

# Puppet Master: 例示によるインタラクティブなエージェントの動作作成手法

## Puppet Master: Designing Reactive Character Behavior by Demonstration

ヤング・ジェムズ<sup>1,3</sup> 坂本 大介<sup>2,3</sup> 五十嵐 健夫<sup>2,3</sup> シャーリン・エフッド<sup>1</sup>

James Young<sup>1&3</sup>, Daisuke Sakamoto<sup>2,3</sup>, Takeo Igarashi<sup>2,3</sup>, and Ehud Sahlrin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> カルガリー大学 コンピュータサイエンス学科

<sup>1</sup> Department of Computer Science, University of Calgary

<sup>2</sup> 東京大学大学院 情報理工学系研究科

<sup>2</sup> Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

<sup>3</sup> JST ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクト

<sup>3</sup> JST ERATO IGARASHI Design UI Project

**Abstract:** We present Puppet Master, a system that enables designers to rapidly create interactive and autonomous animated character behaviors that express style, personality and emotions. We created two systems, one is for designing animated character agents, and another one is for designing robotic behavior. We conducted a pilot study with the animated agents, and confirmed that the system enabled the user to intuitively design their behaviors.

## はじめに

コンピュータゲームのキャラクタや、実世界で人とインタラクティブするロボットなどのエージェントが日常生活で多く目にするようになってきて久しい。これらのエージェントにとってはあらかじめ決められた作業（モノを運ぶ、ある地点に移動するなど）だけではなく、その性格付けや感情表出も重要となる[1]。たとえば、掃除をすることができるロボットは、その行動を遂行するだけではなく、行動から表出される性格も重要な要素となる。特に、実世界で行動するエージェントにおいては、環境からの入力に対して即応的 (Reactive) に行動することが必要となるが、そのための行動をあらかじめ記述することは従来の枠組みでは大変難しい。

従来のプログラミングのような記述による動作作成は、機械的な作業を記述するためには良いが、性格付けや感情表出を行うような行動を記述することは難しい。特に、人と実際にインタラクティブを行いながら、エージェントの性格や感情を表出するような動作の作成はプログラミングだけでは非常に難しい。人形使いなどの職人は人形を自在に扱って人形の性格や、感情を表現することができるが、現在のプログラミングを基本としたエージェントの動作作成は彼らにとっても難しい。このため、現状のエ

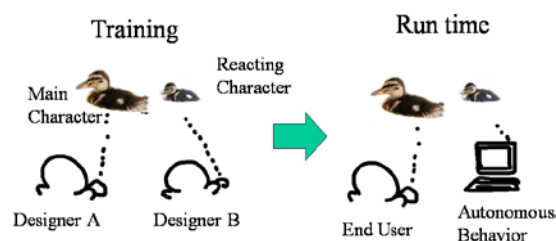


図 1: 主となるエージェント (Main Character) に対する、対となるエージェント (Reacting Character) の振るまいを例示によって作成する (Training phase). この結果を元に、Run time においてユーザが主となるエージェントを動かすことで対となるエージェントの振るまいが生成される。

エージェントの動作作成はソフトウェアエンジニア任せられており、満足な動作作成することができないでいる。

そこで、本稿ではエージェント (キャラクタエージェントおよび移動ロボット) の動作、特にユーザの動きに対話的に反応して性格や感情をあらわすような動作を、例示によってデザインする手法について紹介する。本提案手法ではエージェントの性格を特徴付ける動作の作成に注目しており、従来の決められた機械的な作業やインタラクティブ行動の作成とは目的が異なる。本提案手法は教示部分 (Training phase) と、実行部分 (Run-time phase) からなる。教

示部分ではユーザは2体のエージェントを使用し、その両方が対となる行動を、例示を用いて作成する (Programming by Demonstration). 具体的には、主となるエージェント (システムによって行動が自動生成されるエージェント, 以下 NPC (non-player character)) の, 対となるエージェントに対する行動 (ユーザのアバタ, 以下アバタ) を, 例示を利用して作成する. 実行部分ではアバタをユーザが動かすことで, NPC であるエージェントの行動が, 記録された行動を元に自動生成される (図1).

本稿で提案する手法の例として, まず, キャラクターエージェントの動作作成インタフェースを試作した. これはテーブルトップインタフェース (Tabletop interface) と3次元モーションキャプチャシステムを用いたものである. 本システムでは2つのエージェントを同時に動かすことで動作指示を行う. 本システムを用いて評価実験を行い, 全く経験のないユーザであってもロボットの性格付けや感情表出のための行動を作成することができることを確認した.

これまでは我々が以前報告したものであるが[2], 本稿ではさらに実際のロボットに対する動作作成システムについても開発した. 本システムにおいては前述したものと同様にテーブルトップインタフェースを用いたものと, 実際のロボットを用いた2種類のインタフェースを開発した. これらについて紹介する.

## 関連研究

これまでに生物感あふれる動作や, これを伴うインタラクティブな振り舞いを作成することを目的とした研究は多く存在する. 例えば, Blumberg らは Behavior model によるプログラミング手法を提案した[3]. 彼らのシステムは論理的な手法を用いており, 彼らの手法を使うためには背景となるアルゴリズムに対する深い理解が必要であったため, システムに関する知識が少ないユーザにとっては扱いが難しいものであった.

例示によるプログラミング (Programming by demonstration) は, 本来コンピュータアプリケーションの自動化に関する技術として提案された[4]. Pavlov らはこの考え方をエージェントの低レベルな反射行動の記述に採用した[5]. このようなエージェントにおける応用は様々あり[6], アニメーションにおけるエージェントの動作に関する応用もある[7]. さらに, ロボットの動作の作成に応用された例も存在する[8]. これらのシステムは教示者の例示を再現するだけであり, ユーザの行動にインタラクティブに反応することを目的としていない.

一方で, 適切に処理された行動を大規模なデータ

ベースにまとめ, 動作を生成する手法も提案されてきている[9]. この手法においては, ジョイスティックなどの入力デバイスだけでなく, 様々な要因を考慮したインタラクティブな動作を実行することはできるが, これらはプログラマーが明確に記述したのだけを実行することができた. さらに, これらのシステムの一つの目的は物理的な行動の正確性であり, インタラクティブな動作から表出される個性を扱ってはいなかった.

また, 近年の Human-robot interaction (HRI) に関する研究においてはロボットを感情を持ったインタフェースとしてとらえるものが出てきている[10]. ロボットはユーザと空間を共有し, このため, 彼らの外見や振る舞いが人とのインタラクションに劇的に影響するとも言われる[11]. ここでの例示によるロボットの行動作成は, 単純な記録された動作の再生から, ユーザとのインタラクションを含んだ複雑なものとなると考えられるが, 明示的な個性を含んだものではないと考えている.

## キャラクターエージェントの行動デザインシステム

本節では, キャラクターエージェントの対話的な挙動を例示によってデザインする手法とその評価について述べる. 本節の内容の詳細については参考文献[2]を参照されたい. 本稿で提案するシステムは環境に応答的なキャラクターエージェントの行動, 振り舞い作成を簡単に行うことを目的としている. その意味において, 本システムはキャラクターエージェントの動作だけではなく, キャラクターエージェントの個性や性格を表すような特徴的な動作を簡単に作成することを目的としている.

ここで実装するシステムにおいては, NPC としてのキャラクターエージェントはスクリーン上のアニメーションのキャラクターである. 例示による動作指示を行っている間, エージェントは画面上に表示され



図 2: Tabletop Tangible User Interface の動作環境

続け、リアルタイムに動作生成をし続ける。

## Tabletop Tangible User Interface(TUI)による動作デザイン

本手法においては Tangible User Interface (TUI)を用いたテーブルトップ環境と、物理的なオブジェクト (Tangible Object)をその上で実際の動かすことで動作作成を行う。本手法では物理的なオブジェクトを実際に手で動かして動作作成することができる点において、これまでの手法 [12] よりもより直感的に操作することが可能となる。

本手法で使用するテーブルトップシステムとして我々は SMART Technologies 社のテーブルトップシステムを使用する。本システムは 4'10" x 3'77" の長方形のディスプレイであり、リアプロジェクション方式で映像がテーブルに投影される。テーブル上のオブジェクトの認識には Vicon 社の 3 次元モーションキャプチャシステムを使用している。

### 動作生成アルゴリズム

これまでに紹介したシステムはユーザの指示を記録するためのインタフェースであったが、本システムでは記録された情報をもとに、エージェントの動作を自動生成することを目的としている。特に、環境に対して応答的なエージェントの行動を、記録されたデータを元にして生成される。本稿で提案するアルゴリズムにおいては以下の 3 点が重要な要素となる。

1. 記録された動作から似たものを探し出し、次の動作を決定する。
2. 記録された動作との類似度の一貫性を優先するか、もしくは動きの一貫性を優先するかのバランスを取る。
3. 概略としての動きと、細かい動きのテクスチャを別々に合成して足し合わせる。

1 点目について、我々が提案する近似動作発見手法はイメージアナロジー(Image analogy)の手法を元としているが[13][14]、我々の手法は動作発見だけでなく、動作生成までを含んでいる。この手法は 2 つの評価手法からなる。つまり、1) 状況を考慮した近似性と、2) 生成される動作の一貫性である。

これら 2 つの要素のバランスを取るのが 2 点目の要素である。これについても前述したイメージアナロジーの手法を元にしてはいるが、単純に応用することができなかった。具体的には我々の提案手法では元となるデータが 1 つしかないため、あるデータに行動が収束してしまうという問題があった。このた

め、本来の手法[13]に変更を加え対応した。

近似動作検索はしばしば適した結果を返さないこともあり、このため、動作が適切に繋がらないこともある。このため、3 点目の要素として動作の補完、生成手法を作成した。エージェントの振る舞いには 1)移動などの概略的な動作、だけでなく 2)正確を表すような細かな動作があり、これらを考慮した上で、適切な動作となるようエージェントの動作生成を行うこととしている。

### 評価実験

本稿での提案手法を評価するために評価実験を行う。実験は「エージェントの行動デザイン」と「エージェントの行動観察」の 2 つの部分からなる。実験ではまず「エージェントの行動デザイン」を行い、この結果を他の被験者が観察し、作成者の意図通りに行動が作成されたかどうかについて「エージェントの行動観察」を行い検証する。

#### 実験方法

**実験設定:** 実験では前述した 2 つのシステムのうち「Tabletop TUI による動作デザイン」システムを使用する。

**被験者:** 実験には 20 人の被験者が参加した。実験への参加の謝金として被験者は \$15 を受け取った。20 名の被験者のうち、10 名はエージェントの行動作成を行い、ほかの 10 名はエージェントの行動観察を行った。行動作成に参加した被験者のうち、8 名が男性、2 名が女性であった。年齢は 19 歳から 32 歳 ( $M=22.8, SD=3.8$ ) である。行動観察を行った被験者については、6 名が男性であり、4 名が女性であった。年齢は 19 歳から 27 歳 ( $M=23.7, SD=2.71$ ) である。すべての被験者は今回使用するシステムを使用したことがないことを確認した。

#### 実験順序:

**エージェントの行動デザイン実験** – 本実験ではまず被験者は以下の 5 つのキーワードに該当するエージェントの行動を作成することを教示される。*Lover* (好意的な), *Bully* (威嚇的な), *Playful* (陽気な), *Friend* (友好的な), *Stalker* (しつような)。被験者はそれぞれの動作作成後、ランダムな順序で作成した動作を観察し、それぞれがどの動作であるかを答える。被験者は一度作成した動作を、実験の試行を遡って修正することはできないこととした。

**エージェントの行動観察実験** – 本実験では前述の実験で作成された行動を観察し、行動からどのような性格や、感情が感じ取れるかについて回答を求めた。実験で被験者は最初にロボットと実際にインタラクションを行うよう教示され、その後どのよう

な性格、感情を感じ取ったかについてアンケートに回答する。その後、被験者に動作作成時に使用したキーワードのリストを渡し、ランダムな順序でロボットの行動を提示した。被験者はそれぞれとインタラクションし、提示された行動がリスト中のどの行動であるかどうかを回答した。

### エージェントの行動デザイン実験の結果

実験に参加した被験者 10 名のうち、8 名が自身で作成した動作の同定ができたことが確認された。さらに、被験者は作成した動作のうちの 74% を、満足できる動作、または概ね満足でいる動作として報告した (5 段階のリッカート尺度による)。同様に、22% についてどちらでもないと回答した。動作の作成時間の平均は 32.5 秒であった ( $SD=18.0$ ,  $min=9$ ,  $max=85$ )。実験では、被験者が納得するまで動作作成を繰り返すことができたが、その平均回数は 1.7 回であった ( $SD=0.9$ ,  $mode=1$  at  $freq.=56\%$ ,  $max=4$  回)。実験のアンケート分析においては、6 名の被験者がエージェントのがたがたした動作に不満があった。自身で作成した動作を同定できなかった 2 名の被験者については、エージェントの回転動作を扱うことができておらず、このため、デザインする動作の種類が狭くなったことが考えられる。

### エージェントの行動観察実験の結果

エージェントの行動作成実験によって作成された 50 個 (10 被験者がそれぞれ 5 種類) の動作のうち、本実験の被験者にはランダムに抽出された 5 個の動作が提示された。このためすべての被験者に提示された動作は 50 個であるが、そのうちの 9 個の動作について完全に動作が推定された。他の 10 個の動作については非常に近い言葉で表現された (例えば、Lover について Girlfriend など)。その後、被験者に提示された実際に作成されたキーワードと一致する動作を当てる実験の結果を表 1 に示す。

エージェントの行動作成実験と同様に、被験者はエージェントのがたがたした動作に不満を持っていた。また、性格付けが非常に単純であることに對しても不満があると回答した。

表 1: 作成した動作と実験結果

		Actual Trained Behavior				
		Lover	Bully	Playful Friend	Stalker	Afraid
Matched to	Lover	6	1	3	0	0
	Bully	0	5	4	0	1
	Playful Friend	4	3	2	1	0
	Stalker	0	0	1	6	3
	Afraid	0	1	0	3	6

## 実験のまとめ

エージェントの行動作成実験の 10 名中 8 名の被験者がすべての動作を同定でき、本稿で提案する手法、およびアルゴリズムが生成する振る舞いについて概ね満足したという結果が得られた。また、作成された行動についても十分に性格付けられていたことが示された。いずれの被験者においても、本稿で提案したシステムを使用したことがなかったが、プログラミング言語を駆使せずに簡単に動作作成することができたため、本提案手法がコンピュータやソフトウェア開発の熟達者ではなくともロボットの行動作成が可能な環境であることが示されたと考えている。

## ロボットの動作デザインシステム

前節では、実体をもたない仮想世界におけるキャラクターエージェントの動作デザインについて述べた。本節では、これを実世界で動作するロボットに応用する手法について述べる。ただし、ロボットに応用した場合についての評価実験は今後の課題である。

ロボットの動作作成システムでは実際のロボットを NPC として扱い、実際の人をアバタとして扱う。動作作成においては、ロボットを実際に動かし、人と実際にインタラクションを行いながら動作作成を行う。人は環境の中を動き回り、それに対する反応動作の作成を行う。システムはユーザによって作成された動作を元に、人とのインタラクションにおける行動の生成を行う。

本システムにおいては実際のロボットとして iRobot 社の Roomba を使用する。また、ロボットには移動以外の機能として、2 つの音声 (嬉しそうな声と悲しそうな声) の再生機能を付加した。これは今後のロボットの拡張性を試すものである。ロボットとコンピュータとの接続には Bluetooth を使用した。人とロボットの行動追跡には Vicon 社の 3 次元モーションキャプチャシステムを使用し、計測用のマーカを人とロボットに付けた。

## Tabletop TUI によるロボットの動作デザイン

本手法においてはアニメーションとして表現され、テーブルトップインタフェース上に表示される (図 3)。行動はあらかじめ記述されており、ユーザはロボットがどのようなその軌跡を追うかについてテーブルトップインタフェース上で小型のロボットを用いて動作を作成する。ここで作成された動作は実際のロボットと人の環境で再現、生成される。

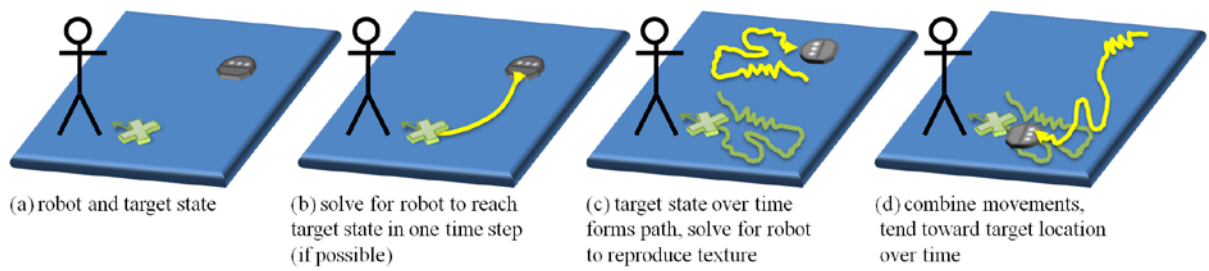


図 6: 実世界で動作するロボットについて考慮されるべき要素

小型のロボットは片手で操作することができるように設計されており、その上面にはマウスが取り付けられている。移動機構はマウスを模して作成され、上面に付けられたマウスはロボットからの音声出力のスイッチとして使用される。

### 直接ロボットを動かすことによる動作デザイン

本手法においては Roomba ロボットに取り付けられたアルミニウムの棒を使用し、ロボットを実際に動作させることにより動作作成を行う (図 4)。棒とロボットの接続には 2 自由度の軸受けがあり、前後左右の動作指示が可能となっている。また、ロボットを回転動作についても対応している。アルミニウムの棒にはスイッチが付いており、これを押すことでロボットから音声の再生が可能となっている (図 5)。

本手法では人をアバタとして扱い、NPC としてロボットを用いる。ユーザは棒を使ってロボットを実際に動作させ、その動作を作成することができる。

### ロボットのための拡張アルゴリズム

ロボットは物理空間を実際に移動するエージェントであるが、実空間を扱うという点で様々なノイズがある。このため、ロボットはコンピュータ内のエージェントと比較して、正確に動くことが難しく、また、考慮すべき問題が多くある。特に、本稿で扱うシステムにおいては、ロボットは目標地点に移動する必要があり、これを実現するために前述したアルゴリズムを拡張する必要がある。

この問題に対応するために、まずロボット (Roomba) の動作をモデル化し、ロボットに送られる指令をロボットと目標座標の差分と、目標に対するロボットの回転について適正に動作するように変更する (図 6)。モデル化することにより、最小ステップで目標位置と回転になるよう調整することが可能となる。具体的には、少しずつロボットがどう動くべきかについて、目標位置に至るまでのロボット

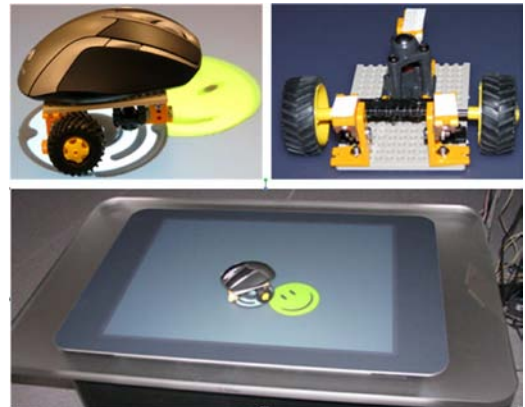


図 3: 小型ロボットと取り付けられたマウス。および Microsoft Surface の概観。



図 4: 直接ロボットを動かすシステムの概観。アルミニウムの棒を持ちいたロボットインタフェースで人を追いかける動作を作成しているところ。



図 5: ロボット音声の発話スイッチ。

に最適化されたパスを形成する。モデルを利用した過去の目標位置の状態から最適化されたパス、および大きな動作を含む動作のパスを考慮したロボットを実際に動作させる指令が生成される。

### 補助的な動作

本システムにおいては、ロボットは補助的な動作（2種類の音声）を持っており、これについても拡張を行う必要がある。現在は音声を発するだけであるが、将来的に人に対する物理的支援（モノを移動させるなど）やサービス提供（写真を撮るなど）のような補助的な動作を含んだシステムとして行くことを考えており、そのための予備的な実装をしている。

### 全体を通じた議論

本稿で実装したシステムでは長時間に及ぶ動作デザインや、劇的に性格を変化させるような行動を作成することは難しい。また、本提案では他のエージェントの振る舞いに関するモデルとの統合や、複数のシステムの統合についても難しい。このように、本提案手法の限界についても今後見極めていく必要があると考えている。

また、現状の提案手法では環境に存在する物体を考慮した行動は含まれていない。例えば、壁に当たった際の行動や、障害物に対する振る舞いなどがある。これらの振る舞いを作成する手法についても扱えるようにすることで、本提案手法を広く拡張することもできるだろう。同様に、本提案手法を複数のエージェントの行動作成のために拡張することで、それぞれが個々の性格を持っているように、群ロボットの行動作成ができるようになると考えている。

### まとめ

本稿ではエージェントに対する例示による行動作成手法の提案を行い、提案手法をキャラクタエージェントに適用する方法と評価実験の結果、および同手法をロボットに適用するための手法について紹介した。本提案手法はプログラミング言語ではなく、例示による行動作成を行うため、コンピュータの熟達者でなくとも簡単にエージェントの振る舞いや性格付けなどを行うことができる。キャラクタエージェントの行動デザインについては、テーブルトップインタフェースを利用した手法において、エージェントの振る舞いを作成したことがないユーザであっても短時間で簡単に性格を表すことができる行動を作成することができることが確認された。今後は、ロボットのための行動デザイン手法についても評価実験を行っていく予定である。

### 謝辞

本研究の一部は NSERC, iCore, (独) 日本学術振興会, (独) 科学技術振興機構, および University of Calgary の助成による。

### 参考文献

- [1] Reeves, B., and Nass, C. The Media Equation. CSLI Publ., UK, (1996)
- [2] Young, J. E., Igarashi, T., and Sharlin, E. Puppet Master: Designing Reactive Character Behavior by Demonstration. In *Proc. SCA '08*, pp. 183-191, (2008)
- [3] Blumberg, B. M., and Galyean, T. A. Multi-level direction of autonomous creatures for real-time virtual environments. In *Proc. SIGGRAPH '95*, ACM, pp. 47-54, (1995)
- [4] Cypher, A. Eager: programming repetitive tasks by example. In *Proc. CHI '91*, ACM, pp. 33-39, (1991)
- [5] Wolber, D. Pavlov: an interface builder for designing animated interfaces. *ACM TOCHI* 4, 4, 347-386, (1997)
- [6] Dinerstein, J., Egbert, P. K., and Ventura, D. Learning policies for embodied virtual agents through demonstration. In *Proc. IJCAI '07*, pp. 1257-1262, (2007)
- [7] Igarashi, T., Moscovich, T., and Hughes, J. Spatial keyframing for performance-driven animation. In *Proc. SIGGRAPH '05*, ACM, pp. 107-116, (2005)
- [8] Raffle, H. S., Parkes, A. J., and Ishii, H. Topobo: a constructive assembly system with kinetic memory. In *Proc. CHI '04*, ACM, ACM, pp. 647-654, (2004)
- [9] Wiley, D. J., and Hahn, J. K. Interpolation synthesis of articulated figure motion. *IEEE Comp. Graph. and App.* 17, 6, 39-45, (1997)
- [10] Breazeal, C. Designing Sociable Robots. MIT Press, (2002)
- [11] Matsui, D., Minato, T., MacDorman, K. F., and Ishiguro, H. Generating Natural Motion in an Android by Mapping Human Motion. In *Proc. IROS '05*, IEEE, pp. 1089-1096, (2005)
- [12] Ishii, H., and Ullmer, B. Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *Proc. CHI '97*, ACM, pp. 234-241, (1997)
- [13] Hertzmann, A., Jacobs, C. E., Oliver, N., Curless, B., and Salesin, D. H. Image analogies. In *Proc. SIGGRAPH '01*, pp. 327-340, (2001)
- [14] Hertzmann, A., Oliver, N., Curless, B., and Seitz, S. M. Curve analogies. In *Proc. EGRW '02*, pp. 233-246, (2002)