気学会論文誌 C，Vol.122，No.12，pp.2157-2164 (2002-12)
- [2] 須田祐，濱上知樹，小坏成一，平田廣則：“経験的知識に基づく遺伝子操作を導入した GA による効率的なモジュール構造型ロボットの迷路巡航学習”，電気学会論文誌 C，Vol.123，No.1，pp.138-143 (2003-1)
- [3] 松田泰明，濱上知樹，小坏成一，平田廣則：“フローシステムモデルによる分岐構造形成の計算機シミュレーション”，電気学会論文誌 C，Vol.123，No.3，pp.585-590 (2003-3)
- [4] 濱上知樹，平田廣則：“マルチエージェントシステムにおけるデザインパターンを用いたフレームワークの設計”，電気学会論文誌 C，Vol.123，No.4，pp.699-706 (2003-4)
- [5] 元木誠，濱上知樹，小坏成一，平田廣則：“パルスニューラルネットワークにおける破局的な忘却の抑制を考慮したヘブ型学習則”，電気学会論文誌 C，Vol.123，No.6，pp.1124-1133 (2003-6)
- [6] 白石和章，濱上知樹，小坏成一，平田廣則：“複数環境学習オートマトンネットワークによる ITS 自律走行制御”，電気学会論文誌 C，Vol.123，No.7，pp.1285-1291 (2003-7)

- [7] 濱上知樹, 小坏成一, 平田廣則: “適応的な状態分割を行う Q-learning における状態数の調整方法”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J86-D-I, No.7, pp.490-499 (2003-7)
- [8] 濱上知樹, 平田廣則: “知的車椅子における環境適応のための状態空間の構成法”, 電気学会論文誌 D, Vol.123, No.10, pp.1118-1124 (2003-10)
- [9] 阿部秀樹, 濱上知樹, 小坏成一, 平田廣則: “ティーチングと Q 学習を併用した知的車椅子の自律走行”, 電気学会論文誌 D, Vol.123, No.11, pp.1384-1385 (2003-11)
- [10] 濱上知樹, 平田廣則: “セル上に配置されたマルチエージェントによる群集流のシミュレーション”, 電気学会論文誌 C, Vol.123, No.11, pp.2028-2035 (2003-11)
- [11] 高森真仁, 小坏成一, 濱上知樹, 平田廣則: “故障を考慮したブロック構造ニューラルネットワークの進化的構築”, 電気学会論文誌 C, Vol.124, No.4, pp.1004-1011 (2004-4)
- [12] 白石和章, 濱上知樹, 平田廣則: “学習オートマトンによるマルチカーエレベータ制御”, 電気学会論文誌 D, Vol.125, No.1, pp.91-98 (2005-1)
- [13] 今井誠, 川戸康司, 濱上知樹, 平田廣則: “知的車椅子のための進化型シミュレータと行動統括機構の開発”, 電気学会論文誌 D, Vol.125, No.1, pp.67-75 (2005-1)

## 国際会議等

- [1] Tomoki Hamagami, Seiichi Koakutsu, and Hironori Hirata, “Reinforcement Learning to Compensate for Perceptual Aliasing Using Dynamic Additional Parameter: Motivational Value”, Proc. of IEEE Int’ Conf on SMC2002 CD-ROM MP1F1 (2002)
- [2] Tomoki Hamagami and Hironori Hirata, “An Adjustment Method of the Number of States on Q-Learning Segmenting State Space Adaptively” Proc. of IEEE Int’ Conf on SMC pp.3062-3067(2003)
- [3] Tomoki Hamagami and Hironori Hirata, “Method of crowd simulation by using multi-agent on cellular automata”, Proc. of IEEE/WIC Int’ Conf. IAT pp.46-52 (2003)
- [4] Tomoki Hamagami and Hironori Hirata, “Development of Intelligent Wheelchair Acquiring Autonomous, Cooperative, and Collaborative Behavior”, Proc. of IEEE Int’ Conf on SMC2004 pp.3525-3530 (2004)

## 口頭発表

- [1] 川戸康司, 濱上知樹, 小坏成一, 平田廣則: “知的車椅子における自律走行のための障害物回避モジュールの設計”, 平成 14 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.922-923 (2002-9)

- [2] 川戸康司, 濱上知樹, 小坏成一, 平田廣則: “サブサンクション・アーキテクチャによる知的車椅子の行動制御機構”, 平成 15 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.965-968 (2003-8)
- [3] 今井誠, 濱上知樹, 小坏成一, 平田廣則: “知的車椅子における実環境との並列動作によるシミュレータの進化的構築”, 平成 15 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.974-977 (2003-8)
- [4] 山田学, 濱上知樹, 小坏成一, 平田廣則: “実数値遺伝的アルゴリズムを用いた知的車椅子の障害物回避行動の獲得”, 平成 15 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.1020-1023 (2003-8)
- [5] 小佐野智之, 濱上知樹, 小坏成一, 平田廣則: “知的車椅子群の遺伝的プログラミングによるフラストレーションコストを用いた協調行動の獲得”, 平成 15 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.1136-1139 (2003-8)
- [6] 濱上知樹, 平田廣則: “自律・協調・協同行動を獲得する知的車椅子の開発”, 平成 15 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.458-463 (2003-8)
- [7] 小佐野智之, 濱上知樹, 小坏成一, 平田廣則: “知的車椅子におけるフラストレーションコストを用いた協調行動の獲得”, 平成 16 年度電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.970-974 (2004-9)
- [8] 山田 学, 濱上知樹, 小坏成一, 平田廣則: “隠れマルコフモデルを用いた知的車椅子の自律的障害物回避行動の獲得”, 平成 16 年度電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.975-978 (2004-9)
- [9] 濱上知樹, 平田廣則: “知的車椅子エージェントにおける効率的な学習のための空間情報の構成法”, 第 47 回自動制御連合講演会 (CD-ROM)(2004-11)
- [10] 宮崎直樹, 濱上知樹, 小坏成一, 平田廣則: “IC タグを用いた知的車椅子における環境情報取得システム”, 第 47 回自動制御連合講演会 (CD-ROM)(2004-11)
- [11] 吉野知也, 濱上知樹, 小坏成一, 平田廣則: “単眼視覚画像を用いた知的車椅子の操作支援システム”, 第 47 回自動制御連合講演会 (CD-ROM)(2004-11)