

人間・機械の共生のための知識的環境の提案と実現の試み

武田 英明[†] 小林 展英^{†*} 松原 慶幸^{†**} 上野 敦志[†]
西田 豊明[†]

The Knowledgeable Environment: Environment for Human-system Co-existence

Hideaki TAKEDA[†], Nobuhide KOBAYASHI^{†*}, Yoshiyuki MATSUBARA^{†**}, Atsushi UENO[†], and Toyooki NISHIDA[†]

あらまし ここでは人間と機械が共生するための環境として知識的環境というものを提案し、その実現の試みについて議論を行う。知識的環境においては、環境を知識レベルのコミュニケーションを行うマルチエージェントシステムとしてモデル化する。すなわち、環境中の各システムおよび情報サービスを行うシステムをオントロジーを共有するエージェントとして構成する。エージェント間の協調はメディアータというタスクの補完・分解・配分を行なうソフトウェア・エージェントによって実現される。人間とシステムのインタラクションは人間・ロボット間のマルチモーダル・インタラクションに加え、ウオッチャという環境を監視して人間の要求を検知するエージェントを導入することで、偏在的なインタラクションを実現している。

キーワード マルチエージェント系, オントロジー, ロボット, 協調, ヒューマンロボット・インタラクション

1. はじめに

現在、我々の生活の中に計算機や計算機で制御される機械が多く入り込んでいる。特に今後はロボットに代表されるより高度で知的なシステムが増えてくると思われる。そこで、我々はこのような人間・機械が共生する環境を構築することを試みている。図1はその目指す方向をイメージ図として表現したものである。環境中にはさまざまな能力を持つロボットや機械が存在し、人間もその中で活動している。人間は必要に応じて機械と協調してさまざまな作業を行う。機械もそれぞれ作業可能なことが限定されているので、互いに協力して作業を行う。

この環境構築にあたっては次のような要求を満たすべきである。まず、環境のモデル化においては、単に物理的なモデル化ではなく、人間の認識に沿ったモデル化が必要である。たとえば、ある本を探すときに、必ずしも物理的に同一の本を探す必要はない。同一の内容の本であればよいし、電子的な媒体でもよい。ま

た、変化する多様な状況に対処する必要がある。現在その中にある事柄だけを対象とするだけでなく、今後環境にはいろいろな事柄にも対応できるようなオープンな環境である必要がある。さらに、人間も環境の一部として含む必要がある。人間も環境の一部であるが、人間は多様な振る舞いをするので、システムとのインタラクションは単一ではなく、その時々にあわせたさまざまな方法が必要である。

ここでは上記のような要求を満たすような環境を知識的環境(The Knowledgeable Environment)と呼び、知識レベルのコミュニケーションを行うマルチエージェントシステムとして実現する。具体的には、環境中の各システムおよび情報サービスを行うシステムをオントロジーを共有するエージェントとしてモデル化する。人間とシステムは柔軟にインタラクションを行うと共にシステム間では作業を協調的実行する。

2. 実世界エージェントのためのマルチエージェント・アーキテクチャ

我々はこれまで実世界エージェントのためのマルチエージェント・アーキテクチャを提唱してきた[4][5]。基本的な考え方は環境内の人間やロボット、機械などをエージェントとしてモデル化することで知識レベルのコミュニケーションを実現するものである。エー

[†] 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科, 奈良県
Graduate School of Information Science, Nara Institute of
Science and Technology, 8916-5 Takayama, Ikoma, Nara,
630-01 Japan

* 株式会社 デンソークリエイティブ, 愛知県

** 株式会社 デンソー, 愛知県

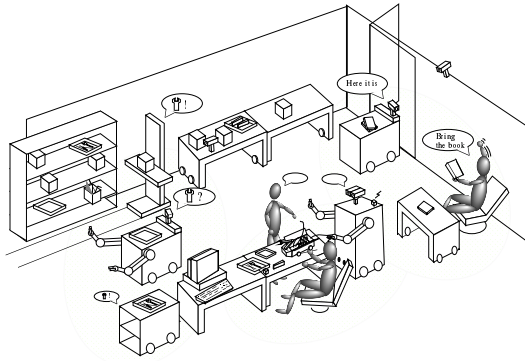


図1 知識的環境のイメージ図

Fig. 1 Image of the knowledgeable environment

エージェント間コミュニケーションはKQML [1]で行なわれる。

ここでは主にソフトウェア・エージェントと実世界エージェントという二つの種類のエージェントを用意している。ソフトウェア・エージェントは実世界に対する直接のアクセス手段を持たないもので、エージェント間の協調などの役割を果たす。実世界エージェントはカメラやセンサ、モータやスピーカといった実世界の情報獲得、働きかけなどの手段をもったものである。

現在、実世界エージェントとしては6自由度のマニピュレータを持つ走行型ロボット Kappal_a、マニピュレータのない走行型ロボット Kappal_b と1台の自動式棚、1台の自動式ドアを用意している。

全ての実世界エージェントはKQML エージェントとしてモデル化した。すなわち、エージェントはKQML メッセージを送受する [1]。実際の実装には実世界エージェントはKQML 処理サブエージェント、データベース・サブエージェント、ハードウェア・サブエージェントに分けて行なっている。これはエージェントの機能を搭載型計算機と他の計算機で分担するためである。また、同じくKQML のよる情報エージェントとしてイメージ処理エージェント、対象データベース・エージェント、ユーザインタフェース・エージェント、メディアータ (4章参照)、ウオッチャ (5章参照) などを用意した。

3. 実世界エージェントの協調のための知識

一つのタスクを複数のエージェントによって行なわせるためには、お互いの行為が理解できなければならぬ。このためにエージェント同士がコミュニケー

ションを行なうことが必要である。複数のエージェントがお互いの行為を理解し合うには、単にコミュニケーションのプロトコルや言語が共通であるだけでは不十分で、概念の体系を共有する必要がある。この概念の体系をオントロジーと呼ぶ。

人工知能におけるオントロジーはこれまで主にソフトウェア・エージェントの問題に適用されてきており、それはエージェントが操作する対象のオントロジーであった [2] [3]。しかし、この対象のオントロジーだけでは実世界エージェントのコミュニケーションの実現には不十分である。実空間で複数のエージェントが共存するには、空間の概念を共有する必要がある。さらにお互いの行為を理解しなければ協調作業はできないので、行為の概念も共有する必要がある^{註1)}(図2参照)。

このようなオントロジーはエージェント間で協調動作を実現するために、エージェントの能力とタスクの記述に使われる (4章参照)。

3.1 対象に関する概念

共有すべき対象に関する概念は対象の分類 (taxonomy) と対象の属性の概念の2種類である。しかし、エージェントの物理的構造や情報処理能力の違いによって、理解できる対象は異なってくる。対象分類においては is-a 関係を用いて対象を階層的に記述する。ここで抽象度の高い対象は多くのエージェントに共有されるが、より具体的な対象の理解はエージェントの能力に依存する。共通な対象の属性として、位置、色、重さなどがある。このうち位置としては現在位置とよくある場所 (デフォルト位置) がある。対象の属性も同様に異なる抽象度で記述する。

3.2 空間に関する概念

空間に関する概念も共有すべきものであるが、これもエージェントの能力によってその記述が異なってくる。例えば、地図示された経路をもとに移動するエージェントにとってはその経路が空間の記述であるし、相対的な位置しか理解しないエージェントもありうる。ここでは、共有のための空間概念として以下の2つを用意した。

- 前置詞表現 : 対象と前置詞で対象からの相対的位置を示す。ここでは、at, on, in, in-front-of, behind, to-the-right-of, to-the-left-of の7つを用意した。例えばエージェント A の前ならば in-front-of (agent-a) と表現する。

註1) : もうひとつ重要な概念は時間であるが、本研究では時間は行為の共有として暗黙的に記述される。

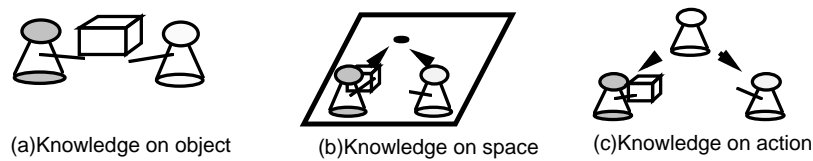


図2 3種類の共有すべき概念
Fig. 2 Three types of concepts

● 行為表現 特定の行為が実現できる位置を、行為と対象の組合せで表現する。例えばエージェント1とエージェント2が出会う場所をmeetpoint (agent-1, agent-2)と表現する。実際の位置は行為の主體のエージェントによって異なるが、行為の達成という意味では十分である。

3.3 行為に関する概念

行為の概念は行為の名前と主體や起点や終点などの行為に関わる属性で定められる。また行為間の関係は行為の分解関係として記述される。行為も同様にエージェントの能力によって理解可能な範囲が異なってくる。

3.4 共有概念と非共有概念

以上で見てきたように、ここでの概念の共有とは、それぞれのオントロジー（概念の体系）においてすべてが共有されるという意味ではなく、それぞれにエージェントのオントロジーに共通するものがあるという意味である。

実際には各エージェントのオントロジーはエージェント独自の表現であり、そこでの概念をを共通の表現の概念に関連づけていることで、オントロジーの共有を行なっている。

4. タスク遂行における協調

このようなエージェント間で具体的に協調が必要とされる場合とは、タスクを遂行する場合である。エージェントと人間との協調については4章で述べる。

タスク遂行の際の協調は一つのタスクあるいは目標を同じとするタスクの遂行に参加する複数のエージェント間の協調（友好的な協調）と、目標の異なるタスク遂行に参加するエージェント間の協調（排他的な協調）に分けて考えることができる。ここでは、前者をタスクを仲介するメディエータによって実現し、後者はメディエータ同士の協調として実現する。

すなわち、メディエータは人間あるいはエージェントが発生するタスク毎に生成され、各メディエータは

そのタスクの実現に必要なエージェントを確保し、制御しようとする。もし、メディエータの要求同士が衝突する場合はメディエータ同士が通信して解決する。

メディエータは、与えられたタスクを複数のエージェントの一連の実行可能な行為として変換タスクの仲介し、実行する。メディエータはさらにタスクの分解などを行なう計画部とタスクの実行を制御する遂行部にわかれる。ここではタスクは行為記述として与えられるものとする。タスクのため計画生成とは以下の4つからなる。

1. 対象属性の補完 行為で表現されたタスクに含まれていない対象の属性を補完する。これは対象オントロジーに基づく。
2. エージェントの割当 各行為を実行可能なエージェントを探し、割り付ける。このためには各エージェントがどのような行為実行能力を持っているかを予め知っておく必要がある。このための知識がエージェント能力知識であり、対象・空間・行為のオントロジーの概念を用いて記述される。また、エージェントが他のメディエータに束縛されていれば利用不可能なので、各エージェントに問い合わせる。もし、エージェントが他のメディエータに束縛されている場合は、そのメディエータに問い合わせ、束縛期間を得ることにより利用可能かを判断する。
3. 行為分解 行為を複数の別の行為に分解する。このための情報は行為のオントロジーにある行為間の関係である。この際に分解された行為間には属性の値の共有という形で制約がつけられる。
4. エージェント・オントロジーへの変換 1から3の処理の結果として得られるエージェント毎の行為記述を各エージェントが理解する記述に変換する。

エージェントの割当と行為分解は同時に行なわれる。すなわち、ある行為が与えられた時、その行為を実行できるエージェントがあればエージェントの割当を行なうし、なければその行為を分解して、また割当を試みる。全ての行為に対するエージェントの割当が完了

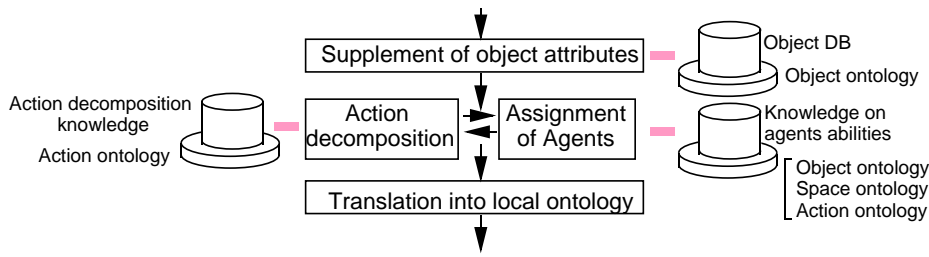


図3 タスク仲介の流れ
Fig. 3 Mediation flow

```

(fetch (object solaris)
 (destination human1))
↓
((move (subject Kappa1b)
 (from (at Kappa1b))
 (to (in_front_of Rack)))
 (handover (object solaris)
 (from_place (on Rack))
 (to_place (on Kappa1b))
 (subject Rack))
 (move (subject Kappa1b)
 (from (at Kappa1b))
 (to (in_front_of Human2)))
 (tell (subject Kappa1b)
 (at Kappa1b)
 (content (talk Here_you_are))))
    
```

図4 タスク分解の例
Fig. 4 An example of completion and decomposition of tasks

した時終了する(図3. 生成した計画の例を図4に示す。

生成した計画の実行は以下の手順で行なわれる。まず、すべての利用するエージェントを計画の開始からエージェントが不用になるまでの期間、束縛する。次に計画である行為列の行為を順に1つずつ実行するよう各エージェントに依頼し、その終了をまって次を実行する。なんらかの事情で計画中の行為が失敗に終ると、計画部に失敗が伝えられ、再計画が行なわれる。

複数のエージェントが関わるタスクの遂行のプランニング手法として考えた場合、今回のタスク単位によるプランニング、集中型スケジュールリングの中間にあたる手法であるといえる。これら3つの方法論の違いを表1に示す。

集中管理型では全体の整合性の維持や資源を効率良く使うという点で有効であるが、変化に対する柔軟性/即応性や自律性に乏しいので、工場などのよく管理された環境に適した方法である。エージェントによる分

散プランニングでは、環境変化に対する柔軟性/即応性や自律性に優れているものの、全体の整合性維持や高密度のプランニングは難しい。このため、環境あるいはエージェントが動的に変化する場合に向いているといえる。

ここで行なったタスク単位の協調では、メディエータを単位と見るとメディエータが各々プランニングをするので分散型のプランニングである。すなわち、粒度が荒いものの分散型であるので、ある程度の環境の変化に対する即応性/柔軟性があるが、作業の密度は集中型ほど高くすることはできない。また、1つのメディエータの内部では集中型プランニングを行なっている。このため、個々のメディエータでのプランニングは容易であるものの、プランニングの柔軟性は乏しい。

本研究が想定する環境とは人間と生活する環境である。すなわち、工場などであるような緻密な作業密度は必要ない。環境は動的に変化するものの、変化の速度は一つ一つのタスクの遂行時間に比べれば遅い。タスクを単位とするプランニングは、このような環境には適した特徴をもっているといえる。

5. 人間・システム間インタラクション

人間にとってはシステムと人間と同様な手段でコミュニケーションが図れることが望ましい。音声や身振りなどのいわゆるマルチモーダル・コミュニケーションは無論必要であるが、人間間のコミュニケーションは位置関係といった物理的な関係や特定・非特定といった論理的関係の変化にも対応可能な柔軟性がある。このようなさまざまな物理的・論理的関係において可能な遍在的なインタラクションを実現する必要がある。

このような遍在的なインタラクションは3つの種類に分けて考えることができる。まず第一は人間とロボットが直接向かい合っ行って行なうインタラクションで、親密

表1 協調の方法の比較

Table 1 Comparison of cooperation methods

	行動の 整合性	作業の 密度	協調動作 生成の容易さ	即応性/ 柔軟性	自律性	適する環境
集中管理型 タスク単位協調	大	高	大	小	小	工場など管理された環境 人間が共存する生活環境など
エージェント単位協調	小	低	小	大	大	変化の速い環境, 通信が制約された環境

的インタラクション (intimate interaction) と呼ぶことにする。多くの研究での人間・ロボット間インタラクションはこの種類である。これに対して目の前にいないロボットとインタラクションを行ないたい場合がある。これを緩やかなインタラクション (loose interaction) と呼ぶことにする。さらにインタラクションを行なっていくうちにいまインタラクションに参加しているメンバー以外の協力が必要となる場合がある。これを協調的インタラクション (cooperative interaction) と呼ぶことにする。

5.1 親密的インタラクション

人間とロボットの直接のインタラクションである親密的インタラクションの手段としては、音声と身振りをを用いた。身振りの理解は以下に示すような比較的単純な方法によって、人間の両手の動きのみを検知している。

まずエージェントは画像中の黒い部分を人間の頭の位置と仮定して、その両脇を手のある範囲として同定する。次にオブティカル・フローにより手の動作方向を検知する。検知結果は次のような動作列である。

(move (object righthand)(direct up))

(move (object lefthand)(direct down))

(move (object bothhand)(direct left))

この検知した動作列を動作列と身振りを対応つける身振りの知識と比較することで、「握手する」、「手を振る」などの身振りを同定する。

同定された身振りがどういう意味を持つかはそのときの状況に依存する。エージェントはインタラクション毎に定義された状況遷移ネットワークを用いることで、状況に依存した身振りの理解を行なう。エージェントは状況遷移ネットワークのいずれかのノードを現在ノードとする。状況遷移ネットワークの各リンクは人間の身振りと他のセンサの値に条件として付記しており、それらが満たされた時、リンクの先のノードへ移動する。身振りは複数のリンクで利用可能であり、このための状況によって身振りの解釈が異なる。図5にこのインタラクションの例を示す。



図5 親密的インタラクションの例

Fig. 5 An example of intimate interaction

実世界エージェントは主に2種類の行為を行なうことができる。一つは情報的行為 (informative action) で、環境に物理的变化を起こさない行為である。「はい」「いいえ」などの首を使った行為、「ばいばい」などの腕を使った行為、音声生成などが含まれる。もうひとつは影響を与える行為 (effective action) で、「ものを掴む」、「どこかへ移動する」などの行為である。これらのうちひとつのエージェントだけでできない行為は、第4章で述べたようにメディアータなどのソフトウェア・エージェントを用いて実現される。

5.2 緩やかなインタラクション

緩やかな人間・ロボット間インタラクションでは人間とロボットが離れている場合であり、ロボットは直接人間を見ることはできない。そこで、ここではウオッチャという部屋を常に監視するエージェントを導入する(図6参照)。

ウオッチャはカメラを使い、部屋でおきる事象を監視する(図7参照)。ウオッチャは他からの要求を検知すると、タスクを生成してメディアータ(第3章参照)に渡す。要求の検知はカメラからの認識か他のエージェントからの通信による。カメラによる認識は親密的インタラクションと同様に人間の動作を認識する。

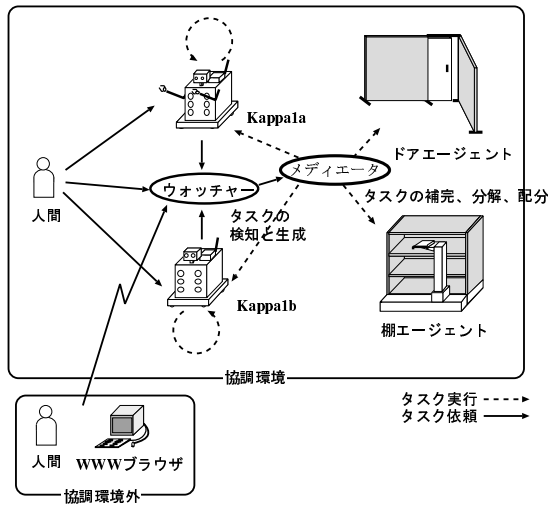


図6 人間・システム・インタラクションのためのソフトウェア構成
Fig.6 The architecture for human-system interaction



図7 ウオッチャによる監視
Fig.7 Scene by camera for watcher

現在、二つの領域(図7の矩形部)を監視している。認識された動作からタスクを生成するための知識の例を図8に示す。この例は「もし誰かが手を振っているならば、Kappalaがその人のところへいくというタスクを生成せよ。」ということを示す。最後にウオッチャは、メデイエータを一つ起動して、作成したタスクをそのメデイエータに引き渡す。

5.3 協調的インタラクション

インタラクションは状況に応じて、その参加者を増やす必要がある。例えば、ものを運べないロボットに

```
(define Come_on
  (content
    ((behavior wave)
     (source camera)
     (client ?human)))
  (task
    ((subject camera)
     (come (subject kappala)(destination ?human))))))
```

図8 タスクの生成のための知識
Fig.8 Knowledge on task composition



図9 緩やかなインタラクションの例
Fig.9 An example of loose interaction

ものを運ぶよう人間が依頼した場合、ロボットは他のものを運べるロボットを呼び、そのロボットがものを人間にもってきて渡す必要がある。

このような場合、本研究では、ウオッチャを介して他のエージェントへタスクを依頼する。ウオッチャは自らタスクを検知するだけでなく、他のエージェントからのタスクを受け付けることもできる。実世界エージェントは人間からの要求が自分だけでは解決できない場合、その要求を実現するというタスクを一つ作り、ウオッチャに渡す。ウオッチャは、先の場合と同様に、そのタスクを処理するためのメデイエータを生成して、そのタスクを引き渡す。この方法により、各エージェントは複数エージェントが必要な要求を人間から受けとった場合でも、その要求を実現することができる。

図10は協調的動作の実現の例である。人間とあるエージェント(Kappala)が面と向かっており、人間はそのエージェントにそのエージェントができない要求

棚にある本を取ってくる)を出すという状況である。図中の番号は以下の番号に対応する。

(1) 人間が行動型エージェント Kappa1a に身振りマニュアルを取るよう依頼する。

(2) 行動型エージェントはその要求を理解するが、そのマニュアルは棚にあり自分は棚から受渡しができないので、自分では解決できないことがわかる。そこで、タスクを生成してウオッチャに渡す。

(3) ウオッチャはメディアータを一つ起動してそのタスクを渡す。

(4) メディアータはタスクを補完・分解して、Kappa1b がマニュアルを取りにいくというプランを生成し、実行する。

(5) メディアータは先のプランに実行には Kappa1a が邪魔であることがわかる。そこで Kappa1a を移動するタスクを生成してウオッチャに渡す。

(6) ウオッチャは新たなメディアータを生成してタスクを渡す。

(7) 2 番めのメディアータもタスクを補完・分解して、プランを生成して、実行する。

協調的なインタラクションは単に複数のロボットが利用可能という意味だけでなく、ロボットの物理的能力の限界を補完するという意味でも重要である。すなわち、自分でできないことも他のエージェントに依頼して結果的に解決可能であるので、人間はロボットの能力を推測せずに単に目の前のロボットに依頼するだけでよい。

6. おわりに

ここでは人間と機械が共生するための環境として知識的環境というものを提案し、その実現の試みについて議論を行なった。

ここでの実現の鍵は実世界をマルチエージェントとしてモデル化することにある。その利点の一つは、実世界内のインタラクションだけでは難しい点をエージェント間通信に担わせるということである。例えば部屋を常に観察するという事はロボット単体では難しいタスクであるが、それを専門に行なうエージェントとそれとの通信によって容易に実現可能である。

もう一つの利点は、ソフトウェアエージェントとも含めて構成することにより物理的構成とは異なる機能分散がはかれるということである。多くの研究ではロボットをどれだけ自律的にできるかが研究課題とされてきた。本研究ではロボットそれ自身の知能化 (こ

での実世界エージェント)の程度は必ずしも重要ではない。むしろ、環境の知能化、仲介サービスなどのソフトウェア・エージェントなどと一緒に働く時の振舞いの高度化が重要である。すなわち、知能的振舞いを実現する機能をエージェントに分散し、それらの協調として実現することができる。

文 献

- [1] Tim Finin, Don McKay, Rich Fritzon, and Robin McEntire. KQML: An information and knowledge exchange protocol. In Kazuhiro Fuchi and Toshio Yokoi, editors, *Knowledge Building and Knowledge Sharing*. Ohmsha and IOS Press, 1994.
- [2] Thomas R. Gruber. Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. Technical Report KSL 93-4, Knowledge Systems Laboratory, Stanford University, 1993.
- [3] Hideaki Takeda, Kenji Iino, and Toyoaki Nishida. Agent organization and communication with multiple ontologies. *International Journal of Cooperative Information Systems*, Vol. 4, No. 4, pp. 321-337, December 1995.
- [4] Hideaki Takeda, Koji Iwata, Motoyuki Takaai, Atsushi Sawada, and Toyoaki Nishida. An ontology-based cooperative environment for real-world agents. In *Proceedings of Second International Conference on Multiagent Systems*, pp. 353-360, 1996.
- [5] 武田英明, 岩田浩司, 鷹合基行, 沢田篤史, 西田豊明. 共有知識に基づく実世界エージェントの協調機構. 人工知能学会全国大会 (第 10 回) 論文集, pp. 453-456, 1996.

平成年月日受付, 月日再受付)

武田 英明 (正員)

昭 61 東大・工・精密機械卒. 昭 63 同大学院修士課程修了. 平 3 同大学院博士課程修了. 平 3 財団法人日本システム開発研究所嘱託研究員. 平 4 ノルウェー工科大学 doctoral fellow. 平 5 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 助手. 平 7 年同助教授, 現在に至る. 平 4-5 ノルウェー王立科学技術研究会議 research fellow. 東京大学工学博士. 知識の共有と再利用, 設計学, 知的 CAD などの研究に従事. 平 7 人工知能学会全国大会優秀論文賞. 人工知能学会, 精密工学会, AAAI 各会員.

上野 敦志

平 3 東大・工・航空卒. 平 5 同大学院修士課程修了. 平 8 同大学院博士課程単位取

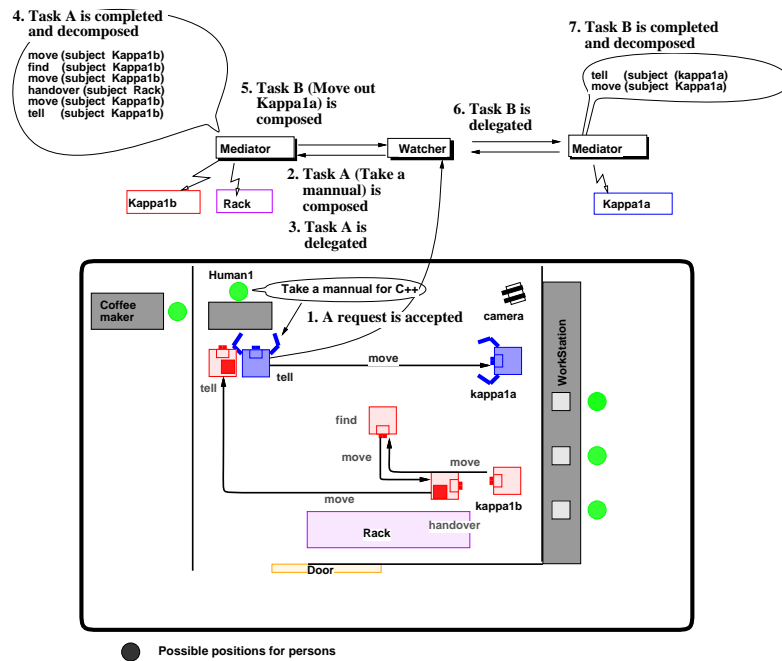


図 10 協調的インタラクションの例
Fig.10 An example of cooperative interaction

得退学. 同年より, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手, 現在に至る. ロボットの学習, 自律システムなどの研究に従事. 平 8 人工知能学会研究奨励賞. 人工知能学会会員.

小林 展英

平 7 名工大・工・知能情報システム卒.
平 9 奈良先端科学技術大学院大学博士前期課程終了. 平 9 株式会社 デンソークリエイト入社.

松原 慶幸

平 7 名工大・工・知能情報システム卒.
平 9 奈良先端科学技術大学院大学博士前期課程終了. 平 9 株式会社 デンソー入社.

西田 豊明 (正員)

昭 52 京大・工・情報卒. 昭 54 同大学院修士課程修了. 昭 55 同大学院博士課程退

学, 同年より, 京大・工助手. 昭 63 助教授. 平 5 奈良先端科学技術大学院大学教授, 現在に至る. 京大工学博士. 昭 59 から 1 年間 Yale 大学客員研究員. 知識の共有と再利用, 知識メディア, 定性推論などの研究に従事. 昭 63, 平 1, 平 7 人工知能学会全国大会優秀論文賞. 昭 63 人工知能学会論文賞. 平 2 情報処理学会創立 30 周年記念論文賞. 著書「自然言語処理入門」(オーム社), 「定性推論の諸相」(朝倉書店) など. 人工知能学会, 情報処理学会, 認知科学会, 日本ソフトウェア科学会, 電子情報通信学会, 日本言語処理学会, AAAI, ACL, IEEE 各会員. 人工知能学会担当編集委員. 電子情報通信学会英文誌編集委員. Journal of Artificial Intelligence Research Associate Editor, QR '94 Co-Chair.