

「『多様化するヒューマンインタフェースと高次インタラクション』特集号」解説
 ユーザ-システム間の適応のための
 ヒューマンコンピュータインタラクションのデザイン

山田 誠二[†]・角所 考[‡]

1. はじめに

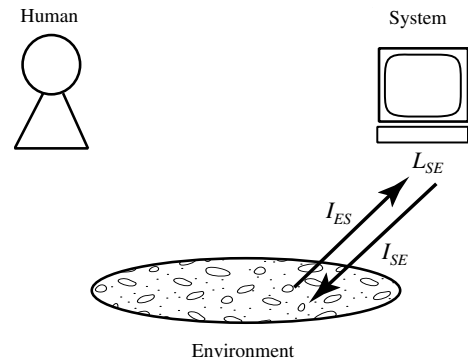
計算機やロボット, エージェントを含む情報システムと人間とのインタラクション HCI (Human Computer Interaction) では, ユーザからの指示の理解, それに基づくタスクの実現, ユーザへの結果の提示などのシステム側の処理に対して, ユーザがシステムに期待する処理が, ユーザ個人の主観, 選好, 経験に依存する場合が多い. 例えば, 計算機のユーザインタフェースとしてアイコンの直接操作とコマンド入力の違いが使いやすいかは, ユーザの計算機への熟練度等によって異なる. このことから, システム側の処理の内容を, HCIの過程を通じて, ユーザの主観に合ったものに適応させることが望ましく, そのための様々な適応インタフェースが研究されている.

一方, 人間は高度な適応能力を有し, 対象に不可避免的に適応する傾向があるため, HCIにおいても, 意識するしないに関わらず, ユーザはシステムに適応するという現象が起きる. ユーザは, 携帯電話や計算機を使っているうちに, メニュー階層のどこにどのコマンドあるのかを自然に学習するようになるし, 擬人化エージェントを用いたインタフェースでは, 相手があたかも人間であるように, エージェントのモデルを構成し, そのモデルに基づいてエージェントの挙動や表情を理解しようとする.

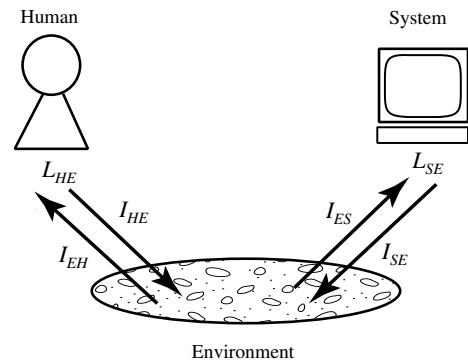
本論文では, このような HCIにおけるユーザ・システム間の適応過程を望ましい結果に導くために, どのようなインタラクションを設計すべきかという観点から, 適応過程を分類・モデル化すると共に, その観点から興味深い関連研究をいくつか紹介しながら, 研究の現状と課題について議論する.

2. タスクとインタラクション

HCI と適応過程との関係には様々なものが考えられるが, 本節で述べるように, それらはいずれも, 人間, シ



(a) 自律的タスク



(b) 対話的タスク

第 1 図 自律的タスク, 対話的タスクにおけるインタラクション

ステム, 環境, それぞれの間でのインタラクションを構成要素としてモデル化できる. 以下では, システム, 人間, 環境間での情報伝達過程を, たとえそれが一方向であっても, 広くインタラクションと呼ぶ.

システムには, 適応するか否かとは関係なく, 本来達成すべきタスクが存在する. タスクは, コンピュータ内で閉じた計算, 自律ロボットの行動のように, 本来システムが人間とのインタラクションを必要とせずに単独で達成できる自律的タスクと, ユーザの問題解決支援や人間同士のコミュニケーション支援などのように, 人間とのインタラクションがタスク達成の前提となる対話的タスクとに大別できる.

2.1 自律的タスク

自律的タスクの典型的な例は, WWW での情報収集

* 国立情報学研究所 National Institute of Informatics; 2-1-2 Hitotsubashi, Chiyoda, Tokyo 101-8430, JAPAN

† 京都大学 学術情報メディアセンター Kyoto University; Nihonmatsu-cho, Yoshida, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, JAPAN

Key Words: User interface, adaptation, human-computer interaction.

システム、自律エージェント、自律ロボットなどである。これらのシステムのタスクは、人間の助けを借りずにシステム自身が環境の情報を獲得し、行動を決定・実行していくことにより遂行される。

自律的タスクでは、システムは、自身の身体や外界などの環境をセンサで観測する一方、その環境に対して物理的、論理的な操作といった行為を加える。このときのシステムと環境の関係は、第 1 図 (a) のようになる。システムを S 、タスクの実行対象となる身体や外界を広義の環境とみなして E とすると、システムが環境から得る観測結果と、環境に加える行為は、 E から S 、 S から E へのインタラクションとして、それぞれ I_{ES} 、 I_{SE} で表現できる。さらに、このような自律タスクとして、システムがユーザの期待する処理を実現できるように、何らかの学習アルゴリズムによって環境に適応する場合、その適応過程を L_{SE} とする。

2.2 対話的タスク

対話的タスクでは、システムと人間との情報伝達を基にタスクが遂行される。例えば、人間による設計作業や人間同士のコミュニケーションを支援するシステムなどがこの対話的タスクを扱うシステムの典型例である。

システムと人間が相手に情報を伝達するには、データ出力やアイコン、テキスト、文字、音声、表情、ジェスチャといった何らかの表現メディアを用いて、情報を一旦人間が知覚できる表現に外化することが必要であり、人間とシステムとの情報伝達は、両者がそれぞれ、情報をこのような表現メディアを用いて外化する一方、その外化結果を観測、解釈することで実現される。

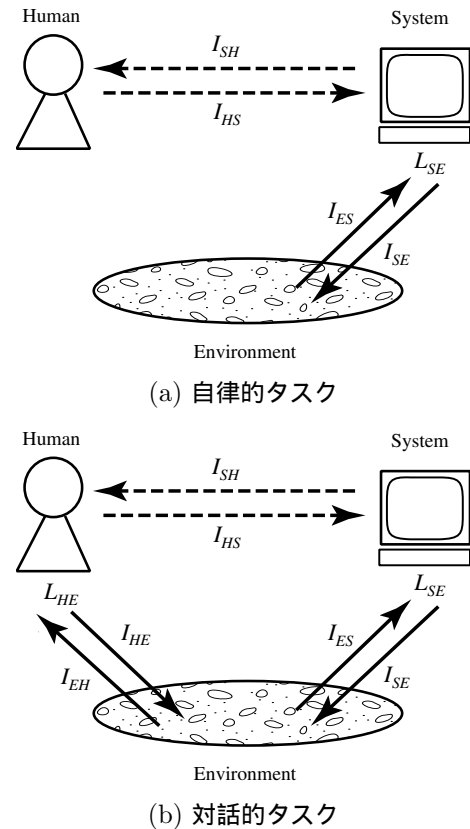
このときの外化された表現メディアを一種の環境とみなして E に含めると、人間 H あるいはシステム S が表現メディアを用いて情報を表現・獲得する過程も、それぞれ E と H 、 S との間のインタラクション I_{EH} 、 I_{HE} 、 I_{ES} 、 I_{SE} で表すことができ、第 1 図 (b) のような関係となる。ここで、 L_{HE} 、 L_{SE} はそれぞれ、このようなタスクを実現する際の人間の環境への適応と、システムの環境への適応を表す。

以上のように、環境の役割を広義に捉えることにより、システムによるタスク実行のためのインタラクションは、自律的タスク、対話的タスクを問わず、環境、人間、システムとの間の 4 つのインタラクション I_{EH} 、 I_{ES} 、 I_{HE} 、 I_{SE} を要素としてモデル化できる。

3. 適応のためのインタラクション

自律タスク、対話的タスク双方において、システムにおける環境への適応 L_{SE} の実現を目指す研究では、従来、システムが環境とのインタラクション I_{SE} 、 I_{ES} のみを通じて自律的に適応することが目標とされてきたが、そのような自律的適応の実現は容易ではない。

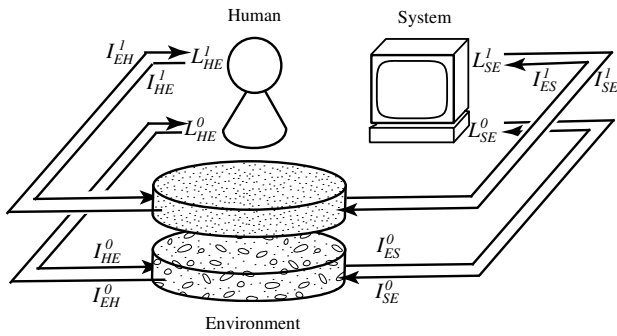
これらの問題を解決するためのもっとも有効かつ現実



第 2 図 適応のための HCI 設計

なアプローチの 1 つとして、人間とシステム間に新たに適応のためのインタラクションを導入し、これを利用して L_{SE} 、 L_{HE} を実現する方法が考えられる。このような、人間とシステムの適応を促進するために新たに導入されたインタラクションにおける、人間からシステム、システムから人間への情報の流れをそれぞれ I_{HS} 、 I_{SH} で表すと、自律的タスク、対話的タスクそれぞれにおける人間、システム、環境の関係は、第 2 図のように表現できる。

この適応のためのインタラクションの導入によって L_{SE} 、 L_{HE} をどの程度効果的、効率的に実現できるかは、 I_{HS} 、 I_{SH} でどのような情報がやりとりされるかによって決まる。なお、より厳密には、 I_{HS} 、 I_{SH} も、やはり何らかの環境を介して実現される必要があり、適応のためのインタラクション I_{HE} 、 I_{EH} 、 I_{SE} 、 I_{ES} と、その実現の際のユーザとシステムによる環境への適応 L_{SE} 、 L_{HE} から構成されることになる。したがって、もしこれが繰り返されれば、適応のためのインタラクションがカスケードに積層し、例えば第 2 図 (b) は、第 3 図のようになる。図ではこの段数を右肩の添字で示している。しかし、本論文のように、 I_{HE}^1 、 I_{EH}^1 、 I_{SE}^1 、 I_{ES}^1 によって L_{SE}^0 、 L_{HE}^0 の促進を目指す場合には、むしろ、 I_{SE}^1 、 L_{HE}^1 が不要で、かつユーザとシステムのコミュニケーションにおいてやり取りされる情報に対する解釈の違いがない、つまり $I_{HE}^1 = I_{ES}^1$ 、 $I_{SE}^1 = I_{EH}^1$ である状況

第3図 I_{HS} と I_{SH} の環境

を実現すべきであるため、以下では、これを簡略化した第2図の構成を元に論を展開していく。

また、 I_{HS} 、 I_{SH} によって L_{SE} 、 L_{HE} を促進できたとしても、その際の人間の負担が大きすぎる場合には、そのようなインタラクションは L_{SE} 、 L_{HE} を実現できるメリットに見合わないものとなることから、 I_{HS} 、 I_{SH} の導入にあたっては、この点も併せて考慮に入れる必要がある。

以上から、システムのタスク実行における人間、システムの適応を実現するには、機械学習としての学習・適応アルゴリズム自体の議論もさることながら、それを実現するためのインタラクション I_{HS} 、 I_{SH} をいかに設計するかがより重要な研究課題となる。我々は、このような I_{HS} 、 I_{SH} の設計問題を、適応のための HCI 設計と呼ぶ。

適応のための HCI 設計のクラスは、タスクが2.の自律的タスク、対話的タスクのいずれであるかにより分類される。また、タスクに対して I_{HS} 、 I_{SH} を設計する際に、それらによって L_{HE} 、 L_{SE} のいずれを促進するかの違いがある。次節では、このような分類に基づき、適応のためのインタラクション設計について、重要と考えられる研究例を示しつつ議論する。

4. 自律的タスクにおける適応の促進

自律的タスクにおける適応のためのインタラクションの枠組みは、第2図(a)のようになる。ここでの適応のための HCI 設計の目的は、 L_{SE} の促進である。

これに関する代表的な従来研究としては、ロボットに物体操作タスク等のための行動モデルを獲得させるために、人間の実演による教示を利用しようという試みがある [3][8]。これらの研究は、人間の実演に基づくロボット側の学習手法自体を議論するものであるが、さらに、人間とロボット間のインタラクションの設計指針にまで踏み込んだ研究として、対話的進化ロボティクスにおける教示の視点の効果について議論した片上らの研究がある [5]。

この研究では、クラシファイアシステムにより行動学習を行う移動ロボットに対し、次取るべき行為を人間

がジョイスティックで直接教示することにより、一般には非常に効率の悪い進化ロボティクスによる学習の高速化を実現している [5]。ロボットは、教師の教示をクラシファイアとして取り込み、学習に役立てる。この場合のロボットのタスクは、障害物回避を含む自律移動であり、第2図(a)の構成要素は、それぞれ以下ようになる。

- E ：ロボットのワークスペース。
- I_{ES} ：ロボットのセンサによる情報の獲得。
- I_{SE} ：ロボットのアクチュエータによる行為。
- L_{SE} ：クラシファイアシステムによるロボット（システム）の環境への適応。

この研究において、適応のための HCI 設計の対象として考慮されているのは、 I_{HS} 、 I_{SH} の両方であるが、片上らは、 I_{HS} をジョイスティックによるロボットの直接操作として固定し、残る I_{SH} について、以下に示すような2つの設計方法について、その L_{SE} への効果を実験的に比較している。

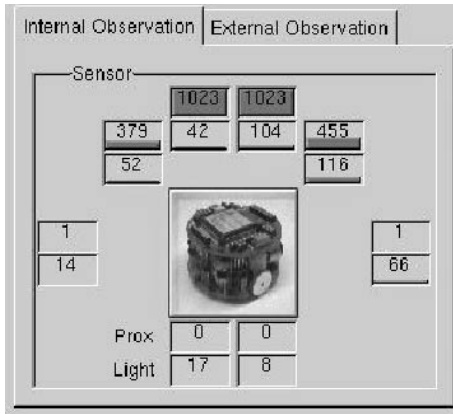
- 学習者の視点：ロボットの得るセンサ情報と同じものを人間の教師も見ても ($I_{SH}=I_{ES}$)、環境の情報を獲得し、教示を行う。ロボットのセンサ情報を表示するインタフェース (第4図) を通して教示がなされる。
- 教師の視点：人間は鳥瞰的に環境を見て、環境の情報を獲得する。第5図のような環境全体を見渡せる視点から教示がなされる。

比較実験の結果、学習者の視点による教示の方が、クラシファイアシステムの学習効率がよかった。これは、学習者の視点の方が教師の視点よりもロボットの環境認識能力とのギャップが少なく、そのためより適切なクラシファイアが学習でき、結果としてロボットの適応 L_{SE} の効率がよくなったと考えられる。一方、人間にとっては、教師の視点の方が、自然に環境を認識できるために認知的負荷が少ないが、学習者の視点に対しても、多少の負荷はかかるものの、人間はそれに対し十分に早く適応している。

片上らの研究は、この人間の特性を上手く利用して、換言すると、人間の高度な適応能力に頼って、エージェントの適応 L_{SE} の効率化をはかるためのインタラクションを設計した一例となっている。このように、対話的システムである以上は、ユーザに過度の認知的負荷を与えない範囲であれば、人間の適応能力を最大限有効に利用することが重要である。

5. 対話的タスクにおける適応の促進

対話的タスクにおける適応のための HCI 設計は、前述の第2図(b)のように表現される。これに関する研究は、人間、システムのどちらの適応に焦点を当てているかによって、いくつかの種類に分けることができる。

第4図 ロボットと同じ視点： $I_{SH}=I_{ES}$ 

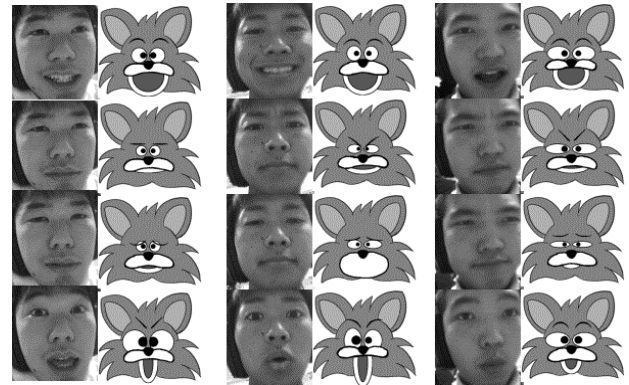
第5図 教師の視点

5.1 人間の適応の促進

対話的タスクにおける人間の適応 L_{HE} のための HCI 設計の例として、擬人化エージェント (life-like agent) がある。擬人化エージェントは、MicroSoft Agent に代表されるように、ユーザのソフトウェア操作や Web ショッピングでのデータ入力を支援する目的で数多く開発されている [4]。

これらのシステム (エージェント) の多くは、環境への適応能力 L_{SE} を持たない。システム、人間、環境間のインタラクション I_{EH} , I_{HE} , I_{ES} , I_{SE} は、支援対象となるソフトウェアによって決まる。Web のオンラインショッピングの情報入力をユーザに支援するソフトウェアエージェントの場合、各要素は以下ようになる。

- E : オンラインショッピングの Web サイト。
- I_{EH} : Web ページ自体からの情報獲得と I_{SE} により提供される情報の獲得。
- I_{HE} : ユーザによる商品名、個数、支払い方法等の情報の入力。
- I_{ES} : I_{HE} により提供される情報とユーザプロフィールなどの付加情報の獲得。
- I_{SE} : システムからユーザへの情報入力に関するアドバイス (次に入力すべき情報の指示、バルーンヘルプなど) の提示。



第6図 ユーザ表情とエージェント表情の対応関係

このとき、適応のための HCI 設計の対象として、 I_{HS} , I_{SH} の両方が考慮されるべきであるが、これまでの多くのソフトウェアエージェントの研究では、 I_{HS} を使わず、主に人間がシステムのアドバイスを受け入れるように適応 L_{HE} できるには、 I_{SH} としてどのような情報を与えればいいのかの議論がされてきた。このために有効な I_{SH} の1つがエージェントの擬人化であり、人間に近い外見、ジェスチャ、感情的表情などを I_{SH} として導入することにより、エージェントをあたかも自我をもつ人間のように感じさせ、人間との間に信頼関係を築こうとする試みがなされている [1]。

5.2 システムの適応の支援

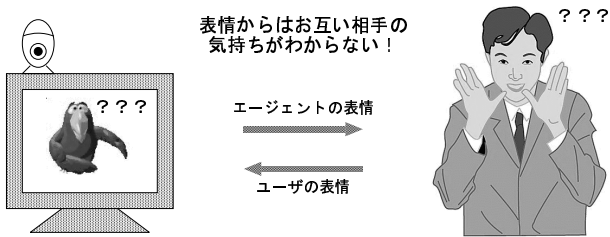
上のように、人間の適応のためにシステムの擬人化を考える場合、そのようなシステムをさらに人間に適応させるための HCI 設計に関する研究例として、ユーザの実表情を擬人化エージェントの合成表情で置換する処理を、ユーザとのインタラクションを通じてユーザの要求に適応させるという近藤らの試みがある [7]。これは以下のようなタスクとなり、擬人化エージェントを介したコミュニケーションや CG キャラクタの表情生成などの際に必要となるため、この中の I_{ES} , I_{SE} を実現する手法が表情認識の分野で多数提案されている。なお、このタスクでは、 I_{EH} は必要ない。

- E : ユーザ、エージェントそれぞれの顔。
- I_{HE} : ユーザによる表情の表出。
- I_{ES} : ユーザの顔の観測による表情特徴の抽出。
- I_{SE} : エージェントの表情の合成と表出。

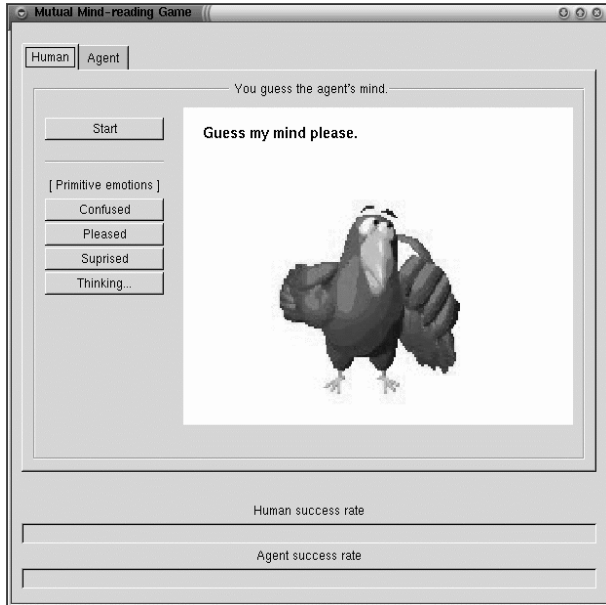
近藤らは、このような I_{ES} , I_{SE} に加え、さらにユーザの表情とエージェントの表情の対応関係をユーザの要求に適応させるための L_{SE} を、以下のような I_{SH} , I_{HS} に基づく事例ベース学習によって実現している (第6図)。

- I_{SH} : 合成されたエージェントの表情のフィードバック。
- I_{HS} : GUI によるエージェントの表情の修正。

擬人化されたシステムにおける L_{SE} の実現のために、本来のタスクとは別の I_{HS} , I_{SH} を導入している他の研究例として、ペットロボットや自律型キャラクタによる



第7図 マインドマッピングの相互適応と相互読心ゲーム



第8図 相互読心ゲーム（人間が相手のマインドを当てる番）

物語の実演タスクにおいて、ユーザが適切な演技を、体に位置センサを装着して実演することによって教示し、その動作を子供のリハビリテーションに利用する試み [9] や、ユーザがシーン中の物体を直接操作したり、個々のキャラクターに行動内容を言葉で指示できるようにする試み [2] 等がある。

5.3 システムと人間の相互適応の支援

ここまで紹介した研究は、適応のための HCI 設計において、システム側あるいは人間側の一方の適応を考慮しているが、相互に適応する場合を扱っていない。これに対して、人間とシステムの相互適応を試みたものとして、山田らの研究 [10] がある。この研究では、擬人化エージェントシステムと人間が対話的タスクを扱う場合に必要な自然なコミュニケーションを実現するには、お互いが相手の表情からマインドと呼ばれる内部状態（“忙しい”、“暇である”など）を推定できるように相互適応する必要があるというマインドマッピングの相互適応問題（第7図）を提案している。この相互適応において、システムはカメラで人間の表情を観測し、それを事例として人間のマインドマッピングの学習を行う一方、人間は自由にエージェントのマインドマッピングの学習を行う。この相互適応を構成する要素は以下ようになる。

- E : 相手の表情を表現する表現メディア（相手の顔）。
- I_{EH} : エージェントの表情の観測。
- I_{HE} : 人間の表情の表出。
- L_{HE} : 人間によるエージェントのマインドマッピングの学習。
- I_{ES} : 人間の表情の観測。
- I_{SE} : エージェントの表情の表出。
- L_{SE} : エージェントによる人間のマインドマッピングの学習。

この研究では、2つの適応 L_{SE} , L_{HE} の両方を促進させるための HCI 設計として、相互読心ゲームという、お互いが相手の表情からマインドを当て合う一種の協調ゲームを設計している。第8図に、そのゲームにおいて人間がエージェントのマインドを当てる場合のインタフェースのスナップショットを示す。このようなシステムにより、システムと人間の適応がスムーズに実現されることを調べる実験が行われている [10]。

人間同士の相互適応を試みた研究例としては、テレビゲームのスキル学習における人間の教師と学習者の相互適応の研究 [6] などがあるが、人間とシステムの相互適応を促進するためのインタラクション設計に関する研究は少なく、今後の研究の進展が期待される分野である。

6. まとめ

本稿では、HCIにおいて人間とシステムの適応を促進するためのインタラクション設計について議論した。人間はインタラクションの対象に適応する性質を持っている一方、システムにおいても適応機能は重要である。しかし、このような適応を独立かつ自律的に実現することは一般に困難であることから、人間、システムの適応を促進するための新たなインタラクション - 適応のためのインタラクション - の導入を提案した。また、自律的タスク、対話的タスクという2種類のタスクの分類に基づいて、それぞれのタスクにおける適応のためのインタラクションの具体的な研究例を挙げ、それぞれにおけるインタラクションのバリエーションやその利用法の紹介を通じて、適応のためのインタラクション設計の問題に関する研究の現状と課題を述べた。

謝 辞

日頃本稿の内容に関連する研究の議論に参加頂いている IΔEA (Interaction DEsign for Adaptation) 研究会のメンバに感謝します。

参考文献

- [1] E. André, T. Rist, and J. Müller. Webpersona: A life-like presentation agent for the world-wide web. *Knowledge-Based Systems*, Vol. 11, No. 1, pp. 25–36, 1998.
- [2] M. Cavazza, F. Charles, and S. J. Mead. Interacting

- with virtual characters in interactive storytelling. In *Proc. of First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, pp. 318–325, 2002.
- [3] K. Ikeuchi and T. Suehiro. Towards an assembly plan from observation part i: Task recognition with polyhedral objects. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 10, pp. 368–385, 1994.
- [4] 石塚満. マルチモーダル擬人化エージェントシステム. システム/制御/情報, Vol. 44, No. 3, pp. 128–135, 2000.
- [5] D. Katagami and S. Yamada. Interactive evolutionary robotics from different viewpoints of observation. In *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1108–1113, 2002.
- [6] T. Komatsu, K. Suzuki, K. Ueda, K. Hiraki, and N. Oka. Mutual adaptive meaning acquisition by paralinguistic information: Experimental analysis of communication establishing process. In *The Proceedings of the 24th Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, pp. 548–553, 2002.
- [7] 近藤崇, 角所考, 美濃導彦. 対話的に獲得される事例に基づく行為者指向の顔メディア変換. システム制御情報学会論文誌, Vol. 14, pp. 308–315, 2000.
- [8] Y. Kuniyoshi, M. Inaba, and H. Inoue. Learning by watching: Extracting reusable task knowledge from visual observation of human performance. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 10, pp. 799–822, 1994.
- [9] C. Plaisant, A. Druin, C. Lathan, K. Dakehane, K. Edwards, J. Vice, and J. Montemayor. A storytelling robot for pediatric rehabilitation. In *Proc. of 4th International ACM Conference on Assistive*

Technologies, pp. 50–55, 2000.

- [10] S. Yamada and T. Yamaguchi. Mutual learning of mind reading between a human and a life-like agent. In *The Fifth Pacific Rim International Workshop on Multi-Agents*, pp. 138–150, 2002.

著者略歴

やま だ せい じ (非会員)



1960年10月11日生. 1984年大阪大学基礎工学部卒業. 1989年同大学院博士課程修了. 博士(工学). 同年大阪大学基礎工学部助手. 1991年同大学産業科学研究所講師. 1996年東京工業大学大学院総合理工学研究科助教授. 2002年国立情報学

研究所教授, 現在にいたる. 工学博士. 人工知能, 特に, 知的 Web, ヒューマンエージェントインタラクションに興味をもつ. 情報処理学会, 日本ロボット学会, 電子情報通信学会, AAAI, IEEE, ACM 各会員.

かく しょ こう (正会員)



1964年6月3日生. 1988年名大・工・電気卒, 1993年阪大大学院工学研究科通信工学専攻博士課程了. 1992~1994年日本学術振興会特別研究員, 1993~1994年スタンフォード大ロボティクス研究所客員研究員, 1994年阪大産業科学研究所助手, 1997年

京大総合情報メディアセンター助教授, 2002年同学術情報メディアセンター助教授. 博士(工学). 視覚メディアを介した人間-計算機間のコミュニケーションの実現に関する研究に従事. IEEE, ACM, 電子情報通信学会, 情報処理学会, 人工知能学会, システム制御情報学会各会員.