

ユーザの行動の不確実性に対応した 実世界指向分散ヒューマンインタフェースシステムの提案

岩倉 裕子[†] 白石 陽[†]
中内 靖^{††} 安西 祐一郎^{†††}

本論文ではユーザの行動の不確実性に対応した実世界指向分散ヒューマンインタフェースシステム AIDA を提案する。AIDA は移動ロボット、計算機など、分散インタフェースの構成要素をエージェントとしたマルチエージェントモデルに基づいており、エージェント間の協調によりユーザの位置の不確実性への対応を可能としている。また、各エージェントを確信度を利用した行動ベースアーキテクチャに基づいて設計することにより、ユーザの注意の向きの不確実性への対応を可能としている。さらに本論文では、AIDA を用いて研究室案内システムを設計・実装し、実験により AIDA の有効性を確認した。

Real-world Oriented Distributed Human Interface System that Adapts to Uncertainty of User's Activities

YUKO IWAKURA,[†] YOH SHIRAISHI,[†] YASUSHI NAKAUCHI^{††}
and YUICHIRO ANZAI^{†††}

In this paper, we propose a real-world oriented distributed human interface system named AIDA. AIDA supports human activities in a real-world (i.e. in offices, in houses) without restricting user's physical activities. AIDA is based on multiagent model in which each interfacing element (i.e. mobile robots, workstations) cooperates with each other for providing context-aware support to a user. An agent is constructed by a set of behavior modules for providing reactive responses to a user. Also, with AIDA, the system can adapt to the uncertainty of user's position and the user's attention that may change as time passes. We developed a laboratory guiding system based on AIDA. And we have confirmed the efficiency of AIDA by experiments.

1. はじめに

近年、計算機の高速化ならびに計算機ネットワークの発展とともに、電子化された情報を共有・伝送するなどして人間の共同作業を支援するシステムが活発に開発されている。しかしながら、たとえば文書の作成では、作成した文書を郵送しようとする、文書をプリンタから印刷した後に、封筒を探し、切手を探して投函する必要がある。計算機、プリンタ、封筒、切手などの置き場所が離れている場合（図 1 参照）、計

算機の前からプリンタの設置場所に移動したユーザに、プリンタ近くの計算機が封筒の所在をアドバイスし、さらに封筒の引出し近くの計算機が切手の所在をアドバイスしたり、場合によっては移動ロボットが誘導するなど、ユーザを取り巻く環境全体が、移動するユーザを連続的かつ適切に支援できることが望まれる。

このような支援を可能とするインタフェースシステムを構築するためには、システムは以下の側面を具備する必要があると考えられる。まず、実世界を移動するユーザと任意の場所でインタラクションを行うことのできるように、システムの構成要素（インタフェース）を環境に分散させた実世界指向分散 HIS (Human Interface System) であることが望まれる。また、実世界において移動するユーザの活動を妨げないよう、システムからユーザへの情報の提示において携帯端末などの携行を仮定しない、非拘束型 HIS であることが望まれる。

[†] 慶應義塾大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Keio University

^{††} 防衛大学校機械工学教室
Department of Mechanical Engineering, National Defense Academy

^{†††} 慶應義塾大学理工学部
Faculty of Science and Technology, Keio University

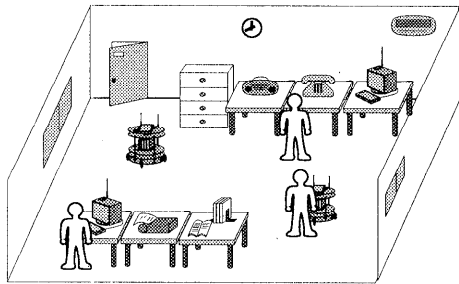


図1 実世界指向分散ヒューマンインタフェースシステム概念図
Fig.1 A concept of "Real-world Oriented Distributed Human Interface System".

特に分散 HIS を非拘束型で実現するためには、環境内を移動するユーザの位置を検出し、ユーザの位置ならびにそれまでシステムとユーザがインタラクションを行った履歴などのコンテキスト（以下、単にコンテキストと呼ぶ）を考慮した適切な対応ができる必要がある。この際、センサから取得される情報には不感領域ならびに不確実性が含まれるためユーザを見失う場合がある。そこで、位置的に固定されたセンサによりユーザが検知された場合に、そのユーザに対応できるだけでなく、インタフェース自身が能動的に移動でき、見失ったユーザを探索したり誘導したりできることが望まれる。このように、分散 HIS はユーザの位置の不確実性に対応できる必要がある。また、あるインタフェースがその正面に現れたユーザにインタラクションを行っているつもりが、途中でユーザの注意が他に向けられて、インタフェースが提示する情報をユーザが見ていない、あるいは聞いていない場合が考えられる。このような場合、システムがユーザの注意の有無を判断したうえで、注意が失われている場合には適切な対応ができることが望まれる。このように、分散 HIS はユーザの注意の向きの不確実性に対応できる必要がある。以上に述べた実世界指向分散 HIS の要件を表 1 にまとめる。

一般に、実世界指向インタフェースは環境にインタフェースを分散させる遍在型によるアプローチとユーザが何らかの装置を装着する携帯型によるアプローチの 2 通りがある。また携帯型によるアプローチはさらに、携帯端末を保持する携帯端末型と眼鏡のように装着するウェアラブル型に分類される¹⁾。携帯端末型では NaviCam²⁾ならびに Cyberguide³⁾などが提案されており、これらのシステムではユーザが確実に携帯端末を持ち歩くがゆえに、ユーザの位置をより確実に把握でき、またユーザが現在何に興味を示しているのかなどユーザの注意の向きを明示的に入力してもらえる

表 1 実世界指向分散 HIS の要件

Table 1 Required functions for real-world oriented distributed HIS.

- | |
|-----------------------|
| 1. 非拘束型であること |
| 2. コンテキストの考慮 |
| 3. ユーザの位置の不確実性への対応 |
| 4. ユーザの注意の向きの不確実性への対応 |

などの利点がある。しかしながら、携帯型端末を常時携帯することは、実世界において移動し、両手を使って作業を行うユーザの自由な活動を阻害する欠点がある。一方、ウェアラブル型として Vu-Menu ならびに Navigator⁴⁾などが提案されているが、現状ではヘッドアップディスプレイならびに腰にコンピュータを装着することになっている。将来、遍在型と端末型のどちらのデザインがユーザに受け入れられるか議論のあるところであるが、本研究では実世界におけるユーザの行動を束縛しないこと、またユーザに特別な装置の装着を課さないことが重要であると考え、遍在型システムにより実現することとした。

一方、遍在型によるアプローチとして Ubicomp (Ubiquitous Computing)^{5),6)}という概念が提案されている。この概念のもと、部屋にノート型端末装置、黒板大のディスプレイなどを配置し、これらの間での情報共有を実現したシステムが作成されている⁶⁾。コンテキストの考慮に関しては Ubicomp ならびに Cyberguide において、システムがユーザ行動の履歴を保持し、システムがその情報を参照してユーザに対応することを可能としている。しかしながらこれらのシステムでは、センサの不感領域にいるユーザを能動的に探して支援を行うようなユーザの位置の不確実性への対応、ならびにシステムが提示する情報に興味を失ったユーザに対して、適切に働きかけるようなユーザの注意の向きの不確実性への対応については考慮されていない。

そこで本研究では、様々なセンサを取り付けた、複数の計算機ならびに移動ロボットを環境内に分散配置し、非拘束的に**ユーザならびに実世界の情報を能動的に取得させ、また、これらをネットワークを介し

* Ubicomp の概念のもとに実現されているシステムでは、ペン入力可能な PARC Tab⁷⁾と呼ばれる携帯端末も利用されており、ユーザは Tab を携帯して支援を受ける場合がある。しかしながら、Ubicomp では遍在するコンピュータによる支援を主な目的としているため本論文では遍在型であると位置付けた。

** 実際のシステムでは、ユーザに ID ペンダントを胸に着けてもらう。ID ペンダントを用いずに画像処理により、まったく非拘束的にユーザを認識する手法も考えられるが、現状では実現困難であると判断した。

て協調させることにより、移動するユーザとのインタラクションを可能とした実世界指向分散 HIS を提案する。

本論文の構成は以下のとおりである。まず 2 章にて実世界指向分散 HIS のためのシステムアーキテクチャ AIDA (Architecture for Interfacing Distributed Agents) を提案する。3 章では AIDA に基づいて作成した、計算機ならびに移動ロボットによる研究室案内システムを紹介する。さらに 4 章では AIDA の有効性を検証するために行った、研究室案内システムを用いた実験について説明し、5 章において実験に基づく考察を述べる。そして最後に結論を述べる。

2. アーキテクチャ AIDA の提案

2.1 AIDA の設計方針

表 1 に示した要件に基づき、実世界指向分散 HIS のためのシステムアーキテクチャ AIDA を設計した。以下のその設計方針を述べる。

マルチエージェントシステムの利用

インタフェース群の協調的な振舞を可能とし、かつ個々のインタフェースが自律的にインタフェースとして機能できるようにするため、システムを構成する個々のインタフェースを自律性を持ったエージェントととらえたマルチエージェントシステムとして扱うこととした。個々のエージェントは実世界で分散して存在するため、ユーザの存在などの情報を互いに通信しあうことにより、ユーザの位置の不確実性に対応できると考える。

行動ベースアーキテクチャと確信度の利用

個々のエージェントがユーザとインタラクションを行う際、ユーザがとりうる複数のコンテキストを保持し、これらを切り替えられる必要がある。そこで、複数のコンテキストを行動モジュールとして表現することのできる、SSA (Subsumption Architecture)⁸⁾ を代表とする行動ベースアーキテクチャに基づいてシステムを構築することとした。

また、コンテキストは以下のような状況で切り替える必要があると考えられる。1) あるインタフェースの前に突然現れたユーザがセンサにより検知された場合、2) あるインタフェースがインタラクションを行っていたはずのユーザが他の場所で発見されたことなどが他のエージェントからの通信により伝えられた場合、そして、3) あるインタフェースがユーザに説明している途中に、ユーザのインタフェースに対する注意の向きが失われた場合である。そこで本研究では各行動モジュールの発火条件として、1) に対応するために、

SSA と同様に、センサ情報を利用し、2) に対応するために、他のエージェントからの通信情報を利用し、そして、3) に対応するために、ユーザが注意を向け続けているか否かを判断する指針として新たに確信度を導入した。本論文ではユーザの注意は時間経過とともに薄れる可能性があるとして仮定⁹⁾し、確信度を時間関数 belief により扱うこととした。各行動モジュールはこれらの 3 種類の情報を発火条件とすることにより、コンテキストを即応的に切り替えられると考える。

またこのような方針に基づくことにより、アプリケーションの開発では、想定されるコンテキストのセグメントを行動モジュールとして用意し、コンテキスト切替えのタイミングを発火条件として設定すればよく、アプリケーションの設計・開発が容易になることが期待される。

自律移動ロボットの導入

センサの不感領域に存在するユーザに対応するためには、位置固定型の端末装置では対処することができない。能動的に移動することにより、ユーザを探索することが必要である。そこで本研究ではインタフェースとして自律移動ロボットを導入し、ユーザを探索ならびに誘導することとする。

ユーザエージェントの利用

ユーザとインタフェースのインタラクションの履歴など、コンテキストを考慮したインタフェースを実現するために、本研究では、ユーザごとにユーザエージェントを作成し、各ユーザとのインタラクションの履歴を保持させることとした。

2.2 AIDA

2.2.1 AIDA のマルチエージェントモデル

上記の設計方針に基づき実世界指向分散 HIS のためのシステムアーキテクチャ AIDA を設計した。AIDA のマルチエージェントモデルでは、システムはユーザとのインタラクションの履歴を管理するために個々のユーザごとに用意されるユーザエージェント (UA: User-Agent)、ならびにユーザとインタラクションを行うインタフェースエージェント (IA: Interface-Agent) 群から構成される。UA は各ユーザの位置の履歴、ならびに IA とのインタラクションの履歴を管理する。一方、IA は実際には計算機やロボットといった機器に相当し、独立したモジュールとして自律的にユーザとインタラクションを行う。IA どうしあるいは IA と UA が協調することにより、全体として分散インタフェー

⁹⁾ 人間の注意が時間経過とともに薄れるという仮説を支持する例として、注意の勾配説⁹⁾があげられる。

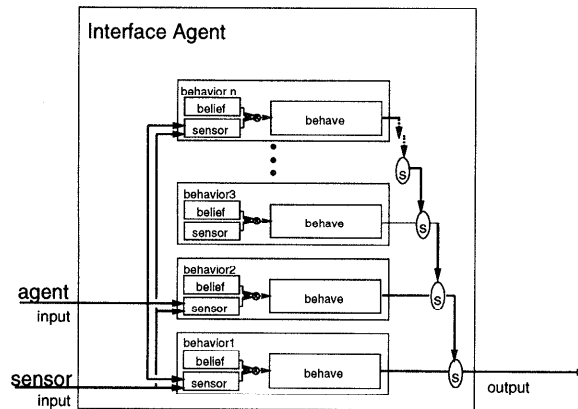


図2 インタフェースエージェントのモデル
Fig.2 A model of Interface-Agent.

スを提供する。以下にそれぞれのエージェントについて説明する。

2.2.2 インタフェースエージェント

IAのモデルを図2に示す。個々のIAは並行実行可能な行動(behavior)モジュールから構成される。各行動モジュールは、センサ(超音波センサ, 赤外線センサ, キーボード入力など)ならびに他のエージェントから送られるデータ(ユーザの履歴情報や他のエージェントからのタスクの依頼など)を入力とし、発火条件を満たすかどうかをif-thenルールにより判断するセンサ部、確信度(時間関数believe)に基づき発火条件を満たすかどうかを判断する確信度部、これらの情報をもとに行動を決定し、アクチュエータへの駆動命令、ディスプレイへの表示命令などの制御命令を出力する行動部から構成される。

ここで、各行動モジュールはセンサ部ならびに確信度部の両方の発火条件が満たされた場合のみ発火(活性化)する。また各行動モジュールの出力には包摂(subsume)性を持たせることが可能であり、図2の場合、より上位の階層の行動モジュールが高い優先順位を持つことになる。このため複数の行動モジュールが発火した場合、より上位の階層の行動モジュールが、より下位の行動モジュールの発火を抑制することになる。

確信度部では、時間関数believeによってその確信度が計算される。believe関数の一般式を以下に示す。

$$b_{i,t_{j+1}} = \begin{cases} b_{i,t_0} & \text{(initial value)} \\ b_{i,t_j} + a_i & (0 \leq b_{i,t_j} + a_i \leq 1) \\ b_{i,t_j} & \text{(otherwise)} \end{cases}$$

ここで b_{i,t_j} は、behavior i の時刻 t_j におけるbelieve関数の値である。時刻 t_j の刻み幅はセンサなどから

情報を取得する際のサンプリング周期である。また a_i はbelieve関数の時間経過にともなう変化の割合を決定するパラメータであり、絶対値が大きいほど確信度は急激に増加あるいは減少する。本研究では、各believe関数はIDセンサによりユーザの存在が認識された場合に初期化されることとした。また、行動モジュールが発火するための確信度の閾値を0.5とする。

以下にbelieve関数により、時間経過に従って発火する行動モジュールの切替えが行われる様子を説明する。例として、以下に示す3つの行動モジュールから構成される、情報提示を行う計算機によるIAを仮定する(図3参照)。また、ユーザのIAに対する注意の有無に関しては、ユーザの胸に取り付けたIDペンダントの情報が取得できるか否か^{*}によって判断する。

behavior3: 情報提示行動

センサ部: IDセンサ(認識された場合)

確信度部:

$$b_{3,t_{j+1}} = \begin{cases} 1 & \text{(initial value)} \\ b_{3,t_j} - a & (0 \leq b_{3,t_j} - a \leq 1) \\ b_{3,t_j} & \text{(otherwise)} \end{cases}$$

行動部: ユーザに情報を提示

behavior2: ユーザ探索行動

センサ部: IDセンサ(認識されなかった場合)

他のIAからのユーザの認識情報

^{*} IDペンダントの情報を取得できない場合、ユーザはIAの前にはいない、あるいは異なる方向を向いており、IAが提示する情報に注意して見るあるいは聞いていないと仮定した。しかしながら、ユーザがIAの前におり、注意して聞いているにもかかわらずIDペンダントの情報を取得できない場合も考えられる。本研究ではこのような場合、システムがユーザの注意を喚起する情報提示を行うことにより、ユーザの注意の有無を確認できるようにしている。

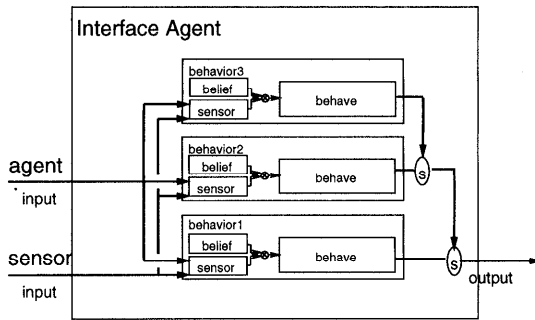


図3 インタフェースエージェントの構成例
Fig. 3 An example of Interface-Agent.

確信度部：

$$b_{2t_{j+1}} = \begin{cases} 0 & (\text{initial value}) \\ b_{2t_j} + \frac{\alpha}{2} & (0 \leq b_{2t_j} + \frac{\alpha}{2} \leq 1) \\ b_{2t_j} & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

行動部： 他の IA にユーザの認識情報を依頼

behavior1： 注意確認行動

センサ部： IDセンサ（認識されなかった場合）
キーボード

確信度部：

$$b_{1t_{j+1}} = \begin{cases} 0 & (\text{initial value}) \\ b_{1t_j} + a & (0 \leq b_{1t_j} + a \leq 1) \\ b_{1t_j} & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

行動部： 質問提示によるユーザへの注意の喚起

この IA がユーザを認識して動作し始めたときの belief 関数の変化の様子を図 4（上図）に、また確信度に従って変化する行動モジュールの発火の様子を図 4（下図）に示す。

時刻 $t_0 \sim t_{10}$ では、ID センサによりユーザの注意が IA に向けられていることが確認されているため、すべての行動モジュールの belief 関数の初期化が毎時刻行われている。この間、行動モジュールの切替えは行われず、情報提示行動によりユーザへの説明が行われている。

時刻 $t_{10} \sim t_{20}$ では、ID センサにより情報が取得できず、ユーザの注意が IA に向いていることが確認できていない。したがって、belief 関数は初期化されず、上述した式に従って確信度が変化している。時刻 t_{20} において behavior 3 の確信度が閾値以下になり、behavior 1 の確信度が閾値以上になるため注意確認行動が発火し、発火する行動モジュールの切替えが行われている。注意確認行動の結果時刻 t_{22} において、ID センサよりユーザが IA に向いていることが確認され

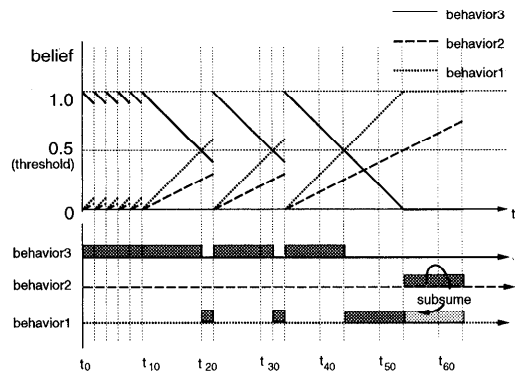


図4 belief 関数と発火する行動モジュールの様子
Fig. 4 Belief functions and selection of behaviors.

ため、belief 関数の初期化が行われている。そこで、再度 behavior 3 が発火することにより、情報提示行動が説明を再開している。

さらに時刻 $t_{34} \sim t_{44}$ においても、ID センサよりユーザの注意が確認されなかったために、時刻 t_{44} において上記と同様にユーザの注意を確認する behavior 1 に行動が切り替わっている。しかしながらこの場合、ユーザの注意を確認することができなかったために、時刻 t_{54} において behavior 2 が発火し、behavior 1 より優先度が高いことから behavior 2 に行動が切り替わっている。そこで behavior 2 により他の IA の前にユーザが現れていないかの探索依頼を他の IA に送信している。

このように AIDA では、確信度を用いることにより、ユーザの注意の向きを予測し、発火する行動モジュールを適切に切り替えることができるようになっている^{*}。また、各行動モジュールは並行動作可能な比較的単純な構造として実現できるため、センサ部より取得される、外界の状況の変化に対して即応的に反応することが可能となっている。

2.2.3 ユーザエージェント

UA の構造は基本的には IA と同様に行動モジュールから構成される。UA はユーザに関する情報を管理し、情報の更新と他のエージェントに情報の送信を行う。そのため UA は図 5 に示すように、DB (Data Base) 行動モジュールを特別に持つこととした。DB 行動モジュールはセンサ入力として DB の更新、検

^{*} 従来手法においてもタイム割込みにより、時間経過とともにコンテキストを切り替える手法も考えられる。しかしながら、コンテキスト間の優先順位を考慮しようとする、その管理は非常に複雑になると考えられる。本手法ではシステムレベルで、割込みのタイミングならびにコンテキストの優先順位の取扱いを可能としている。

索, 他のエージェントへの送出命令などを入力として受け取り, 動作部がこれらを実行する. また, UA は直接ユーザとインタラクションを行わないことから, 確信度部を持たないこととした. 独立したデータを複数のDB 行動モジュールに分散して管理することにより, 他の複数のエージェントからの要求に素早く応答することが可能となる.

UA を利用することにより, 複数のIA がコンテキストを考慮したインタラクションを行う様子を図6 に示す. ここでUA は, あるユーザに関して, 複数のIA がそれまでに行ってきたインタラクションに関する履歴情報を管理していることとする. 以下に, 図6 に示した番号に従って, システムの動作を説明する.

- (1) IA 1 の ID センサにより, IA 1 の正面にユーザの出現が確認される.
- (2) IA 1 は ID センサの値より, 対応するユーザの UA にユーザ情報を問い合わせる.
- (3) UA はユーザ情報を IA 1 に伝える.
- (4) UA の管理するユーザ情報が存在しないことから IA 1 は初めて訪れたユーザとしてサービスを開始する.
- (5) ユーザが移動し IA 2 の正面に現れる (IA 1 は

ユーザが移動してしまったことを検知できずにサービスを継続している).

- (6) IA 2 は UA にユーザ情報を問い合わせる.
- (7) UA はユーザ情報を IA 2 に伝える.
- (8) UA のユーザ情報が IA 1 によってサービスを受けていたことを示している. そこで, IA 2 は IA 1 に対して, ユーザが移動してしまい IA 1 の前にユーザはいないことを伝える.
- (9) IA 1 は継続していたサービスを中断し, IA 2 に対して了解したことを伝える.
- (10) IA 2 はユーザに対して, IA 1 がそれまでに行ったサービスを考慮し, サービスを開始する.

3. 研究室案内システムの設計と実装

3.1 研究室案内システム

AIDA の有効性を示すため, AIDA に基づいて研究室案内システムを作成した. 研究室案内システムの概要を図7 に示す.

研究室案内システムでは, 訪問者(ユーザ)に対して, 入口付近において研究室の概要を説明し, 研究室内奥に位置するデモ会場へ誘導して研究説明などを行う. この際システムは, 移動するユーザの位置の不確実性, ならびに誘導中あるいは説明中におけるユーザの注意の向きの不確実性に対応できることが望まれる. また, 任意の順序でデモ会場を訪れるユーザに対して, それまでにそのユーザにどこまで説明したか, などの履歴情報に基づいて適切な説明を行えることが望まれる.

我々は研究室案内システムの構築にあたり, ユーザの認識を行うために赤外線発信器を ID ペンダントとしてユーザの胸に着けてもらうこととした. また, システムを構成する IA として, 通路を移動しユーザを誘導または探索する自律移動ロボット(ロボットエージェント), ユーザに情報を提供する計算機(計算機エージェント), そして環境モニタシステム(環境モニタリングエージェント)の3種類を用いることとした. 以下に本システムで用いる IA ならびに UA の設

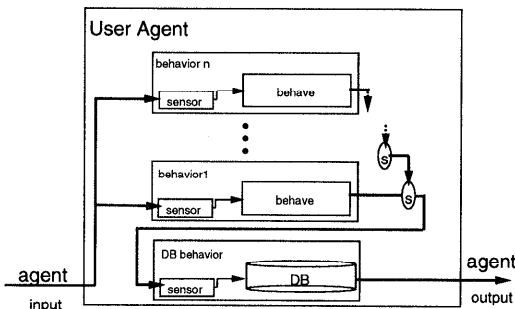


図5 ユーザエージェントのモデル
Fig.5 A model of User-Agent.

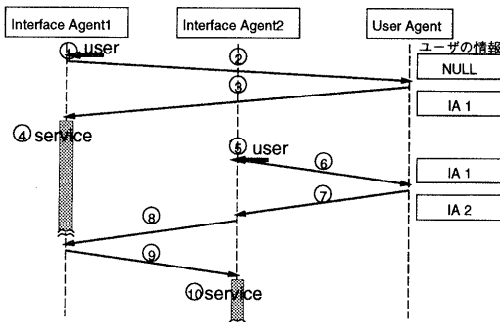


図6 エージェント間の協調の様子
Fig.6 An example of agents' coordination.

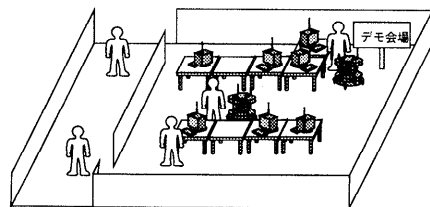


図7 研究室案内システムの概要
Fig.7 Overview of laboratory guiding system.

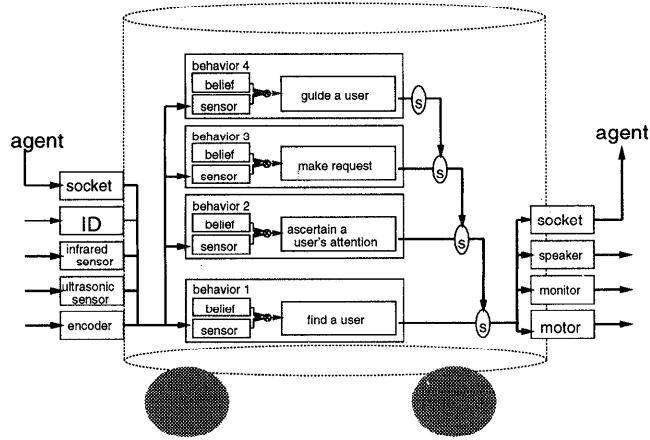


図8 ロボットエージェントの構成
Fig. 8 Robot-Agent.

計について説明する。

3.2 設 計

3.2.1 ロボットエージェント (RA)

RA は研究室を自由に移動することができ、その近くに現れたユーザのデモ会場までの案内、他のエージェントに依頼されるユーザの探索、依頼された場所までの移動などを行う。RA はセンサ部に、ユーザ認識のためのID レシーバ、外界認識のための赤外線距離センサ、超音波距離センサ、移動距離測定のためのエンコーダ、ならびに他のエージェントからの通信情報を入力として用いる。また行動部の結果として、モータ駆動命令、音声合成を用いたスピーカ出力命令、通信機器に対して制御命令を出力する。以下に各行動モジュールについて説明する (図8 参照)。

behavior 4: guide a user

ID レシーバよりユーザ ID を受信 (ユーザの存在を認識) すると発火し、音声合成装置よりユーザに誘導することを伝え、モータを駆動して移動し、ユーザを誘導する。

behavior 3: make request

ユーザ誘導中にユーザ ID が受信されなくなる (ユーザを見失う) と発火し、通信機器を介して他の IA にユーザ支援継続の要求を送る。

behavior 2: ascertain a user's attention

ユーザ誘導中にユーザ ID が受信されなくなると発火し、音声合成装置よりユーザに話しかけ、ユーザの注意が RA に向いているかどうかを確認する。

behavior 1: find a user

他の IA からユーザ誘導の要求が到着した場合、またはユーザ誘導中にユーザ ID が受信されなくなると発火し、モータを駆動して移動し、ユーザ

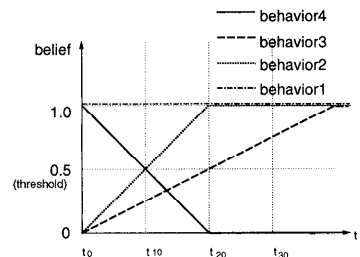


図9 ロボットエージェントの belief 関数
Fig. 9 Belief function of Robot-Agent.

を探索。

ここで、各行動モジュールの belief 関数は図9 に示すように変化するものとする。

3.2.2 計算機エージェント (CA)

CA は各デモ会場ならびに通路に配置され、ユーザを認識すると、モニタやスピーカを通して、そのデモ会場における研究説明ならびにユーザの誘導を行う。CA はセンサ部に、ID レシーバ、ユーザの注意を確認するためのキーボードを入力として用いる。また行動部の結果としてモニタ、スピーカ、通信機器に対して制御命令を出力する。以下に各行動モジュールについて説明する (図10 参照)。

behavior 3: explain to a user

ID レシーバよりユーザ ID を受信 (ユーザの存在を認識) すると発火し、音声合成装置よりユーザに研究説明を始めることを告げ、研究説明を行う。

behavior 2: make request

研究説明が終わるか、もしくは説明中にユーザ ID が受信されなくなる (ユーザを見失う) と発火し、通信機器を介して他の IA にユーザ支援継続の要求を送る。

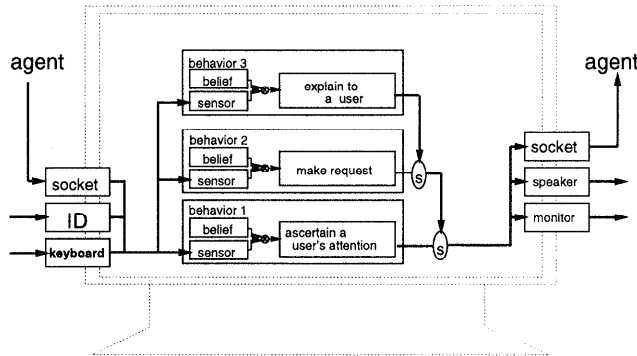


図 10 計算機エージェントの構成
Fig. 10 Computer-Agent.

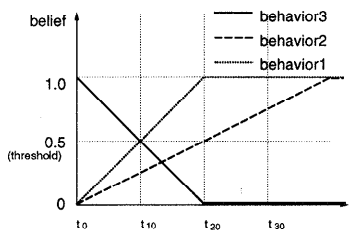


図 11 計算機エージェントの belief 関数
Fig. 11 Belief function of Computer-Agent.

behavior 1: ascertain a user's attention

説明中にユーザ ID が受信されなくなると発火し、音声合成装置よりユーザに話しかけ、ユーザの注意が CA に向いているかどうかを確認する。

ここで、各行動モジュールの belief 関数は図 11 に示すように変化するものとする。

3.2.3 環境モニタリングエージェント (EMA)

EMA は通路ならびに部屋の入口などに配置され、ユーザがその付近に存在するかどうかを監視する。ユーザを認識することにより、UA に情報を伝えたり、他の IA にユーザを支援するよう要求する。EMA はセンサ部に、ユーザ認識のための ID レシーバを入力として用いる。また行動部の結果として通信機器に対して制御命令を出力し、他のエージェントに通信情報を送信する。以下に各行動モジュールについて説明する (図 12 参照)。

behavior 2: make request

ID レシーバよりユーザ ID を受信 (ユーザの存在を認識) すると発火し、通信機器を介して他の IA にユーザ支援継続の要求を送る。

behavior 1: report to UA

ID レシーバよりユーザ ID を受信すると発火し、通信機器を介して対応する UA にユーザの存在を伝達する。

ここで、各行動モジュールの belief 関数は図 13 に示すように変化するものとする。

3.2.4 ユーザエージェント (UA)

UA は訪問者の数だけ生成され、各ユーザに関する行動の履歴、説明をどこまで受けたかの履歴などの情報を管理する。UA はセンサ部として他のエージェントからの送信情報を入力として用い、行動の結果として通信機器に対して制御命令を出力する。以下に各行動モジュールについて説明する (図 14 参照)。

behavior 2: store user information

IA からユーザ情報が到着すると発火し、DB 行動モジュールに書き込み命令を送る。

behavior 1: report user information

IA からユーザ情報に関する問合せが到着すると発火し、DB 行動モジュールに検索、送命命令を送る。

DB behavior:

他の行動モジュールからの要求を検知すると発火し、DB の更新、追加、検索などを行い、必要に応じて通信機器を介して他の IA に情報を送る。

3.3 実装

ユーザ認識に用いる ID ペンダントならびに ID レシーバとして、当研究室で開発した可搬型の赤外線 ID 送信器と赤外線 ID レシーバを用いた¹⁰⁾。赤外線 ID レシーバの情報は計算機では RS-232C を介して、またロボットからは専用処理ボードを介して取得される。また、エージェント間の通信にはソケット機構を用いた UDP によるプロセス間通信を利用した。以下に、各エージェントの実装について説明する。

ロボットエージェント (RA)

RA は当研究室で開発した自律移動ロボット ASPIRE-II 上に実装した¹¹⁾ (図 15 参照)。ASPIRE-II は機能別の並列計算機能を有しており、赤外線距離

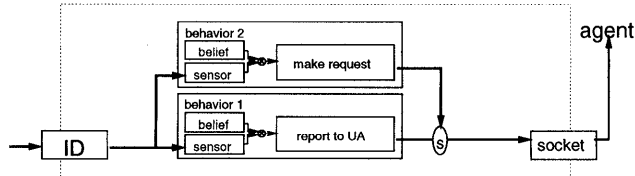


図 12 環境モニタリングエージェントの構成
Fig. 12 Environment-Monitoring-Agent.

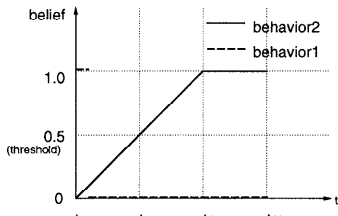


図 13 環境モニタリングエージェントの belief 関数
Fig. 13 Belief function of Environment-Monitoring-Agent.

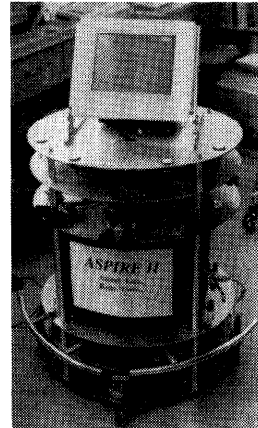


図 15 自律移動ロボット ASPIRE-II
Fig. 15 Autonomous mobile robot ASPIRE-II.

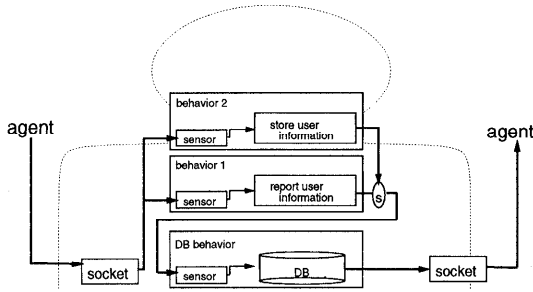


図 14 ユーザエージェント
Fig. 14 User-Agent.

センサ, 超音波センサ, ID レシーバの情報を並列に計測するように実装した。また, 音声合成装置として NTT データ通信製しゃべりん坊を用い, あらかじめ発話データをセグメント化しておき, 必要に応じて発話させるようにした。

計算機エージェント (CA)

CA として 3 台の SUN WS を用いて実装した。各 WS には ID レシーバをシリアルポートに接続することによりユーザ ID が取得できるようにした。また, 情報提示のためには WWW ブラウザを利用し, テキストならびに画像を用いた。さらに, 音声発話装置として発話パターンをあらかじめ audio ファイルとして用意しておき, audio device に送出することにより実装した。

環境モニタリングエージェント (EMA)

EMA として, ID レシーバを (CA とは別に用意した) SUN WS に接続して実装した。

ユーザエージェント (UA)

UA には, EMA で用いた WS を併用した。

上述した各エージェントのプログラムは C 言語を用いて開発し, 各行動モジュールは C の関数としてエミュレートした。なお RA に関しては, ASPIRE-II 用に開発したリアルタイム OS¹²⁾ 上の並行動作可能なプロセスとして実装した。

4. 実験

実装した研究案内システムの有効性を確認するために実験を行った。実験環境は図 16 に示すとおりであり, 1 台の RA, 3 台の CA, 1 台の EMA を図のように配置した。また, 設定した研究室案内のシナリオは以下のとおりである。door1 より入室したユーザは, まず CA2 により挨拶をされ, 研究室の概要を説明される。引続き RA によりデモ会場に誘導され, デモ会場において CA3 により研究発表の説明を聞く。

複数の被験者にシステムを利用してもらい, 案内される様子をビデオで記録した。ユーザの誘導においてユーザの位置の不確か性にシステムが適切に対処できている様子を表 2 に示す。また, 説明中におけるユーザの注意の向きの不確か性にシステムが適切に対処できている様子を表 3 に示す。

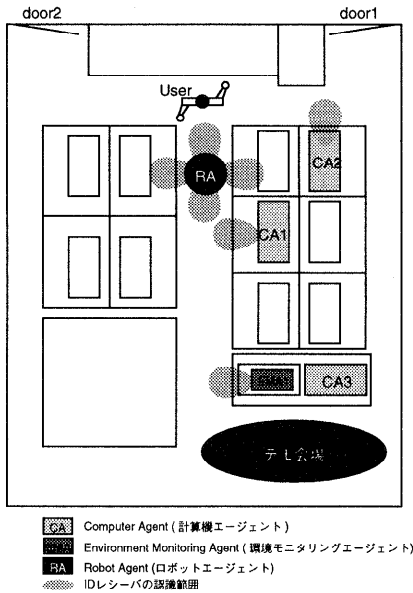


図 16 実験環境

Fig. 16 Environment used in experiment.

5. 考 察

実験結果に基づき、実装したシステムが表 1 に示した実世界指向分散 HIS 要件を満足しているかを以下に検討する。

非拘束型実世界指向分散 HIS

表 2 (case 1.1) ならび (case 1.4) において、CA2, RA, CA3 の複数の IA がユーザーを引き継ぐことにより、全体として一連の研究室案内を遂行できていることが確認された。また (case 1.2) において、ユーザーが途中で RA についていくのをやめた場合でも、ユーザーを発見した CA1 がデモ会場に誘導できており、複数の IA が協調することによりシステム全体として、実世界を非拘束的に行動するユーザーを支援できていることが確かめられた。

コンテキストの考慮

表 2 (case 1.3) において、突然ユーザー 3 が CA3 の前に確認された場合でも、それまでにユーザー 3 とシステムがインタラクションを行った履歴情報を参照することにより、コンテキストを考慮した対応ができていたことが確認された。この例は比較的単純であるが、履歴情報からユーザーの興味を推論することにより、Cyberguide のようにユーザーの興味を考慮した応対も可能であると考えられる。

ユーザーの位置の不確実性への対応

表 2 (case 1.2) において、ユーザー 2 が途中で RA

表 2 ユーザの誘導に関する実験結果

Table 2 Experimental results concerning users' guide.

- | |
|--|
| (case 1.1) ユーザー 1 が入室してからデモ会場に至るまで |
| (1) ユーザー 1 は door1 から入室した。 |
| (2) CA2 はユーザー 1 を認識し、ユーザー 1 に研究室の概要を説明した。 |
| (3) CA2 はユーザー 1 をデモ会場まで誘導するため RA を呼んだ。 |
| (4) RA は CA2 付近のユーザー 1 を認識し、ユーザー 1 にデモ会場まで誘導することを告げた。 |
| (5) ユーザー 1 は RA について行き、デモ会場に至った (図 17)。 |
| (case 1.2) ユーザー 2 が入室してからデモ会場に至るまで |
| (1), (2), (3), (4) はユーザー 1 と同様。 |
| (5) RA は誘導を始めるが、ユーザー 2 は RA について行かなかった。 |
| (6) デモ会場への通路の途中に存在する CA1 がユーザー 2 にデモ会場までの道筋を示した地図を提示した。 |
| (7) ユーザー 2 は地図を見ることによりデモ会場に至った。 |
| (case 1.3) ユーザー 3 が入室してからデモ会場に至るまで |
| (1) ユーザー 3 は door2 から入室した。 |
| (2) CA1 がユーザー 3 を認識し、ユーザー 3 のコンテキストを管理する IA に履歴情報を問い合わせた。 |
| (3) その結果、ユーザー 3 はすでに研究室概要を聞いたことがあることが判明したため、概要説明を行わずにデモ会場まで誘導するため RA を呼んだ。 |
| (4) RA は CA1 付近のユーザー 3 を認識し、ユーザー 3 にデモ会場まで誘導することを告げた。 |
| (5) ユーザー 3 は RA について行き、デモ会場に至った。 |
| (case 1.4) ユーザー 1, 2, 3 がデモ会場から退室するまで |
| (1) デモ会場での発表が終わる。 |
| (2) それぞれのユーザーはもと来た通路を戻る。 |
| (3) 通路の途中にいる CA1 はユーザーに「さようなら」を告げ、出口までの地図を提示した。 |

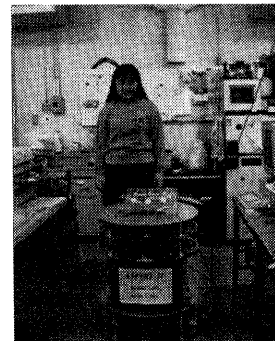


図 17 ユーザを誘導するロボットエージェントの様子
Fig. 17 Robot-Agent which is guiding a user.

についていくのをやめたところで、システムはユーザーの位置を見失っているが、CA1 がユーザー 2 を発見した時点で対応できている。また (case 1.3) においては、ユーザー 3 が突然 CA3 の前に確認されているが、CA3 により適切に対応できている。このように位置を見失ったユーザーが CA のように位置固定の IA により検知された場合において、システムが適切に対応できていることが確認された。

表3 ユーザの注意の変化に関する実験結果

Table 3 Experimental results concerning users' attention.

(case 2.1) ユーザ 1
(1) CA3 はユーザ 1 を認識し、発表を始めた (図 18).
(2) ユーザ 1 は発表を聞いていた。
(3) 発表の途中、CA3 はセンサよりユーザ 1 の ID 情報を取得できなくなったため、ユーザ 1 が発表を聞いているか確かめるため、名前を入力するように促した。
(4) ユーザ 1 は発表を聞いていたので、CA3 の指示に従い名前を入力した。
(5) CA3 はユーザ 1 が発表を聞いていることが確認されたので発表を続けた。
(case 2.2) ユーザ 2
(1) はユーザ 1 と同様。
(2) ユーザ 2 は途中で発表を聞くのをやめてしまった。
(3) はユーザ 1 と同様。
(4) ユーザ 2 は発表を聞いていなかったため、CA3 からの指示が聞こえなかった。したがって名前の入力が行われなかった。
(5) CA3 は発表を止め、移動可能な RA にユーザ 2 を探すように要求した。
(6) RA は移動してユーザ 2 を探し始めた。
(7) RA はユーザ 2 を見つけ「研究発表を聞きに行きませんか」と話しかけた。
(8) ユーザ 2 は RA について行き、再度 CA3 の前に行き研究発表を聞いた。



図 18 ユーザに研究室紹介をする計算機エージェントの様子
Fig. 18 Computer-Agent which is explaining to a user.

さらに表 3 (case 2.2) においては、CA3 はユーザ 2 を見失っているが、RA が移動して探索することによりユーザ 2 に対応できている。本実装で使用した移動ロボットは直径 80 cm とかなり大型であったため、ユーザを見失った通路付近を移動させることにより、かなり確実にユーザを検知することが可能であった。また、位置固定的な IA の間をユーザに移動してもらう場合、ロボットが誘導することにより、CA が単に地図を画面に示すより、より確実に誘導できたと考えられる。これはロボットが身体性を持って移動の方向を示せること、ならびに移動するユーザの位置をつねにセンサで把握しながら誘導できることに起因すると考えられる。上述したように CA だけでも位置の不確実性にはある程度対応できてはいるが、特に非拘束型

では固定型のセンサだけでは不感領域が大きくなるため、本実装のように移動をともなって探索・誘導可能な自律移動ロボットを導入したことは有効であったと考える。

ユーザの注意の向きの不確実性への対応

表 3 (case 2.1, 2.2) において、CA3 が説明中にユーザの注意の向きが CA3 に向けられているという確信度が低下したため、ユーザの注意の向きを確認するために入力を促している。このとき (case 2.1) ではユーザ 1 からの反応があったため、ユーザ 1 の注意の向きに関する確信度が高くなり説明を継続できている。一方、(case 2.2) では、CA3 はユーザ 2 の注意が自分に向けられていないと判断し RA にユーザの探索を依頼することにより、一時的に注意を失ったユーザ 2 に対して RA が案内を継続することができている。このように、AIDA では確信度を導入したことにより、時間経過とともに失われる可能性のあるユーザの注意の向きの不確実性に対応できていることが確認された。

本実装ではユーザの注意の向きを認識するために、キーボード入力を促す手法をとった。この催促を無視されればそれ以上催促を繰り返すことはなく、押しつけがましい印象を与えることはなかったが、たとえば音声認識を利用することにより、ユーザの発する相槌を注意の認識手法として利用できれば、よりさりげない対応が可能になると考えられる。いずれにしても AIDA で提案した、belief 関数による注意喚起のメカニズムは利用可能であり、今後入出力機器の工夫により、ユーザに違和感・繁雑感を与えない、より自然な注意の認識手法を検討する必要があると考えられる。

6. おわりに

本論文ではユーザの行動の不確実性に対応した実世界指向分散 HIS AIDA を提案した。AIDA の特徴はマルチエージェントシステムによるインタフェースエージェント間の協調、ユーザの位置の不確実性ならびに注意の向きの不確実性への対応である。さらに本研究では、AIDA を用いて研究室案内システムを設計・実装し、実験により AIDA の有効性を確認した。

本研究ではユーザのシステムに対する注意の有無を、ユーザの体の向き、ならびにシステムとユーザ間でのインタラクションの有無により判断できるものと仮定し、この範囲に限っては有効性を示すことができた。しかしながら、たとえユーザがインタラクションを行っていたとしても、説明の内容に興味を失っている場合も考えられる。ユーザの注意に関して、さらなる考察が必要であるように思われる。今後アプリケー

ションの開発を通して、さらに検討を行う予定である。

謝辞 ユーザ認識システムに関してアドバイスいただいたNTTコミュニケーション科学研究所平松薫氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 暦本純一: 実世界指向インタフェースの研究動向, コンピュータソフトウェア, Vol.13, No.3, pp.196-210 (1996).
- 2) Rekimoto, J. and Nagao, K.: The World through Computer: Computer Augmented Interaction with Real World Environments, *Proc. UIST'95 ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.29-36 (1995).
- 3) Long, S., Aust, D., Abowd, G. and Atkeson, C.: Cyberguide: Prototyping Context-Aware Mobile Applications, *ACM CHI '96 Companion*, pp.293-294 (1996).
- 4) Smailagic, A. and Siewiorek, D.: Modalities of Interaction with CMU Wearable Computers, *IEEE Personal Communications*, pp.14-25 (1996).
- 5) Weiser, M.: 21世紀のコンピュータ, 日経サイエンス, Vol.11, pp.60-70 (1991).
- 6) Weiser, M.: Some Computer Science Issues in Ubiquitous Computing, *Comm. ACM*, Vol.36, No.3, pp.75-84 (1993).
- 7) Lamming, M. and Flynn, M.: "Forget-me-not": Intimate Computing in Support of Human Memory, *Proc. FRIEND21, '94 International Symposium on Next Generation Human Interface*, Vol.11, pp.60-70 (1994).
- 8) Brooks, R.: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol.2, No.1, pp.14-23 (1986).
- 9) Downing, C.: Expectancy and Visual-Spatial Attention: Effects on Perceptual Quality, *Journal of Experimental Psychology*, Vol.14, No.2, pp.188-202 (1988).
- 10) Hiramatsu, K. and Anzai, Y.: User Identification in Human Robot Interaction Using Identification Pendant, *6th International Conference on Human-Computer Interaction*, Yokohama, Japan, pp.237-242 (1995).
- 11) 山崎信行, 安西祐一郎: パーソナルロボット用機能別並列計算機アーキテクチャ: *ASPIRE*, 情報処理学会論文誌, Vol.37, No.1, pp.81-91 (1996).
- 12) 矢向高弘, 菅原智義, 安西祐一郎: PULSER: リ

アクティブシステムの構築に適したオペレーティングシステム, コンピュータソフトウェア, Vol.11, No.1, pp.24-35 (1994).

(平成9年6月27日受付)

(平成9年12月1日採録)



岩倉 裕子

昭和49年生。平成9年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。現在同大学大学院理工学研究科計算機科学専攻修士課程在学中。



白石 陽

昭和46年生。平成6年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。平成8年同大学大学院理工学研究科計算機科学専攻修士課程修了。現在同研究科計算機科学専攻博士課程在学中。



中内 靖 (正会員)

昭和38年生。平成3年慶應義塾大学大学院電気工学専攻修士課程修了。平成5年同大学大学院計算機科学専攻博士課程修了。同年防衛大学校機械工学教室助手。平成6年より同大学校講師。現在に至る。マルチエージェントインタフェース, 自律移動ロボットの研究に従事。工学博士。日本ロボット学会, 電子情報通信学会, ACM等各会員。



安西祐一郎 (正会員)

昭和21年生。昭和49年慶應義塾大学大学院博士課程修了。昭和63年より慶應義塾大学理工学部教授。平成元年より同大学大学院計算機科学専攻教授兼任。この間昭和56~57年カーネギーメロン大学客員助教授。計算機科学, 認知の情報処理過程の研究に従事。工学博士。日本ロボット学会, 電子情報通信学会, 日本神経回路学会, 日本心理学会, ACM, IEEE等各会員。