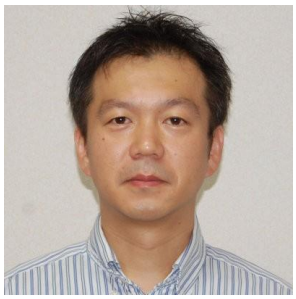
動的環境下における知覚-行動系の柔軟なタイミング制御法

Adaptive Timing Control of Perception-Action Systems under Dynamic Environments



川嶋 宏彰 (Hiroaki KAWASHIMA, Ph. D.)

京都大学 情報学研究科 准教授 / JST さきがけ研究員

(Associate Professor, Graduate School of Informatics, Kyoto University / JST, PRESTO Researcher)

電子情報通信学会　情報処理学会　ヒューマンインタフェース学会　人工知能学会　IEEE

受賞：FIT ベストペーパー賞 (2004)　船井ベストペーパー賞 (2005)　FIT ヤングリサーチャー賞 (2007)

研究専門分野：パターン認識　マンマシンインタラクション　マルチエージェント制御

あらまし　家庭用ロボットや対話システムなどの知能システムは、研究から実生活での利用段階へと急速に移行している。これを非定常な雑音や周囲の状況変化、人との相互作用といった日常の動的環境下にいかに対応させていくかが、今後の重要な課題となる。そこで本研究は、動的環境下における知覚-行動系の「協調的かつ柔軟なタイミング制御法」を開発することを目的し、これを動的システムと離散事象系との混在系である、ハイブリッドシステムと呼ばれる数理モデルに基づいて実現することを目指している。さらに、人に対して適切なタイミングで対話的な情報提示や推薦などの働きかけを行うには、人の興味や意図といった心的状態の推定が重要となり、その基礎的検討を合わせて行っている。本稿では、SCAT 研究助成で行った研究とその周辺の取り組みについて紹介する。

１．研究の目的

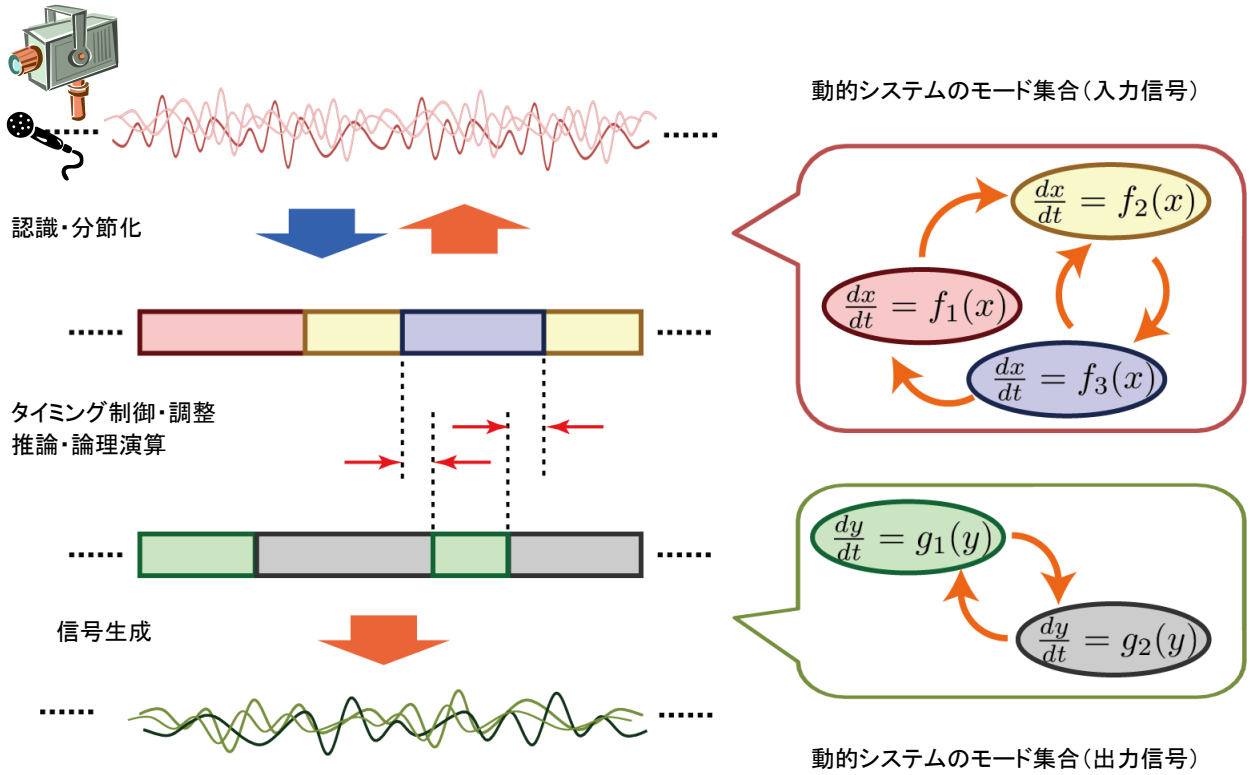
対話システムやロボット、さらには家庭内のエネルギーマネジメントシステムなど、知能システムは様々な形で我々の生活に入り込んで来ている。知能システムの知覚-行動系は、マイクロフォンやカメラをはじめとする各種センサで計測して得られた観測信号に対し、どのような制御信号を生成すべきかという問題を扱う。このとき、環境の変化に対し適応的に行動・応答を行うために、動力学計算や信号変換といった実信号レベルでの処理と、推論や情報統合といった記号レベルでの処理とを結ぶ方法がとられてきた。しかし、物との接触、人からの呼びかけといった突発的イベントの発生が頻繁に起こる日常状況では、各レベルの処理を個別的に行った上で単に結び付ける方法では限界があり、これが既存の知能システムのぎこちなさを生んでいると考えられる。実信号レベルでの処理と記号レベルでの処理を有機的に統合する新たなアプローチが求められている。

そこで本研究は、動的環境下における知能システムの「協調的かつ柔軟なタイミング制御機構」の開発を目的とし、これをハイブリッドシステムと呼ばれる数理モデルを通じて統一的に実現することを目指している。本枠組みでは、動作や発話といった人や知能システムが行う複雑な行動は、複数の要素的な行動や運動モードの組み合わせであると仮定する。そして、これらのモードをそれぞれ単純な動的システム（微分方程式や差分方程式で表される状態空間モデル*1）でモデル化しておき、それらモードの切り替えタイミングを適切に制御することで、動作やターンテイキングのタイミング制御が可能になると考える（図 1）。このように、信号レベルの処理を扱うことのできる動的システムを複数用意し、その時間的切り替わりや相互作用機構を導入することで、記号と信号の両レベルの処理を結びつけたまま、外界の変化に応じた柔軟かつ滑らかな行動制御を実現できると期待できる。

本稿では、ハイブリッドシステムの一つである線形動的システム（以下、線形システム）のモード切り替え系の学習・制御法や、複数のエージェント*2間の協調制御法について紹介するとともに、人同士の対話における興味や意図を扱うための心的・内的状態の学習法に関する研究を紹介する。

動的環境下における知覚-行動系の柔軟なタイミング制御法

Adaptive Timing Control of Perception-Action Systems under Dynamic Environments



センサより観測された信号を認識するモジュールと、制御信号生成モジュールがそれぞれハイブリッドシステム（モード切り替え系）でモデル化され、認識結果に対するタイミング制御が実現される。

図１　ハイブリッドシステムによるタイミング制御・調整の枠組み

２．研究の背景

ロボットの行動生成において制御タイミングが重要となることが、等身大ロボット起き上がりといったダイナミックな行動におけるタイミングの分析で調べられている[1]。また、音声対話では、人の発話の交替潜時や相槌タイミングの分析が行われており、この知見を対話システムやロボットの相槌や話者交替、頷きタイミングの生成に用いる研究がある（たとえば、文献[2]など）。

微分方程式で表される動的システムとオートマトンをはじめとした離散事象系が混在する系は、ハイブリッドシステム（もしくはハイブリッドダイナミカルシステム）と呼ばれ、特に制御理論の分野では、1990年代前後から数多くの理論的な研究が行われている。応用分野も広く、コンピュータビジョンの分野における関連研究の初期のものとしては、人の歩行・走行認識にハイブリッドシステムを用いた研究などが挙げられる[3]。また、ロボットの行動生成に関しては、たとえば文献[4]などがある。これらの先行研究に対し本研究は、知覚系と行動系をそれぞれハイブリッドシステムとしてモデル化したうえで、知覚-行動系のタイミン

グ制御やマルチエージェント間の協調制御を、複数のハイブリッドシステム間の相互作用として実現しようとする点に特徴がある。

ハイブリッドシステムのタイミング制御を扱う研究としては、ジョージア工科大学のグループが 2000 年代前半から行っているものがあり、複数のマリオネットロボット間で動作タイミングを協調させるといった応用も行われている[5]。ハイブリッドシステムのタイミング制御は、他の様々な分野への適用も考えられ、その一つとして、DC-DC コンバータのデューティー比の動的制御などが挙げられる[6]。

３．研究の方法

本研究では、(1)ハイブリッドシステムの学習とタイミング制御、(2)マルチエージェントの協調制御、(3) 対話システムのためのユーザの心的状態空間の学習の、三つのトピックについて検討を行った。(1)については、センサから得られた信号より、上述のハイブリッドシステムの数理モデルを学習する方法、および得られたハイブリッドシステムを用いてモード切り替えのタイミング制御を行う方法について述べる（3.1 節）。(2)では、移動ロボットなどの複数エージェント群を人が制御する群制御の状況において、人の操作入力を効率よく各エージェントに伝搬させるための指標を提案する（3.2 節）。(3)では、対話的にユーザに推薦を行う状況において、適切なタイミングでの情報提示を実現するために、ユーザの興味状態の空間を学習し、興味を推定する方法について述べる（3.3 節）。

３．１ ハイブリッドシステムの学習とタイミング制御法

二足歩行ロボットの歩行動作をハイブリッドシステムによって学習するとともに、そのモード切り替えのタイミングを最適制御する手法について、二次元シミュレータを用いて検討を行った。

結合振動子から生成されたトルク信号に基づいて、二足歩行動作を生成できることが Taga らによって示されている[7]。しかし、人は一連の歩行動作において、右足を前に出す、接地するといったフェーズを感じており、しばしば意識的にタイミングをずらすことができる。そこで、この結合振動子の内部状態系列をモード（線形システム）の切り替わりとしてモデル化し、記号系列として扱うことを試みた。すなわち、始めは結合振動子から生成される歩行動作によってロボットは歩行を行うが、学習後は同様のトルク信号を獲得したモードの内部モデルに基づいて生成することができる。

具体的学習手法としては、始めに結合振動子の内部状態系列を細かな区間に分節化し、各区間からそれぞれ異なる線形システムを同定(モデル推定)しておく。そして、類似する線形システムを順に併合するような階層的クラスタリングを行うことで、適切な数の線形システムを得る。すると、各線形システムは動作のプリミティブを表すようなモードを表現することになる。図 2（左）は、クラスタリングによって得られたモードの遷移パターンを、図 2（右）は、学習されたハイブリッドシステムから生成した時系列信号を表しており、モード数 N を 6 程度とすることで、結合振動子の生成する内部状態系列と類似した信号となり、ハイブリッドシステムを用いても歩行動作が実現できることを確認した。また、これまでに提案していた学習法[8]では、少数の学習データに対応するために、手動で各モードの制約の強さ調整する必要があったが、本手法では、ベイズ推定*3 の枠組みを用いて制約の自動調整機能を実現した。

さらに、外部からの信号に対して同期を取るといった、モードの切り替わりタイミングの最適モデル予測制御について検討を行い、複数のモードの切り替わりタイミングをあらかじめ少数の制御パラメタで表現し、そのパラメタを最適化する方法を考案した。詳細な評価は今後の課題であるが、本研究は、普段は無意識的に歩行しているが、つまずきといった外部刺激に対しては、足を振り下ろすタイミングを意識的にずらす、といった柔軟なタイミング制御につながる可能性があり、ロボットの歩行に限らず一般の知能システムの行動生成においても、外界のイベントを認識しながら柔軟にタイミング制御を行うための基盤技術となりうる。

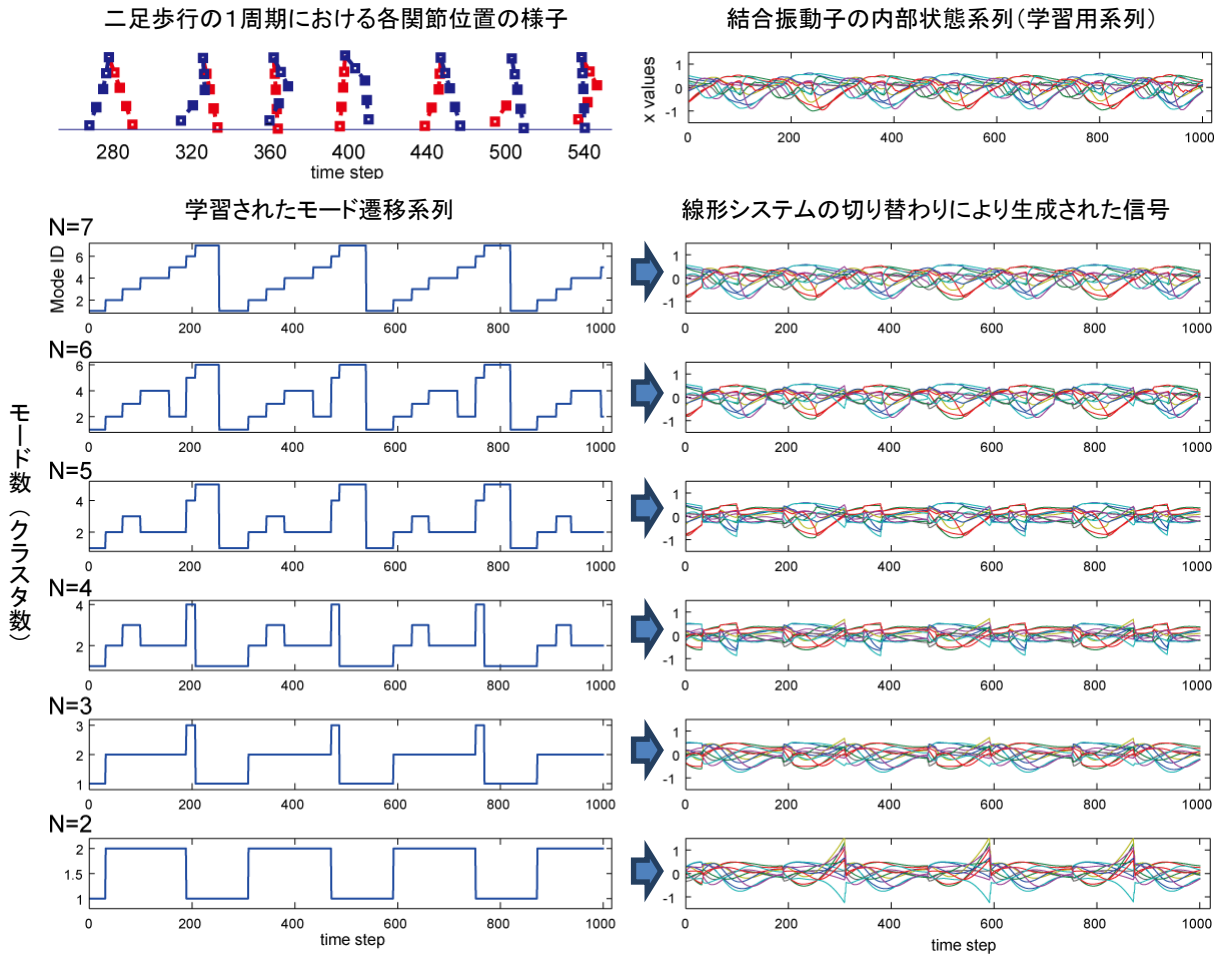


図２　線形動的システムの階層的クラスタリング

３．２ マルチエージェントの協調制御

マルチエージェントの協調制御については、移動ロボットの群制御に関する研究、および複数のエージェント間の協調的タイミング調整に関する研究を行った。

たとえば、災害等の場面で人が複数の移動ロボット群を操作することを想定した際、一部の個体を操作してロボット群全体を制御するという「群制御」が考えられる。このとき、各移動ロボットには周囲の他のロボットの位置に応じた適切な制御則を与えておくことで、全体としては自律的にフォーメーション制御などを行うことができる（図 3）[9]。このロボット群全体を誘導するといった場面において、人から与えられた操作入力を群全体に最適に伝搬させるには、人の操作情報（どのロボットを操作するか、もしくは操作方向等）に基づいて、各ロボット同士が結合トポロジ（ど

のロボットがどのロボットの位置情報を用いるか)や、結合強度（周囲のロボットの位置情報をどれだけ用いるか）を適応的に変更することが考えられる*4。そこで、どのような結合方式が人からの入力を効率よく群全体に伝搬させるかを調べるための指標として、移動ロボット群の「応答性（responsiveness)」および「可操作性（manipulability)」を提案し[10]、ロボット同士の結合方式の最適化に用いることができることを示した（図 4)。

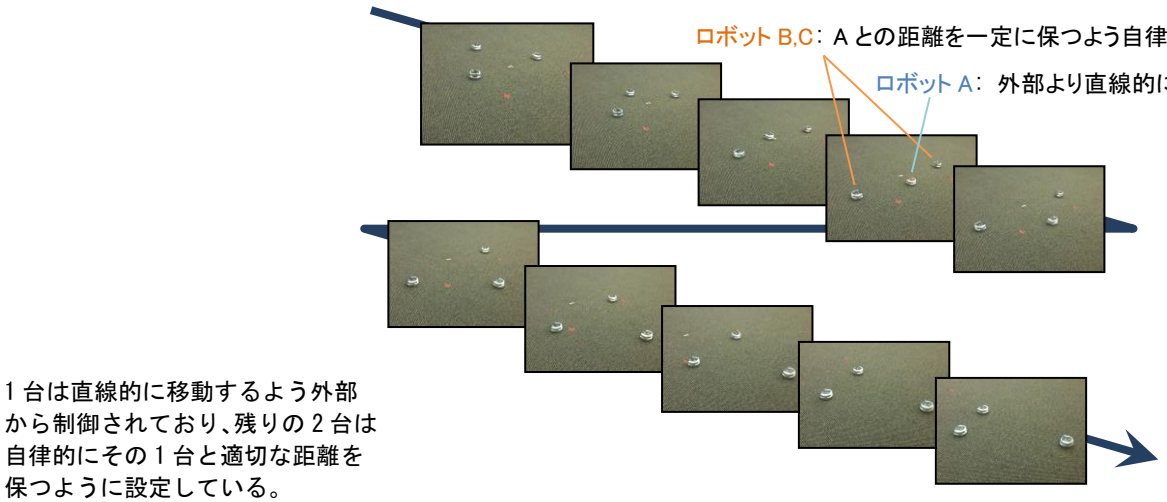
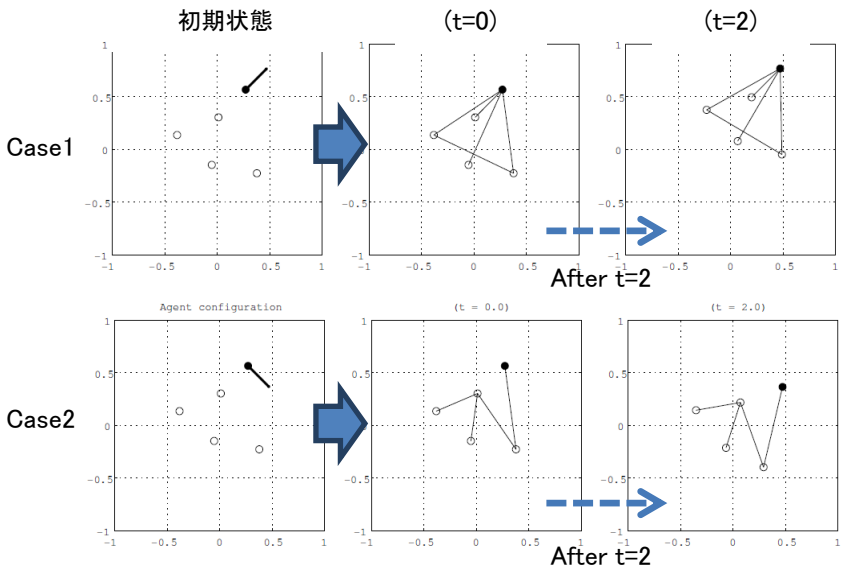


図３　ロボットの群制御の例



自律的にフォーメーションを維持する移動ロボット群(白丸)に対し、外部から制御できるロボットを導入（黒丸）。
その操作方向（左図、黒丸から延びる線分方向)に合わせて自律ロボット間の情報伝達ネットワークが自動構築され（中央）、外部からの操作入力を効率化的に群全体に伝搬する（右図）。

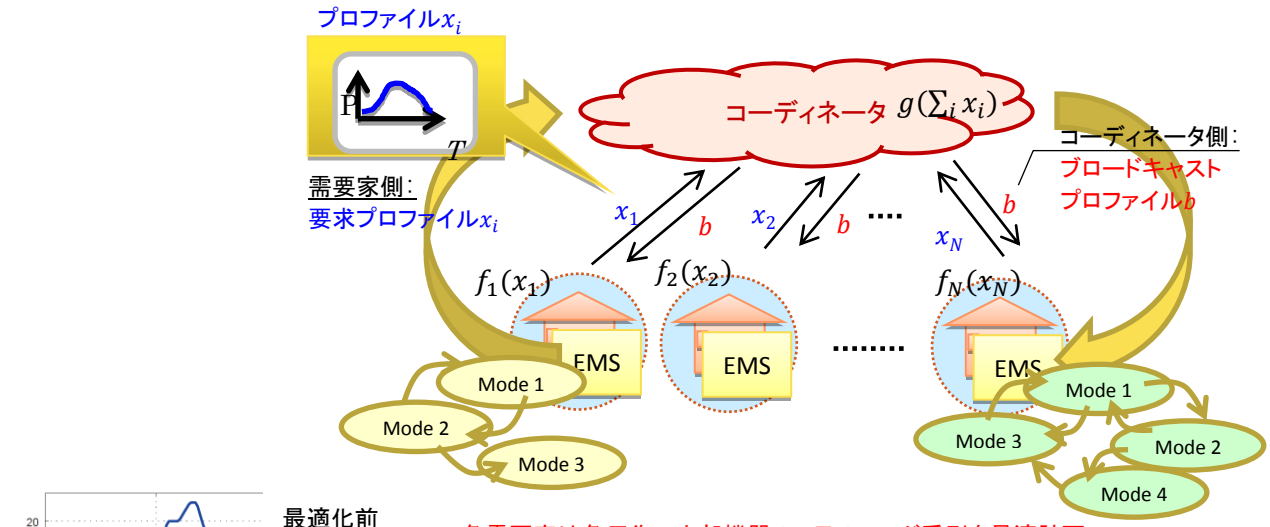
図４　群制御におけるトポロジ最適化（シミュレーション）

動的環境下における知覚-行動系の柔軟なタイミング制御法

Adaptive Timing Control of Perception-Action Systems under Dynamic Environments

マルチエージェントの協調制御に関するもう一つのテーマとして、エージェント同士がタイミングを調整し合うためのメカニズムについて検討を行った。対話や物の受け渡しでは、互いの状態を推定しながら、各人が発話開始・終了や力を加えるタイミングを協調させるといった共同行為を行っている。本研究は、共同行為におけるこの協調機構をモデル化しようとするものである。まず、各エージェントをそれぞれハイブリッドシステムなどのモード切り替え系としてモデル化し、それらを結合させた系を考える。このとき、各エージェントが最適にタイミング調整を行うことで、たとえば、円滑なインタラクションを続ける、スムーズにものを受け渡すといった目的を達成しようとする。本研究では、この基礎的検討として、個々のエージェントがそれぞれ独自の「目的」(特定のタイミングでモード遷移を行いたいなど) を持ち、一方で、エージェント群全体ではインタラクションの共通目的 (それぞれの生成する信号が干渉しないなど) を持つような状況を考える。そして、分散最適化[11]の枠組みによって、各エージェントが個別の目的と全体の目的をすり合わせながら、モード切り替えの最適タイミング制御を行うアルゴリズムを開発した。

具体的な音声対話システム等における評価は、ターンテイキングや相槌生成などの課題を通じて今後行っていく予定であるが、本研究の考え方をそのまま需要家の分散エネルギーマネジメントに応用することができる。まず、各需要家のエネルギーマネジメントシステムが、それぞれの需要家内での電力使用に関するモードを持つものとする。つまり、各需要家は希望の電力使用パターンをモードの切り替えによって表現しておく。すると、異なる需要家間で互いにモード切り替えタイミングを協調させ、可能な範囲で融通しあうことで、需要家全体の電力使用ピークを削減するといった目的を達成することができる (図 5) [12][13]。



1 日の電力使用計画プロファイル (全需要家の総電力 [kW])

コーディネータのローカル価格情報bの更新と、それに基づく各需要家の電力使用プロファイル (事前計画) の更新が反復的に行われ、全体としてのピークカットを実現する (左図の青線)。

図５　需要家の電力使用タイミングの分散最適化 (シミュレーション)

３．３ 対話システムのためのユーザの心的状態空間の学習

人に適切なタイミングで情報を提示するようなエージェントの実現を目指す場合、インタラクションにおける「目的」の一つは、対話者間における互いの信念の共有となる。たとえば、相手の興味状態をシステムがうまく聞き出して共有できれば、適切な情報の推薦を適切なタイミングで行うことができる。ところが、興味をはじめとする心的・内的状態の表現法については、しばしば確立した手法がない。そこで本研究では、複数の選択肢からなるコンテンツをユーザに提示し、そのときの視線の振る舞いを解析することで、ユーザの興味の状態空間を視線データからボトムアップに学習する手法を考案した [14][15]。

コンテンツ閲覧時のユーザの視線データを知識ベースとともに用いることで、ユーザがコンテンツを「どのような視点から眺めているか」に関して、複数の興味の軸（本研究では、これをアスペクトと呼ぶ）を学習し、これらの軸で張られる空間によってユーザの興味状態を表現することができる。また、観測された視線から、興味を推定することも可能となる。さらに、コンテンツ閲覧時のユーザの興味は時々刻々と変化するため、この変化をとらえることで、ユーザの興味主導で見比べを行っているのか、それとも、コンテンツのデザインに影響されているのか、さらには、この割合が閲覧と選択を行う過程でどのように移り変わるかを推定する方法についても検討を行った。今後は、この状態推定を発展させ、ユーザの興味に基づいた適応的な働きかけを行うシステムの構築を目指す。

４．将来展望

運動レベルでのタイミング制御の実現方法から、マルチエージェントの枠組みでの協調制御、さらには、適切なタイミングでの働きかけを行うための人の心的状態の表現・推定法について、特に、数理モデルとしての実現方法に焦点を当てて検討を行ってきた。今後は、本研究で得られた知見を実際の対話システムやロボットへ実装し、応用展開を図っていく予定である。時間感覚を共有しながら、人と「間の合った」インタラクションが可能な知能システムの実現は、今後重要になると予想され、個別学習やカウンセリングにおける対峙感覚が得られる対話システムなど、様々な適用分野が考えられる。一方で、群制御の研究は、自律移動ロボットや無人飛行機、ドローンなどを中心に行われているが、魚や鳥、昆虫といった生物群を制御するようなロボットの実現も、非常に興味深い研究テーマである。本研究を発展させることで、これらの基盤技術につながればと考えている。

用語解説

*1 状態がベクトルの形で表され、その時間発展が微分・差分方程式系で表されるようなモデル。ただし本研究では、（カルマンフィルタと同様にガウス・マルコフ過程を仮定した）線形動的システムを各モードのモデルとする。

*2 ここでエージェントとは、人や対話システム、ロボットなど、インタラクションの主体という広い意味で用いている。

*3 モデルのパラメタ推定手法の一つであり、モデルパラメタの事前分布を仮定するとともに、推定結果もパラメタの事後確率分布の形で得る。

*4 結合トポロジの変化が生じる場合、群全体はハイブリッドシステムとなる。

参考文献

[1] 國吉康夫, 大村吉幸, 寺田耕志, 長久保晶彦. 等身大ヒューマノイドロボットによるダイナミック起き上がり行動の実現. 日本ロボット学会誌, Vol.23, pp.706-717, 2005.

[2] N. Kitaoka, M. Takeuchi, R. Nishimura, S. Nakagawa. Response Timing Detection Using Prosodic and Linguistic Information for Human-friendly Spoken Dialog Systems. Vol.20, No.3, pp.220-228, 2005.

[3] C. Bregler. Learning and Recognizing Human Dynamics in Video Sequences. International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.568-574, 1997.

[4] Y. Tazaki & J. Imura. Planar bipedal locomotion control based on state discretization. Robotics and Autonomous Systems, Vol.58, No.5, pp.657-665. 2010.

[5] P. Martin & M. Egerstedt. Optimal Timing Control of Interconnected, Switched Systems with Applications to Robotics Marionettes. Journal of Discrete Event Dynamic Systems, Vol. 20, No. 2, pp. 233-248, 2010.

[6] H. Kawashima, Y. Wardi, D. Taylor, & M. Egerstedt. Optimal Switching Control of a Step-Down DC-DC Converter. American Control Conference, pp.1454-1459, 2012.

[7] G. Taga, Y. Yamaguchi, & H. Shimizu, Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment. Biological Cybernetics, Vol.65, No.3, pp.147–159, 1991.

[8] 川嶋宏彰, 松山隆司. ハイブリッドダイナミカルシステムによる動的事象のモデル化と認識. システム/制御/情報, Vol.54, No.1, pp.28-33, 2010.

[9] H. Kawashima and M. Egerstedt. Manipulability of Leader-Follower Networks with the Rigid-Link Approximation. Automatica, Vol.50, pp.695-706, 2014.

[10] H. Kawashima, G. Zhu, J. Hu, & M. Egerstedt. Responsiveness and Manipulability of Formations of Multi-Robot Networks. IEEE Conference on Decision and Control, pp. 4622-4628, 2012.

[11] S. Boyd, N. Parikh, E. Chu, & J. Eckstein. Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers. Foundations and Trends in Machine Learning, Vol.3, No.1, pp.1–122, 2010.

[12] 川嶋宏彰. 需要家間連携のための分散モードスケジューリング. システム制御情報学会研究発表講演会予稿集, pp.54-58, 2014.

[13] R. Verschae, H. Kawashima, T. Kato, & T. Matsuyama. Coordinated Energy Management for Inter-Community Imbalance Minimization. Renewable Energy, 2015 (accepted)

[14] K. Shimonishi, H. Kawashima, R. Yonetani, E. Ishikawa, & T. Matsuyama. Learning Aspects of Interest from Gaze. Workshop on Eye Gaze in Intelligent Human Machine Interaction (GazeIn'13), pp.41-43, 2013.

[15] 下西慶, 石川惠理奈, 米谷竜, 川嶋宏彰, 松山隆司. 視線運動解析による興味アスペクトの推定. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.16, No.2, pp.103-114, 2014.

この研究は、平成２３年度ＳＣＡＴ研究助成の対象として採用され、平成２４～２６年度に実施されたものです。