

## 人と機器と環境の相互作用を考慮したトライフェースの提案

### A proposal of the Triface which considers the interactions between human, appliances and environment

森川 幸治      岡 夏樹  
Koji Morikawa      Natsuki Oka

松下電器産業 (株) 先端技術研究所

Advanced Technology Research Laboratories, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

**Abstract:** The concept "Triface", which can provide unified view of the interactions between Human, Appliances and Environment, is proposed and discussed. Traditional concept "Interface" mainly focuses on the relationship between two elements, e.g. human and robot, human and computer, human and machine. The Triface includes the interactions with the third element: environment, which does not belong to human or appliances. The environment can play an important role to the human-machine interactions, especially in the case when an appliance has to learn both a human and an environmental model autonomously.

We discuss the variations of the interactions in the Triface, and show the concept will help the agent in the appliance to learn how to communicate to the human and how to operate the environment. We also introduce ongoing projects, which are done on the experimental platform developed for the Triface researches, and discuss the similarity of the framework to the infant developmental processes.

## 1. はじめに

本稿では、人間と人間が使用する機器と環境との三者間の相互作用を統一的に考えるトライフェースのコンセプトを提案し、この考え方によってより使いやすい機器が構成可能になることを示す。

近年、対話や掃除等の機能を持つロボットや携帯電話やPDAなどの情報端末に搭載されるソフトウェアエージェントなどのように、ユーザに対して機能やサービスを提供する知的エージェントの必要性が高まっている。これらは従来のインタフェースに加えてエージェント機能を機器に搭載させることで、人間によってより使いやすい機器を目指したものである。この知的エージェントは、ユーザと情報交換し、ユーザの代

わりに様々な手間のかかるタスクを助けたり代行したりする。このエージェントは将来的にはパートナーや秘書や友達として身近な存在になると考えられる。

将来のエージェントは、ユーザとの対話が自然にできるだけでなく、ユーザの要求への応答やユーザの満足度を高めるための自発的な行動として、自律的に外部環境に働きかける能力が必要になる。このような行動を実現するためには、エージェントはユーザに関する知識と同様に環境に関する知識も持つ必要がある。この知識は具体的には、ユーザに関する知識であれば、ユーザの日常的な行動パターンや、ユーザの嗜好などで、環境に関する知識であれば、どうすれば環境に存在する物体が操作できるかなどのルールを指す。本稿では、ユーザに関する知識を「ユーザモデル」と呼び、環境に関する知識を「環境モデル」と呼ぶことにし、知的エージェントが、いかにユーザモデルと環境モデルを持てるかを課題と考え、以下議論を進める。

エージェントにモデルを与えるには主に2つのアプローチが考えられる。ひとつは、事前にモデルをプログラムにより与える方法で、もうひとつは相互作用から学習する方法である。問題やタスクが小さい場合は、モデルは事前に設計者によってプログラムできるが、

森川 幸治 松下電器産業 (株) 先端技術研究所  
〒619-0239 京都府相楽郡精華町光台 3-4  
Tel: 0774-98-2525, Fax: 0774-98-2581,  
E-mail: morikawa.koji@jp.panasonic.com

岡 夏樹 京都工芸繊維大学 工学学部 (2003年4月より)  
〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町  
Tel: 075-724-7477, Fax: 075-724-7400,  
E-mail: oka@dj.kit.ac.jp

実世界に関する多くの問題では事前のプログラムの準備は難しい。なぜなら、必要とされるプログラム量は膨大なものになること、エージェントは設計者が想定していない状況に陥る可能性が高いからである。我々は、もうひとつのアプローチである相互作用からの学習に着目し、トライフェースの考え方がどのようにモデルの学習に応用されるかを示す。

一般的に、「インタフェース」は、2つの要素間の相互作用を扱っている。例えば、人間とロボット、人間とコンピュータ、人間と機器などである。本稿が想定しているインタフェースは、機器とその機器を使うユーザとの間のインタフェースである。機器の例としては、エージェント機能が搭載された情報端末や、自律動作が可能なロボットなどが挙げられる。トライフェースでは、ユーザと機器の関係に加えて、ユーザと機器以外の「環境」の要素も明示的に捉えて、環境との相互作用もシステム設計やモデル学習に組み込むことを特徴としている。

人間と機器の相互作用は重要な要素であるが、人間が機器と相互作用をしている時間は毎日の暮らしの中では一部を占めているに過ぎない。機器の視点から考えると、もし機器が人間に本当に役に立つレベルで適応しようと考えた場合、人間が機器に対して行っている相互作用（機器操作など）のみの情報では十分とは言えない。なぜならユーザの嗜好や機器への相互作用の内容は、機器とは関わりのない経験によって決まることが多いからである。例えば、機器とは関係なく外で体験してきたこと（仕事で疲れている、楽しく遊んできた、など）が、見たいテレビ番組や情報端末へのアクセス内容に影響を及ぼすことが考えられる。このような観点から、機器のユーザへの適応のためには、機器は、機器と接触していないときにユーザが何を体験したかを知る必要がある。これをインタフェースにはない第3の要素である「環境」との相互作用により取得するのがトライフェースである。

また、エージェント機能を持つ機器は自分自身で、もしくはユーザの助けを借りながら環境にどのように働きかけるかについても学習しなければならない。これにより、環境にある物体の操作を可能にする。例えばエージェントが、ユーザの部屋の片付け動作を見ること（＝ユーザと物との相互作用の観察）で、エージェントが、机や椅子や衣類など、それぞれどこを持ってどう動かして片付けるかという片付け方（＝エージェントの物への相互作用の方法）が学習できるようになる。従来の機械学習の技術がこの環境モデルの学習に利用できる。

以下に本稿の構成を示す。次章では、従来のインタ

フェースとその相互作用について概観する。第3章では、トライフェースの提案と、トライフェースに含まれる各相互作用の説明と、それらの相互作用のモデル学習への利用方法について説明する。また、現在我々が取り組んでいるプロジェクトで行っている研究の紹介も行う。第4章では、トライフェースと乳幼児発達との関係について考察する。我々は社会的インタラクションが可能な機器を実現するためには、認知能力の発達過程の実装が重要であること[1]、また社会心理学が学習アルゴリズム構築の参考にされるべきこと[2]を指摘してきた。トライフェースに基づく機器（以下、トライフェース機器と呼ぶ）の学習の枠組みと、乳幼児の学習の枠組みは、相互作用の観点で比較すると類似点が多く、我々は乳幼児の学習戦略がトライフェース機器の学習にも応用できると考えている。

## 2. 二つの要素間の相互作用

従来は、インタフェース研究はその言葉の定義からも示されるように2つの要素間の相互作用についての研究である。例えば、人間と機器、人間と物、人間とロボットなどである。以下に代表的な2つの要素間の相互作用について説明する。(図1)ここではエージェント機能を持った機器をエージェントと呼んでいる。

### 人間と環境 (図 1a)

人間は常に人工物と自然物とが入り混じった環境に囲まれており、環境に対する働きかけと、環境からの情報取得が、人間と環境の相互作用である。

この相互作用において、設計者はどのようにユーザが人工物を使うかを考えてデザインを決定する。アフォーダンスやユニバーサルデザイン等は、類似のコンセプトと考えられる。相互作用（使用方法）は、ユーザの認知負荷が少なくなるようにデザインされるべきである。

### エージェントと環境 (図 1b)

一般的にはエージェントやロボットはよく整備された環境で、事前に決定されたルールに基づいて動作するとき、最もよく動作する。しかしながら、もし環境がエージェントにとって未知の場合は、エージェントは環境について学習する必要がある。

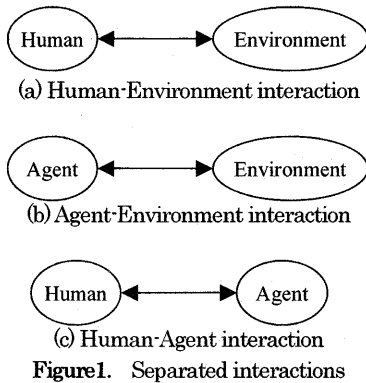
多くの場合、エージェントは環境に存在する物体を識別・認識し、各物体がどのようなルールに基づいて変化・移動・動作するかを学習しなければならない。多くの研究者によって、ロボット（エージェント）が

環境との相互作用を持ちながら環境について学習する手法の研究がなされている。

### 人間とエージェント (図1c)

ヒューマンエージェントインタフェースは多くの応用を含んでいる。例えば、対話、対話支援、各種家庭用サービス、情報取得支援、情報推薦などである。

良いヒューマンエージェントインタフェースを実現するためには多くの技術の統合が必要で、そのために必要とされる技術の大部分はさらに研究が必要である。例えば、ロボットでは人間の表情などのカメラで撮影された画像からの認識、自然な音声認識、人間に理解されやすい形態でのロボット側からの状態や要求の表出方法の実現など多くの課題を解決しないと良いインタフェースの実現は難しいと考えられる。



これまでにヒューマンとロボット (エージェント) のインタフェース研究では、いくつかのコンセプトが提案されてきた。"Interaction and Intelligence" [3] のプロジェクトでは、主にロボットの人間の相互作用の非対称性の解決が目的とされている。また、Artifact Intelligence [4]では active affordance による相互作用が提唱され、Mind Mapping [5] ではユーザの表情から心を読むことを扱い、Pro-active service robot [6] では健康のケアをするサービスロボットの実現が目的とされるなど多くの取組みがなされている。多くの研究者は環境との相互作用を非明示的に扱っており、インタフェース研究で環境とロボットの相互作用を明示的に扱う例は少ない。ロボットにおける模倣の研究 [10]等は、人間と環境との相互作用をエージェントの環境モデルの学習に利用した例と考えることができる。Telecommunicator [7]は、人間同士のコミュニケーションを支援する道具としてロボットを位置づけ、ロボットは環境と通信する能力を持つ。これは、拡張され

た Shared control [8] と解釈できる。

Shared control は人間のオペレータと、プラントの操作器と、操作対象になるプラントの三つの要素を扱っている。このパラダイムでは、人間のオペレータと操作器は同じインタフェースを通して、同じプラントを操作できる (図2)。この目的は、プラントの制御を、それぞれの操作者がお互いにカバーしあうことで、安定して行うものである。

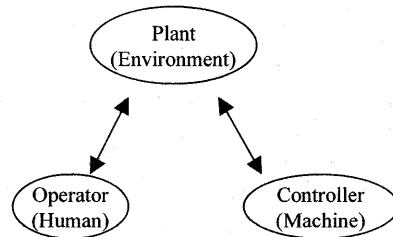


Figure2. Shared Control

トライフェースにおいては、その目的は Shared control とは全く異なっており、要素間の相互作用を利用した学習により、ユーザモデルや環境モデルを獲得し、ユーザに適応することである。

### 3. トライフェースの提案

我々は人間とロボットと環境の三者の相互作用を統一的に考えるトライフェースの考え方を提案する。(図3) この考え方では、エージェント機能を持つ機器や自律動作可能なロボットはユーザモデルと環境モデルの獲得のために、トライフェースに含まれるすべての相互作用を利用する。

これにより、相互作用に基づいてユーザ適応のためのユーザモデルと環境モデルの両方の学習法が構築可能になり、従来は考えにくかった、機器が自分で環境に対する相互作用を学習して自律的に働きかけるようにできるのが特徴である。例えば、家庭に置かれる機器で、環境モデルが学習できれば、他の機器や家庭内の物に対する働きかけ方を学習でき、ユーザに新しいサービスや機能として提供できるようになることを意味している。同様に、ユーザモデルが学習できれば、ユーザとのコミュニケーションやサービス提供能力が向上させられる。

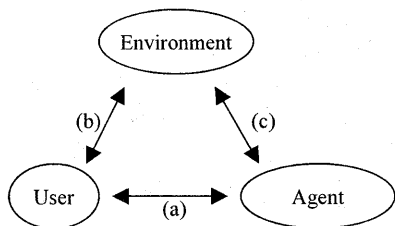


Figure3. Triface

これまでの機器は、機器とユーザとの関係において適応やサービス提供を考えられてきたために、それぞれの機器が独自でユーザとの相互作用能力を高めるようになってきていた。その負の側面としては、例えば、それぞれの機器が多機能リモコンや対話能力を持ち、特定の機器との相互作用のための手段はリッチになったが、ユーザからすると、それぞれの機器と多機能リモコンで個別に相互作用を行うなどの必要性が生じ、かえって煩雑な操作になってしまうことがある。

これに対して、トライフェースでは機器がユーザの行動とともに、環境の様子も把握できるようになるため、周りの状況を把握した上で、ユーザへの働きかけが可能になる。さらに、それぞれの機器がトライフェースに基づくエージェント機能を搭載した場合、各機器は独自に外部環境へのモデルを作成しながら、ユーザに対しては、常に全体を考えた適切なサービスが提供されることになる。

以下、具体的にトライフェースに含まれる相互作用の内容と、その相互作用がいかにモデル学習に利用されるかを示す。

### 3.1 トライフェース内部の相互作用とその機能

まず、我々は図4に示すようなシミュレーションのツールを開発し、そのツールを用いた研究を進めている。タスクは、図中に示されたボールをパドルの操作により打つ、ブロック崩しゲームに似たタスクである。ボールは直進して、壁もしくはパドルで反射する。ユーザもエージェントも自分が操作可能なパドルを持っている。パドルがボールを打つとシミュレーションシステムから正の報酬が与えられる。

このプラットフォームにおける変数は、ボールの座標と移動する方向 ( $B_x, B_y, b_\theta$ )、ユーザが操作するパドルの座標 ( $u_x, u_y$ )、エージェントの操作するパドルの座標 ( $a_x, a_y$ ) である。シミュレーションプラットフォームは、環境の変化を計算し、人間には、画像表示により、ロボットには変数の値を直接伝達する。

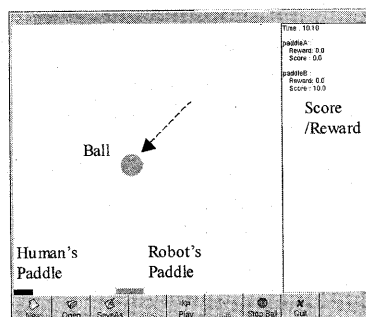


Figure4. Developed experimental platform

ユーザと環境のインターフェースはディスプレイとキーボードである。ユーザとエージェントのインターフェースは音声コマンドと、パドル動作の提示である。

この実験プラットフォームの特徴は、(1)ユーザ、エージェント、環境 (ボールの移動) という三者間の相互作用がすべて含まれている、(2)コンピュータ内に作成した仮想環境であるので、実世界における複雑さを排除できる、(3)ゲーム環境では音声インタラクションが引き出しやすい、などが挙げられる。

以下に、この実験環境を用いたトライフェース内の相互作用について説明する。

#### ユーザとエージェントの相互作用 (図 3a)

ユーザはエージェントに対して音声やキーボードを用いて働きかける。現在の実験環境では、エージェントからのユーザへの働きかけに対してほとんど手段を持っていない。エージェントはパドルの動きをユーザに見せるのが唯一の情報表明手段である。

#### ユーザと環境の相互作用 (図 3b)

ユーザは図4のように画面に表示された状態を見ながら、パドルをキーボードで操作する。実験環境は、内部に持つ変数を更新し、ディスプレイの表示内容を更新する。パドルがボールを打った場合は、正の報酬がユーザに与えられ、打たない場合は負の報酬が与えられる。

この相互作用は、エージェントには直接関係ないが、もしエージェントがこの相互作用を観察した場合は、学習の重要な信号源として活用可能になる。模倣[10]や Learning by Demonstration は関係のあるコンセプトである。

### エージェントと環境の相互作用 (図 3c)

エージェントは仮想環境から環境に関する変数を直接受け取り、その信号を元に、パドルを操作するための信号を送る。環境は、変数を更新し、エージェントに対して新しい変数の値が伝えられる。もし、エージェントの操作するパドルがボールを打った場合は、正の報酬が与えられ、打たない場合は負の報酬が与えられる。

仮想環境を用いれば、エージェントは環境から直接、変数の値を受け取れることが利点である。多くの実世界を扱う実験においては、エージェントが環境からどのように情報を抽出して受け取るかという画像認識やセンシングや環境知覚の困難さに直面してしまう。

### 3.2 相互作用の学習への利用

エージェントの内部モデルを構成する方法はいくつか提案されている。例えば、いくつかの fundamental building block agents を用いる方法[11]などがある。我々は、トライフェースの考え方に基づきエージェントの内部モデルをユーザモデルと環境モデルの2つに分解した。本章では、各相互作用がどのようにユーザモデルと環境モデルの学習に使われるかを説明する。

(図5)

#### ユーザとエージェントの相互作用による学習 (図 5a)

エージェントがユーザから受け取る情報の特徴は、様々な意味を持つために何通りにも使用可能な点である。ユーザからエージェントへの情報は、例えば、エージェントの環境への働きかけかたの教師信号(行動指示)や、エージェントの行動に対する評価信号、行動の変化の指示(例「ストップ」)、などに使用できる。またエージェントは、データを収集するために話しかけや、行動による情報伝達ができる。例えば、エージェントはユーザの嗜好情報を質問したり(「どちらが好きですか?」)、確認をしたり(「これでいいですか?」)、現在の行動指示の要求(「何をすればよいですか?」)、などが考えられる。

#### ユーザと環境の相互作用による学習 (図 5b)

この相互作用は、ユーザからエージェントへのデモンストレーション、すなわち教師信号として利用できる。エージェントは、ユーザの行動とユーザの行動の結果変化する環境の両方を観察することで、環境に存在する物体の操作方法が学習できる。同時に、ユーザの行動はユーザモデルの学習にも使用できる。

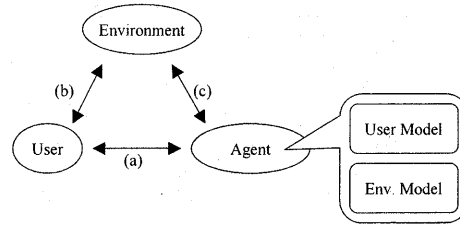


Figure5. Models to be learned

例えば、センサや機器などが相互にネットワークで接続された知能化住宅の環境では、ユーザがある種のテレビ番組をリモコンで選択した場合、その行動はエージェントがどのようなリモコン操作でテレビの番組を選択できるかという環境モデルの学習にも利用でき、次回以降エージェントが自分でリモコンを操作するときの知識となる。またユーザがどのテレビ番組が好きかというユーザの嗜好モデルの獲得にも使用可能である。この場合、ユーザモデルはテレビ番組の推薦に用いられる。

#### エージェントと環境の相互作用による学習 (図 5c)

エージェントが環境に対して行動し、その結果である報酬取得や環境変化により学習する方法は、従来の強化学習の、エージェントが環境モデルを学習する手法と同様である。トライフェースでは、さらにエージェントの環境への行動に対して、ユーザから何らかの評価信号などを受けた場合、環境に関する新たな信号として使用可能である。

例えば、エージェントが環境に対して試行錯誤的に行った行動に対してユーザから報酬がもたらされた場合は、次回も同じ方法をとるようにルール化するなどが考えられる。

このように、それぞれの相互作用はユーザモデルと環境モデルの学習に利用できる。これらをまとめたものを表1に示す。

表1から、インタフェースにさらに環境との相互作用を追加したトライフェースにおいては、ユーザモデル、環境モデルともに学習に使用できる情報が増え、獲得されるモデルの性能が高くなることが想定できる。次に、我々の取組みの一部を次に紹介する。

Table 1. Information used for learning

Model Interaction	User Model	Environmental Model
Human and Agent	- Reward from the User (Evaluation of the action to the User) - Conversation	- Reward from the User (Evaluation of the action to the Env.) - Instruction
Human and Env.	- Observed Human action (What the user likes)	- Observed User action to the Env. (Action imitation) - Demonstration
Agent and Env.	- Observed Human Response (Evaluation of the action to the Environment)	- Environmental Change - Reward from the Env.

### 3.3 トライフェースに関連した取組み

我々は、予測や計画などの認知機能を発達的に獲得できるモデルを開発するための研究を進めており、以下に、トライフェース機器の情報処理機能の一部として、試みの一部を紹介する。

#### 人間の行動の模倣

ユーザと環境の相互作用の情報を使って、エージェントは環境について学習できる。これは“learning by demonstration”と呼ばれる。

この学習を実現するためには、誰が、いつ、何を学習するかが定義されなければならない。現状の方法では「誰が」の部分は demonstrator になり、demonstrator が「いつ」「何を」を教示する。実世界では、ユーザは、時々エージェントをデモンストレーションによって教えることもあるが、その他の大部分の時間、ユーザはエージェントのことを気にしていない。しかし、その時間においてもエージェントが模倣や学習をすべき情報がよくある。我々のプロジェクトでは強化学習に基づく模倣学習などに取組んでいる。[12]

#### 教示におけるコミュニケーションの解析

ユーザからの情報は、いくつかの方法で取得される。言葉や韻律、顔の表情や、体の動きなどである。

ユーザからの情報もいくつかの方法に理解される。例えば、言語獲得のための教師信号、エージェントの行動の評価、エージェントへの行動指示、注意を向ける場所の指示、教示信号、描写、質問などである。

我々は、人間と人間の音声コミュニケーションの解析とモデル化に関する研究を行っている[13]。その結果、コミュニケーションを成立させるためには、双方

が相手の行動を考えて適応することが必要であることを発見した。

#### 予測と計画に基づく行動決定方法

トライフェース機器のような自律的に行動可能な機器の実現のためには、各瞬間での行動を自律的に決定できる必要がある。予測と計画はそのための重要な手法である。予測は、ユーザモデルと環境モデルを用いて、ユーザと環境がどう変化するかを予測し、計画は、行動の系列を獲得した知識をもとに生成する。

我々は、強化学習をベースにして、将来の状態と価値を予測し、可能な行動系列を決定する手法を検討している[14]。

## 4. 幼児の発達とトライフェース

本章では、乳幼児認知能力の発達とこれまでに述べてきたユーザや環境のモデル獲得との関係について議論する。認知科学や発達科学、心理学などにおける乳幼児の認知能力の発達に関する知見は、トライフェースを搭載した機器における学習アルゴリズムの実現に対して多くの示唆を与えてくれる。なぜなら、乳幼児とトライフェース機器は、相互作用の観点からは同じ問題に直面しているからである。人間と機器と環境は、それぞれ乳幼児においては、養育者と乳幼児とその環境に相当している (図6)

我々は、乳幼児の発達の過程は、モデル獲得の過程でもあると考えている。乳幼児もトライフェース機器も大きく変化する環境に適応して自律的に発達する能力を持つ必要があるからである。Elman らは、認知発達に関して、コネクショニストアプローチで考えられるモデルについてまとめている。[15]

以下に乳幼児が取っている戦略のいくつかを挙げる。

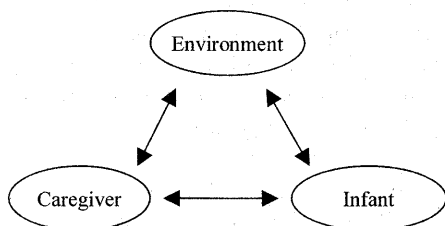


Figure 6. Infant's Development

#### Starting small

子供のワーキングメモリの容量や、注意を向ける能力には最初はとても限定されているが徐々に増加することが知られている。Elman ら[15]はコネクショニストモデルを用いた実験を通して、starting small は、複雑な環境や行動の学習が成功するために重要な役割を担うことを指摘した。

#### 循環的な知識の蓄積

乳幼児は、獲得した知識を新しい知識の獲得に使用する。この繰り返しが発達の基本であると考えている。

#### 複数の戦略の組合せ

乳幼児は発達に際して複数の戦略を取っているように思える。機械学習の観点からは、これらの戦略は強化学習や模倣、慣れ、教示による学習、予測と計画、入力信号の分割、複数の信号の中からの関係性の発見、コンセプトの階層化、メタ学習などのカテゴリーに分類され得る。

また乳幼児の知識の表現形態は不明であるが、養育者や環境との相互作用によって獲得される環境モデルやユーザモデル、として理解可能な知識は存在すると考えている。

## 5. 考察

トライフェース機器の実現のためには、まだ解明されなければならないことは多い。いくつかは、ロボットやエージェントの研究者等にとっては一般的なことであり、いくつかはトライフェースに独特なことである。以下に何点かについて考察する。

一般的には、システム外部からの信号はカテゴリー化されていない。トライフェースでは、外部からの信号は、様々な学習のための情報として使用される。さ

らに、実世界は機器にとって過剰な情報を含むため、利用可能な情報はシステム自身が見つけられなければならない。これは人工知能におけるフレーム問題の解決と関連がある。情報選択に加えて、さらにユーザの意図理解や環境からの報酬の推定や、模倣すべきものを選択、模倣すべきタイミングの決定などが必要になる。ここで必要な技術は、どのように探索空間や事前のプログラムを減らすかに集約される。

取得した情報をどこに利用するか決定することも問題である。これには、乳幼児が生得的に持つバイアスに相当するような判別ルールをプログラムする必要があるかもしれない。

我々は相互作用の検討に集中するため、実世界の複雑さをあえて省いた実験環境を構築した[1]。トライフェースのコンセプト自体や学習のための手法は、実世界でも通用すると考えている。

ユーザモデルと Baron-Cohen の Theory of mind[16]も今後検討する必要がある。Theory of mind の考え方では、現在のロボットには theory of mind のモジュールは搭載されていないと見なせる。機器にこのモジュールを実装するために、乳幼児の認知の発達について知ることが有用であると考えている。なぜなら乳幼児は mind reading の能力を 4-5 歳で獲得すると言われているからである。

すでに述べたように、我々は模倣学習、コミュニケーション解析、予測と計画のモデル化などを含む、認知発達のモデル化に関するプロジェクトを始めている。これらのテーマはトライフェースの相互作用の一部を担っている。我々は、将来これらの相互作用に関する技術を統合して自律的に行動できる知的エージェントやロボットを実現したいと考えている。

## 6. 結論

本稿では、人間と機器と環境との三者間の相互作用を統一的に考えられるトライフェースのコンセプトを提案した。このコンセプトに基づく機器は、機器を使うユーザからだけでなく、外部の環境との相互作用や、ユーザの環境との相互作用からも情報を取得し、内部にユーザモデルと環境モデルを作成することで、よりユーザに適した機能やサービスを提供できるようになる。ユーザモデルと環境モデルの学習にはトライフェースに含まれるすべての相互作用が利用可能であることも特徴である。

また、乳幼児の認知能力の発達との類似性にも言及し、乳幼児の取っている学習戦略は、学習アルゴリズム

ム構築に有効であることを指摘した。今後は、現在我々が進めている認知発達モデル化の研究で行われている個別の研究を統合し、トライフェースに基づくエージェントの実装を目指す予定である。

#### 謝辞

「認知の発現と発達」プロジェクトに参加いただいている、北海道大学 大森隆司先生、東京大学 植田一博先生、東京大学 開一夫先生、カリフォルニア大学 Charles Elkan 先生、Gary Cottrell 先生、本プロジェクトに参加して下さったすべての学生の皆様の議論とご協力に感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] N. Oka, K. Morikawa, T. Komatsu, K. Suzuki, K. Hiraki, K. Ueda, T. Omori, Embodiment Without a Physical Body, Proceedings of the Developmental Embodied Cognition, 2001, pp.48-52
- [2] K. Morikawa, S. Agarwal, C. Elkan, G. Cottrell, A Taxonomy of Computational and Social Learning, Proceedings of the Developmental Embodied Cognition, 2001, pp.43-47
- [3] F. Harashima, Interaction and Intelligence, Proceedings of the 2002 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2002, pp.1-4
- [4] H. Takeda, K. Terada, T. Kawamura, Artifact Intelligence: Yet Another Approach for Intelligent Robots, Proceedings of the 2002 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2002, pp.176-182
- [5] S. Yamada and T. Yamaguchi, Mutual Adaptation to Mind Mapping in Human-Agent Interaction, Proceedings of the 2002 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2002, pp.105-110
- [6] E. Mumolo, M. Nolich and G. Vercelli, Pro-Active Service Robots in a Health Care Framework: Vocal Interaction Using Natural Language and Prosody, Proceedings of the IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2001, pp. 606-611
- [7] Y. Tsumaki, Y. Fujita, A. Kasai, C. Sato, D. N. Nenchev, M. Uchiyama, Telecommunicator: A Novel Robot System for Human Communications, Proceedings of the 2002 IEEE International Workshop on Robot and human Interactive

Communication, 2002, pp.35-40

- [8] M. Steele and R.B. Gillespie, Shared Control Between Human and Machine: Using A Haptic Steering Wheel To Aid In Land Vehicle Guidance, Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 45<sup>th</sup> Annual Meeting, 2001
- [9] K. Morikawa, N.Oka, S. Agarwal, An Experimental Platform for Analyzing Interaction between Human, Machine and Environment, Proceedings of the International Symposium on Artificial Life and Robotics, 2001
- [10] P. Bakker and Y. Kuniyoshi, Robot See, Robot Do: An Overview of Robot Imitation, Proceedings of the AISB Workshop on Learning in Robots and Animals, Brighton, UK, 1996, pp.3-11
- [11] K. Kawamura, The Role of Cognitive Agent Models in a Multi-Agent Framework for Human-Humanoid Interaction, Proceedings of the 2002 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2002, pp.81-86
- [12] Eric Wiewiora, Garrison Cottrell, Charles Elkan, Principled Methods for Advising Reinforcement Learning Agents, Proceedings of the Twentieth International Conference on the Machine Learning, 2003
- [13] Takanori Komatsu, Kentaro Suzuki, Kazuhiro Ueda and Kazuo Hiraki, Natsuki Oka ,Mutual Adaptive Meaning Acquisition by Paralanguage Information: Experimental Analysis of Communication Establishing Process, Proceedings of the twenty-fourth Annual Conferences of the Cognitive Science Society, 2002, pp.548-553
- [14] Y. Ohigashi, T. Omori, K. Morikawa, N. Oka, Acceleration of Game Learning with Prediction-based Reinforcement Learning – Toward the emergence of planning behaviour -, Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Neural Information Processing, 2003, (in print)
- [15] J. L. Elman, E. Bates, M. Johnson, A. Karmiloff-Smith, D. Parisi, K. Plunkett, Rethinking Innateness: A Connectionist Perspective on Development, The MIT Press, 1996.
- [16] S. Baron-Cohen, Mindblindness: An Essay on Autism and Theory of Mind, MIT Press, 1997