

仮想訓練システムのためのエージェントのモデル構築

Constructing Agent Model for Virtual Training Systems

村上 陽平
Yohei Murakami

京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻
Department of Social Informatics, Kyoto University
yohei@kuis.kyoto-u.ac.jp, <http://www.lab7.kuis.kyoto-u.ac.jp/~yohei/>

杉本 悠樹*1
Yuki Sugimoto

(同上)
sugimoto@kuis.kyoto-u.ac.jp

石田 亨
Toru Ishida

(同上)
ishida@i.kyoto-u.ac.jp, <http://www.lab7.kuis.kyoto-u.ac.jp/~ishida/>

keywords: multiagent systems, software agent, virtual reality

Summary

Constructing highly realistic agents is essential if agents are to be employed in virtual training systems. In training for collaboration based on face-to-face interaction, the generation of emotional expressions is one key. In training for guidance based on one-to-many interaction such as direction giving for evacuations, emotional expressions must be supplemented by diverse agent behaviors to make the training realistic. To reproduce diverse behavior, we characterize agents by using a various combinations of operation rules instantiated by the user operating the agent. To accomplish this goal, we introduce a user modeling method based on participatory simulations. These simulations enable us to acquire information observed by each user in the simulation and the operating history. Using these data and the domain knowledge including known operation rules, we can generate an explanation for each behavior. Moreover, the application of hypothetical reasoning, which offers consistent selection of hypotheses, to the generation of explanations allows us to use otherwise incompatible operation rules as domain knowledge. In order to validate the proposed modeling method, we apply it to the acquisition of an evacuee's model in a fire-drill experiment. We successfully acquire a subject's model corresponding to the results of an interview with the subject.

1. はじめに

近年、協調作業やリーダーシップの養成を目的とした集団作業の訓練に、仮想訓練システムが用いられ始めている [Rickel 99, Traum 02]。これは、実世界で必要となる複数の被験者をエージェントで代用することで、集団作業の訓練に伴う実施コストを削減できるためである。ただし、このような訓練では、仮想空間内においてエージェントと学習者との間にインタラクションが発生するため、エージェントによる、説得力のある社会的インタラクションの実現が必要とされる [Johnson 00, Cavazza 02]。

これまでエージェントの現実的なインタラクションは、非言語的な振舞いや、感情的な振舞い、発話といった表現の仕方をより実際の人間に似せることで実現されていた [Cassell 00, Marsella 02, Lester 00, Pelachaud 02]。これは、従来のアプローチが協調作業などで見られる face-to-face のインタラクションに焦点を当てていたためである。一方、避難時の指示のように、一対多のインタラク

ションに基づく誘導方法の訓練では、避難者エージェントは感情表現だけでなく、エージェントごとに多様に振舞うことも訓練を現実的なものにするために必要である [Wray 03, Sukthankar 04]。これに対し、声量や動きの速さといった身体的な違いを再現することで行動の多様性を実現することはできるものの、性格の違いによる多様性の実現は容易ではない。

しかし、実世界では人の指示に率先して従う者や、なかなか従わず周りに合わせる者がいるように、同じ状況であっても性格により人それぞれ振舞いが異なる場合が多い。訓練をより現実的にするには、このような性格の違いによる多様なエージェントの振舞いを実現することも重要である。そこで本研究では、訓練において多様なエージェントを構築するために、ユーザがエージェントを操作するユーザ参加型のシミュレーションを実施し、その操作ログから、ドメインに依存した多様なユーザの操作モデルを獲得することを目的とする。なお、ここでの操作モデルとは、エージェントの一人称視点でユーザが何を観測し、どのような操作を行ったかを表す操作ルー

*1 現職：西日本電信電話株式会社

ルの集合と定義する。したがって、性格の違いは被験者の利用した操作ルールの違いとしてモデル化される。このような目的を達成するために、我々が取り組んだ課題は次の二点である。

ユーザ固有のモデルの獲得 訓練の設定に適合した多様なエージェントを構築するために、ユーザ参加型のシミュレーションからユーザごとの操作モデルを獲得する必要がある。そこで、全被験者のログデータから一般的な操作モデルを帰納的に獲得するのではなく、各被験者のログデータからそのログデータを説明できる被験者固有の操作モデルを獲得する。

モデルの一貫性の保証 性格の異なるユーザの操作モデルを獲得するために、多種多様な操作ルールが必要である。ただし、そのような操作ルールの中には、互いに両立することのない操作ルールも存在するため、モデル構築時には、モデルの一貫性を保ちつつ操作ルールを選定しなければならない。

本研究では上記の課題を踏まえて、操作モデルの獲得に仮説推論の枠組を適用する。仮説推論は、これまで故障や病気の診断に適用されてきた実用的な枠組である [Poole 87]。故障の原因や病因が症状を生むという関係を用いて、可能な原因を仮説として立てて推論を進め、観測結果を論理的帰結として説明できた場合に、仮説が正しかったとする推論である。「人は各状況で実行可能な自分の行動ルールのうち最も優先度の高いものを実行する」といった合理的な意思決定モデルに基づけば、被験者の行動も自身の操作ルールとその優先度によって決定されると言える。したがって、診断問題と同様に被験者の操作モデルの獲得は、観測された一人の被験者の振舞い(観測結果)を矛盾なく導く、操作ルールとその優先度の組合せ(仮説の組合せ)を見出す探索問題として定式化できる。

なお、ここでの矛盾とは、同じ観測条件で動作の異なる操作ルールを一人の被験者が利用することを指す。これは、全く同じ状況に対して異なる行動をとることを意味し、矛盾した振舞いと言える。仮説推論では、このような矛盾を規制するために制約知識を記述することができる。操作ルールの選定時に、この知識により常に無矛盾性を確認することで、最終的に獲得される操作モデルの一貫性が保証される。

このように仮説推論を適用することで、被験者が利用する可能性のある操作ルールと被験者の振舞いさえ収集できれば操作モデルの獲得が可能になる。社会心理学に関する専門家の知識を用いて、観測された振舞いから利用された操作ルールを演繹的に推論することも可能であるが、これらの知識には経験的な知識も多く含まれており、知識獲得がボトルネックとなる。さらに、訓練という目的上、ドメインや環境に依存した被験者の操作モデルを獲得しなければならないことが、知識の獲得をより困難にしている。このような理由から、被験者の操作モデルの獲得には仮説推論の適用が有効であると考えられる。

以下、本論文では初めに参加型シミュレーションについて説明し、参加型シミュレーションを用いた被験者のモデリングのプロセスについて述べる。次に本研究で用いる技術的な語彙を定義し、それらの語彙を用いて、仮説推論を利用したモデリング手法について説明する。最後に、避難者役のユーザの操作モデルを獲得するために、避難ドメインに提案手法を適用し、その有用性を確認する。

2. 参加型シミュレーション

参加型シミュレーションとは、仮想空間上で行われるマルチエージェントシミュレーションにおいて、一部のエージェントをユーザが完全に操作するものである。このようにして仮想空間を人間とエージェントが共有することで、仮想空間内でエージェントとユーザのインタラクションを間接的に実現することができる。本研究では、仮想訓練システム上のエージェントを人間が操作する。

このような参加型シミュレーションを用いて被験者の操作モデルを獲得する利点として次の三点が挙げられる。

- 各被験者の操作履歴だけでなく、シミュレーション時に被験者が観測した環境の情報も、ログデータから算出し獲得することができる。
- シミュレーション時の被験者の画面を録画することで、被験者の状況を完全に記録することができる。録画した動画を被験者に見せながらインタビューすることで、被験者から効果的に操作ルールを収集する。
- 被験者の不足を補うために、プログラムの制御するエージェントで被験者を代用することができる。

本研究では、この参加型シミュレーションを用いてインタビューを行った結果得られた操作ルールを領域知識として用いて、参加型シミュレーションのログデータから導かれた各被験者の振舞い(観測事象)を説明することで、各被験者の実行した操作ルールを獲得する。ただし、モデリング対象の被験者が領域知識内のどの操作ルールを備えているかが不明であるため、その被験者がある操作ルールを実行したと一旦仮説を立て推論し、矛盾なく説明が達成されれば立てた仮説を真とする仮説推論を用いて操作モデルを求める。このような参加型シミュレーションと仮説推論を組み合わせたモデリングのプロセスを以下に示す(図1)。

ステップ1: マルチエージェントシミュレーション 文献や専門家へのインタビューなど事前知識により構築したモデルを評価するために、マルチエージェントシミュレーションを行う。

ステップ2: 参加型シミュレーション 一部のエージェントを被験者が操作し、参加型シミュレーションを実施する。

ステップ3: 観測事象の記述 参加型シミュレーションのログデータから、観測事象となる被験者の振舞いを抽出し、述語論理により記述する。

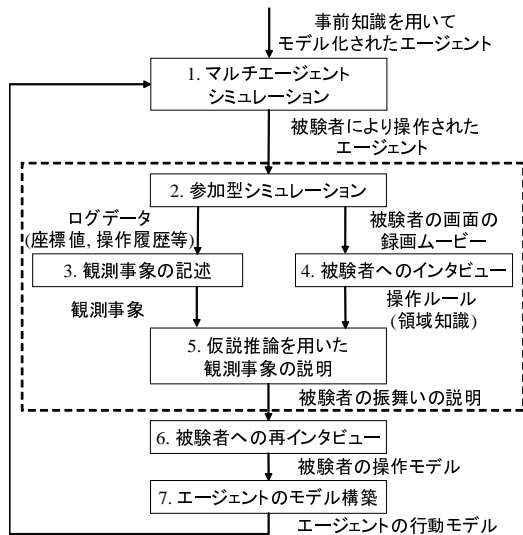


図 1 モデリングプロセス

ステップ 4：被験者へのインタビュー 被験者の操作画面を録画した動画を用いて、一部の被験者にインタビューを行い、領域知識となる操作ルールを獲得する。
 ステップ 5：仮説推論を用いた観測事象の説明 領域知識と観測事象、そして利用した操作ルールに関する仮説を用いて、被験者の振舞いを説明する操作モデルの候補を仮説推論により獲得する。
 ステップ 6：被験者への再インタビュー モデリング対象の被験者に対する質問を通して、生成された複数の説明から一意に説明を絞り込む。その説明に用いられた仮説から、被験者の操作モデルを獲得する。
 ステップ 7：エージェントのモデル構築 獲得された操作モデルによって生成された振舞いの説明を専門家が分析し、エージェントの行動モデルを構築する。
 本論文では、特に点線で囲まれた、仮説推論による操作モデル獲得の部分に焦点を当てる。

3. 問題の形式化

本章では、被験者の操作モデル獲得に仮説推論を適用するために、領域知識と観測事象を形式的に定義する。

3.1 用語の定義

本研究では、被験者は、操作しているエージェントの一人称視点で観測された世界を基に、自分の操作モデルに従って次の操作を決定していると仮定する。被験者が観測した世界を S で表す。 S は、世界を記述したリテラルの連言からなる。特に、時刻 t における記述を S_t と表す。なお、ここでの時刻とは、被験者の観測した世界 S が変化することに 1 進む離散値とする。一方操作モデルは、モデリング対象の被験者により実行される操作ルール集合 P と、操作ルール間の優先度に関する順序関係 \preceq との対 $\langle P, \preceq \rangle$ で表される。 P は、被験者へのインタビューから得

られた全操作ルールの集合 $Rules$ の部分集合であり、 \preceq は、直積集合 $Rules \times Rules$ の部分集合である。 $Rules$ 内の各操作ルールを $rule_i$ ($0 \leq i < j \leq |Rules|$) とすると、 $\langle rule_i, rule_j \rangle \in \preceq$ のとき関係は $rule_i \preceq rule_j$ と記述することもできる。

このような被験者の操作モデル獲得に仮説推論を適用するには、被験者の操作ルールや操作の選択方法などの、常に成り立つ知識を領域知識 Σ として定義し、 Σ 内の各知識を σ_k ($0 \leq k \leq |\Sigma|$) と記述する。一方、各操作ルールが被験者により利用されたかどうか ($rule_i \in P$) や、どのルールが優先されるか ($rule_i \preceq rule_j$) といった、必ず成り立つとは限らない、他と矛盾する可能性のある知識は仮説とし、仮説の集合を H で表す。さらに、参加型シミュレーションの開始時刻 0 から終了時刻 end までの被験者の振舞いを観測事象 G として与える。最終的に仮説推論により導かれた解 h から、被験者の操作モデル $\langle P, \preceq \rangle$ を構築する。なお、 h は H の部分集合である。

3.2 領域知識

被験者の操作モデル獲得に仮説推論を適用する場合、領域知識は、被験者へのインタビューで獲得された操作ルール、被験者の操作の選択に関する知識、そして仮説によって生じる矛盾を防ぐための制約知識から構成される。

本研究では、操作ルールを条件-動作ルールとして記述する。被験者は、条件部の全てのリテラルが充足するときに、動作部の操作を行う。具体的な操作ルールの記述例を例 1 に示す。

例 1 (条件-動作ルールによる操作ルールの記述)。

$rule_1$: if $Near(x, self), Noop(x), Noop(self)$ then Initiate(walk)

$rule_2$: if $Near(x, self), Walk(x), Noop(self)$ then Initiate(walk)

$rule_3$: if $Near(x, self), Noop(x), Noop(self)$ then Initiate(turn)

$rule_1$ は、「操作しているエージェント (self) の停止中 ($Noop$) に、近く ($Near$) のあるエージェント x も立ち止っていれば ($Noop$)、そのエージェントを追い越すよう、歩かせる (Initiate(walk))」という操作ルールである。次に $rule_2$ は、「操作しているエージェントの停止中に、近くのあるエージェント x が歩いていれば、そのエージェントに付いて行くよう歩かせる」という操作ルールである。最後の $rule_3$ は、「操作しているエージェントの停止中に、近くのあるエージェント x も立ち止っていれば、周囲を見回せるよう体の向きを変える (Initiate(turn))」という操作ルールである。

次に、被験者の操作選択に関する知識について定義する。
 定義 1 (被験者の操作の可能性 1: 操作の選択 σ_1)。

被験者の観測した世界 S_t において適用可能 (Applicable) なルールの中で、優先度の最大な操作ルール $rule_i$ を被験者は利用する*2。その結果、時刻 t において被験者は

*2 本研究では理解を容易にするため単純な行動決定規則を利用したが、恒真であれば複雑なものでも領域知識に新たに追加することで比較的容易に拡張可能である。

$rule_i$ の動作部の操作を行う ($Do(action(rule_i))$). なお, $Applicable$ と Do は, それぞれ操作ルールの条件部が充足したことで, 動作部の操作を行ったことを示す述語である. また, 関数 $action$ は, 操作ルールの動作部で被験者が起動したエージェントの機能を値として返す.

$$(\exists rule_i (rule_i \in P \wedge rule_i = \max\{rule | Applicable(rule, S_t)\})) \Rightarrow Do(action(rule_i))$$

定義 2 (被験者の操作の可能性 2: 操作の継続 σ_2).

被験者は時刻 t よりも前に行ったある操作を, 時刻 t においても継続して行うことがある. このような被験者の操作を示す述語として $Continue$ を利用する.

ただし, 常に $Continue$ が成り立つとすると, 被験者の操作が Do であるか, $Continue$ であるかを説明することができない. そこで, 各時刻において, 被験者がとりうる操作は Do もしくは $Continue$ のどちらか一方とし, σ_1 と σ_2 は排他的な知識とする.

最後に, 仮説によって生じる矛盾を防ぐために制約知識を導入する. 今回用いる制約知識は, 被験者の操作ルールに関する以下のものである.

定義 3 (制約知識 σ_3).

被験者の利用する操作ルール P のうち, 条件部の等しい全ての操作ルールは, その動作部の操作も等価である. なお関数 $condition$ は, 操作ルールの条件部であるリテラルの集合を値として返す.

$$\begin{aligned} \forall rule_i, rule_j (rule_i, rule_j \in P \wedge \\ condition(rule_i) = condition(rule_j)) \\ \Rightarrow (action(rule_i) = action(rule_j)) \end{aligned}$$

3.3 観測事象の記述

観測事象 G は, 被験者の観測した世界 S が変化することによって観測される. したがって, 時刻 t における観測事象を G_t とすると, 観測事象 G, G_t はそれぞれ次のように定義することができる.

定義 4 (観測事象 G).

$$G \equiv (G_0 \wedge \dots \wedge G_t \wedge \dots \wedge G_{end})$$

定義 5 (時刻 t における観測事象 G_t).

観測事象 G_t は, エージェントを通して, 被験者がどのような世界を観測し, エージェントをどう操作したかが記述される. 時刻 t における被験者の操作を A_t で表す. 具体的に A_t は, 被験者がある操作を行うことを意味する Do か, ある操作を継続することを意味する $Continue$ で表現されたリテラルのどちらかである.

$$G_t \equiv (S_t \Rightarrow A_t)$$

これらの観測事象はログデータから時系列に沿って獲得され, 述語論理で記述される. 仮想空間という性質上, ログデータはエージェントの座標値や向き, 被験者のキー入力から構成される. 例えば, 参加型シミュレーションにおいて, ある被験者が操作するエージェント John が

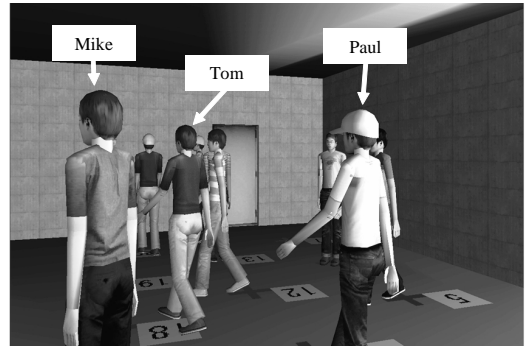


図 2 時刻 $T-1$ におけるエージェント John の視界

歩き出した時刻を T とする. 時刻 $T-1$ において, エージェント John の視界が図 2 で, かつ John が立ち止っており, 被験者が John を歩かせようと操作しているとき, G_{T-1} は次のように記述される.

例 2 (観測事象 G_{T-1} の記述).

$$\begin{aligned} Near(Mike, John) \wedge Near(Paul, John) \wedge Far(Tom, John) \wedge \\ Noop(Mike) \wedge Walk(Paul) \wedge Walk(Tom) \wedge ToLeft(Paul) \wedge \\ ToLeft(Mike) \wedge Forward(Tom) \wedge InFrontOf(Paul, John) \wedge \\ InFrontOf(Mike, John) \wedge InFrontOf(Tom, John) \wedge \dots \wedge \\ Noop(John) \Rightarrow Do(walk) \end{aligned}$$

なお, 例 2 で用いた述語は次の 4 種類に分けられる.

距離 $Near(x, y), Far(x, y)$:

エージェント x はエージェント y の近く/遠くにいる.

位置関係 $InFrontOf(x, y)$:

被験者の操作するエージェントから見て, エージェント x はエージェント y の前にいる.

向き $Forward(x), ToLeft(x)$:

被験者の操作するエージェントから見て, エージェント x は前/左を向いている.

動作 $Noop(x), Walk(x)$:

エージェント x は立ち止って/歩いている.

4. 操作モデルの獲得

これまで述べてきた領域知識と観測事象を用いて, 仮説推論により被験者の操作モデルの獲得を試みる. 具体的には, 操作ルールと被験者の操作に関する領域知識 Σ と, 被験者の利用する操作ルールとそのルール間の優先順序に関する仮説 H を用いて, 観測事象 G を説明する. これにより以下の 3 つの条件を満たす解の仮説集合 h を求める. なお本研究では, h から導かれる, 優先度付きの操作ルール集合 $\langle P, \preceq \rangle$ が, 被験者の操作モデルを表す.

(1) $h \cup \Sigma \vdash G$

(2) $\Sigma \cup h$ が無矛盾.

(3) h の部分集合が上記の条件を満たさない.

定義 4 により G が時系列に沿って得られた観測事象 G_t の連言であることから, 1 番目の条件は, 証明可能性の推移則を適用して $h \cup \Sigma \vdash G_0, \dots, h \cup \Sigma \vdash G_t, \dots, h \cup \Sigma \vdash$

G_{end} と変換できる．さらに，定義5により G_t は $S_t \Rightarrow A_t$ であるから，演繹定理を適用して， $h \cup \Sigma \cup \{S_t\} \vdash A_t$ を示せば良い．例えば，例2で示した観測事象 G_{T-1} の証明は， $h \cup \Sigma \cup \{S_{T-1}\} \vdash Do(walk)$ に変換される．この論理式の説明の構造を図3に示す．ただし， $Rules$ は例1で示した $\{rule_1, rule_2, rule_3\}$ であり，一方，仮説集合 h として， G_0, \dots, G_{T-2} の証明から $h_{T-2} = \{rule_3 \in P\}$ が得られていると仮定する．図3に示す説明構造の生成プロセスは次のとおりである．

- (1) $Do(walk)$ を証明するには， σ_1 により， $action(rule_i) = walk$ ， $rule_i \in P$ ，そして $rule_i = \max_{\preceq} \{rule \mid Applicable(rule, S_{T-1})\}$ が全て真であることを示さなければならない．
- (2) $action(rule_i) = walk$ が成り立つために，動作部の操作が $Initiate(walk)$ である $rule_1, rule_2$ が $rule_i$ の候補となる．
- (3) $rule_i$ に $rule_1$ を代入した場合．
 - a $rule_1 \in P$ を証明するために， H から $rule_1 \in P$ を選定する．しかし，これでは P に含まれる $rule_1$ と $rule_3$ の条件部が等しく，各ルールの動作部の操作が等価ではないので， σ_3 が成り立たずバックトラックする．
- (4) $rule_i$ に $rule_2$ を代入した場合．
 - a $rule_2 \in P$ を証明するために， H から $rule_2 \in P$ を選定する．
 - b $rule_2 = \max_{\preceq} \{rule \mid Applicable(rule, S_{T-1})\}$ を証明するために， H から $rule_1 \preceq rule_2$ と $rule_3 \preceq rule_2$ を選定する．
 - c $h_{T-1} = \{rule_2 \in P, rule_3 \in P, rule_1 \preceq rule_2, rule_3 \preceq rule_2, \dots\}$

$$S_{T-1} = \{Near(Mike, John) \wedge Near(Paul, John) \wedge \dots \wedge Noop(Mike) \wedge Walk(Paul) \wedge \dots \wedge Noop(John)\}$$

$$A_{T-1} = Do(walk), \quad h_{T-2} = \{rule_3 \in P\}$$

$$Rules = \begin{cases} rule_1 : \text{if } Near(x, self), Noop(x), Noop(self) \text{ then } Initiate(walk) \\ rule_2 : \text{if } Near(x, self), Walk(x), Noop(self) \text{ then } Initiate(walk) \\ rule_3 : \text{if } Near(x, self), Noop(x), Noop(self) \text{ then } Initiate(turn) \end{cases}$$

$$H = \{rule_1 \in P, rule_2 \in P, \dots, rule_1 \preceq rule_2, rule_2 \preceq rule_1, rule_3 \preceq rule_2, \dots\}$$

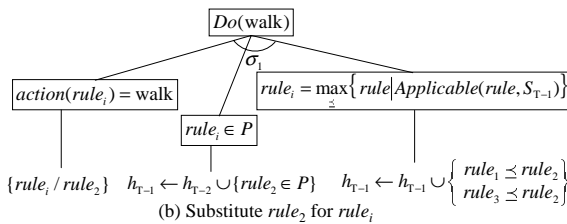
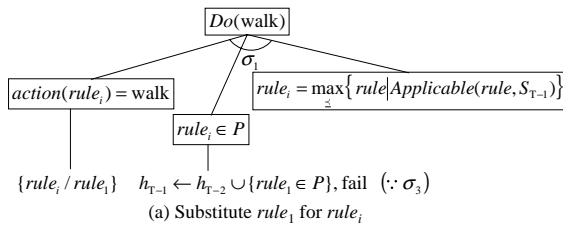


図3 $h \cup \Sigma \cup \{S_{T-1}\} \vdash Do(walk)$ の説明の構造

Algorithm 1 OperationModel(t) return (P, \preceq)

```

1:  $t$  /* 時刻 */
2:  $P$  /* 被験者の利用する操作ルールの集合 ( $P \subseteq Rules$ ) */
3:  $\preceq$  /* 操作ルールの優先度に関する順序関係 */
4:  $S_t$  /* 時刻  $t$  における被験者の観測した世界 */
5:  $A_t$  /* 時刻  $t$  における被験者の操作 */
6: if  $t < 0$  then
7:   return  $(\{\}, \{\})$ 
8: end if
9:  $(P, \preceq) \leftarrow OperationModel(t-1)$ 
   /* 被験者の操作が時刻  $t-1$  と同じ場合 */
10: if  $A_t = Continue$  then
11:   return  $(P, \preceq)$ 
12: end if
   /* 時刻  $t$  で被験者が新しい操作を開始した場合 */
   /* 極小なモデルの構築のために  $P$  内の操作ルールから選択 */
13: if choose  $p \in \{rule \mid Applicable(rule, S_t), A_t = Do(action(rule))\} \cap P$  then
14:    $\forall r \in \{rule \mid Applicable(rule, S_t)\}$  に対し， $p$  が  $r \preceq p$  となるように  $\preceq$  を更新する
15:   return  $(P, \preceq)$ 
16: end if
   /*  $P$  以外の新しい操作ルールから選択 */
17: if choose  $p \in \{rule \mid Applicable(rule, S_t), A_t = Do(action(rule))\} \setminus P$  then
18:    $P \leftarrow P \cup \{p\}$ 
19:   if Inconsistent?( $P$ ) then
20:     fail
21:   end if
22:    $\forall r \in \{rule \mid Applicable(rule, S_t)\}$  に対し， $p$  が  $r \preceq p$  となるように  $\preceq$  を更新する
23:   return  $(P, \preceq)$ 
24: end if
25: fail
    
```

Algorithm 2 Inconsistent?(P) return boolean value

```

1: if  $\exists p_i, p_j (p_i, p_j \in P \wedge (condition(p_i) = condition(p_j)) \wedge \neg(action(p_i) = action(p_j)))$  then
2:   return true
3: end if
4: return false
    
```

$rule_3 \preceq rule_2\}$ が得られる．

上記のプロセスを参加型シミュレーションの終了時刻まで続けることで，John を操作した被験者の操作モデルを獲得することができる．操作モデルを獲得する関数 OperationModel のアルゴリズムを Algorithm1 に示す．

関数 OperationModel の目的は，引数として与えられた時刻 t までの観測事象を矛盾なく説明する，被験者の極小な操作モデルを求めることである．ここでの矛盾とは，条件部が等しく動作部の異なる操作ルールが，被験者の利用する操作ルールの集合 P の中に存在することを意味する．したがって，本アルゴリズムでは， P が更新されるたびに，Algorithm2 を用いて P 内に矛盾がないかを確認する (ステップ19)． P の要素は関数 choose を用いて非決定的に選択されるため，矛盾が発生した場合は，choose で選択されなかった他の候補が選択される．なお，choose で選択する候補が存在しなかった場合は，関数 choose は false を返す．

また，極小な操作モデルを求めるために，関数 OperationModel は，時刻 $t-1$ で求めた P を用いて，時刻 t

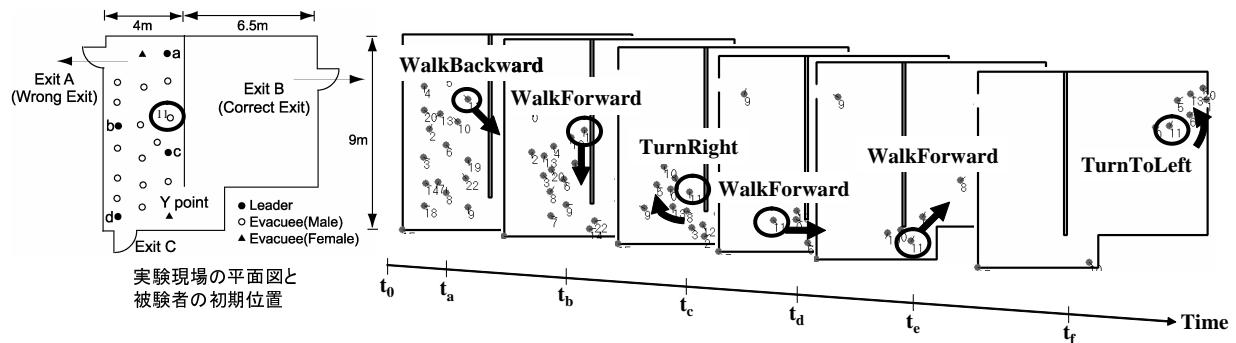


図 4 エージェント 11 を操作した被験者の操作ログ (各時刻のスクリーンショット (鳥瞰図) は、参加型シミュレーション後のインタビューで、被験者から操作ルールを獲得した場面と対応する)

の被験者の操作の説明を試みる (ステップ 13-16) . 時刻 $t-1$ で求めた P だけでは、時刻 t の被験者の操作を説明できなかった場合に、新たな操作ルールを選択する (ステップ 17-24) . 万が一、全ての候補で説明できなかった場合は fail を行い、時刻 $t-1$ の P を再度求め直す .

5. 応 用 例

本章では、提案したモデリングプロセスを避難誘導のドメインに適用し、その有用性について述べる .

5.1 避難ドメイン

仮想空間における避難誘導訓練に必要な避難者エージェントを構築するために、本研究で提案したモデリングプロセスを、参加型シミュレーションで避難者役を担った被験者の操作モデルの獲得に適用した . ただし、ここで構築する避難者エージェント群は、制御不能なパニック状態にある一様なエージェントではなく、相手を優先させたり、周囲に同調したりするなど、ある程度理性の機能した多様な避難者エージェントを対象とする . これは、パニックが起こる前にいかにして速やかに正しい出口に避難者を誘導するかを訓練の課題としているためである .

具体的には、実世界で行われた避難誘導に関する統制実験 [Sugiman 88] を例題として用いた . この実験の行われた部屋の構造と、避難者と誘導者の初期位置を図 4 の左側に示す . 全ての被験者と誘導者が入室後出口 C (ExitC) を閉め、避難の開始とともに出口 A (ExitA) と出口 B (ExitB) 開ける . 出口 A は全ての避難者から認識可能だが、出口 B は最初の時点で誘導者しかその存在を知らない . 避難者は誘導者によって出口 B に誘導される .

本研究では、まず実験の環境を三次元仮想空間プラットフォームである FreeWalk [Nakanishi 04] 上に再現した . 次に、16 体の避難者エージェントのうち 12 体を人間の操作するエージェントに置き換え、参加型シミュレーションを行った (図 5) . 参加型シミュレーションから得られたログデータに対し、提案手法を用いて避難者エージェントを操作した被験者の操作モデルを獲得する . なお、残りの 4 体の避難者エージェントと 4 体の誘導者エー

ジェントの振舞いは、シナリオ記述言語 Q で記述したシナリオにより制御した [Ishida 02, Murakami 03] .

5.2 モデリング手法の適用

避難者エージェント 11 (図 4 の円で囲まれたエージェント) を操作した被験者の操作ログを用いて観測事象を記述し、仮説推論により観測事象の説明を試みた . なお、領域知識として用いた操作ルールは、6 人の被験者へのインタビューで得られた以下の 18 個のルールである .

Rule1: 動いている人の方を向く .

Rule2: 誘導者が見えなければ、周囲を見回したり、後ろに下がったりして誘導者を探す .

Rule3: 大勢の人が向いている方向に向かう .

Rule4: 出口が見えないとき、周囲を見回す .

Rule5: 誘導者を見かけたら、その誘導者に近づく .

Rule6: 近くの誘導者に付いていく .

Rule7: 混雑しているところに向かう .

Rule8: 誘導者の動きを観測する .

Rule9: 誘導者が向かった方向に向かう .

Rule10: 大勢の人が向かった方向に向かう .

Rule11: 歩いている前方に混雑があると立ち止まる .

Rule12: 同じ方向に向かっている近くの人が歩けば、前に進む .

Rule13: 同じ方向に向かっている近くの人が立ち止まれば、歩くのを止める .



図 5 FreeWalk を用いた参加型シミュレーションの様子

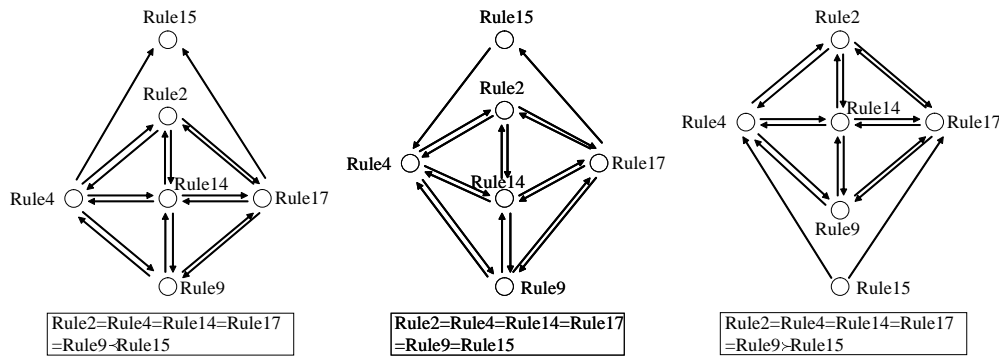


図 6 P_1 の操作ルール間の優先順序

- Rule14: 前にいる人について行く。
- Rule15: 歩いている前方に混雑があるとすり抜けて前に行こうとする。
- Rule16: 歩行中に前の人立ち止まると追い抜く。
- Rule17: 出口が見えれば、出口の方に向かう。
- Rule18: 出口に向かう前に再度周囲を見回す。

避難者エージェント 11 の操作ログの説明から得られた操作ルールの集合を表 1 に示す。各操作ルール集合は、論理に基づいて獲得されているため、観測された事象に対して無矛盾な説明を生成すること（正当性）は保証される。一方、その妥当性に関しては、録画した画面を操作者に見せながら逐次収集した操作ルールと比較することで検証される。今回は検証の結果、収集された操作ルールと P_1 が一致することが確認された。ただし、このような妥当性の検証を全被験者に対して行うのはコストが大きく現実的ではない。

そこで、獲得された操作ルール集合を活用し妥当な操作ルール集合を獲得するために、質問・応答機構を用いた絞り込み手法が有効と考えられる。これは、操作ルールの集合を二手に分け、一方の操作ルール集合でのみ説明できる、ログデータには無い新しい状況設定とその時のエージェントの操作を作成し、操作者に質問するものである。例えば、表 1 の場合「出口に向かう誘導者を見たとき、出口に向かうか。それとも周囲を見渡すか。」と質問することで、その答えにより $\langle P_1, P_2 \rangle$ が $\langle P_3, P_4 \rangle$ のどちらかに絞り込むことが可能である。このような質問・応答を繰り返すことで、最終的に一つの操作ルール集合に絞り込んでいくことができる。このように、複数の操作ルール集合を獲得しようとも、最終的に最も被験者のモデルに類似したものを選択できる絞り込みルールを、自動的に生成することが今後の課題である。なお、最終

的にどのモデルも残らなかった場合は、領域知識の操作ルール数が十分でなかったと考えられ、再インタビューにより新しい操作ルールの獲得を試みる必要がある。

一方、 P_1 に含まれる操作ルール間の優先順序は、図 6 に示すように 3 種類獲得された。図 6 では、操作ルール間の優先順序を矢印で示しており、その矢印の向きは優先順序の高い方を表す。なお、 $Rule1 \leq Rule2$ かつ $Rule2 \leq Rule1$ の関係が成り立つ場合は、 $Rule1 = Rule2$ と等価であり、両方向に伸びた矢印は優先順序が等しいことを意味する。

操作ルールの実行選択にこれら 3 種類の優先順序を用いると、どれも先ほどのインタビューで得られた操作ルールの実行順序と一致した。具体的には、図 4 の操作ログから算出された、被験者の世界 $S_{t_a}, S_{t_b}, S_{t_c}, S_{t_d}, S_{t_e}, S_{t_f}$ において、発火可能なルール $\{Rule2, Rule14, Rule17\}$, $\{Rule4, Rule9, Rule14\}$, $\{Rule2, Rule4\}$, $\{Rule2, Rule4, Rule14\}$, $\{Rule9, Rule14, Rule17\}$, $\{Rule15\}$ に対し、 $Rule2, Rule9, Rule4, Rule14, Rule17, Rule15$ がそれぞれ選択され、インタビューにおいて各状態で得られた操作ルールと一致した。ただし、図 6 に示した優先順序は、ほとんどのルールが同順位のため、正しい実行順序を説明すると同時に他の実行順序の可能性も多く含み、実行順序の適合度が低い。そこで、優先順序を一意に定められるよう、専門家の説明構造の分析による操作ルールの条件部の詳細化が必要である。

このように獲得された操作モデルは、一見自明で事前知識による構築も可能であるように考えられる。ただし、蓄積された事前知識は様々な人から様々なケースで収集された知識であり、人のタイプによってどのような行動ルールを持ち得るかが明確に示されていない。本研究は、参加型シミュレーションで獲得された実際のデータに則し、ある状況設定の下で各被験者が利用した操作ルールの推定を可能にした点で有用と考えられる。

表 1 エージェント 11 を操作した被験者の操作ルール集合

P	操作ルールの集合
P_1	$P = \{Rule2, Rule4, Rule9, Rule14, Rule15, Rule17\}$
P_2	$P = \{Rule2, Rule4, Rule9, Rule14, Rule16, Rule17\}$
P_3	$P = \{Rule2, Rule4, Rule14, Rule15, Rule17, Rule18\}$
P_4	$P = \{Rule2, Rule4, Rule14, Rule16, Rule17, Rule18\}$

6. おわりに

エージェントを用いた仮想訓練システムをより現実的なものにするには、エージェントの振舞いを視覚的に忠実に再現するだけでなく、多様なエージェントモデルを

構築することも必要である。本研究では、多様なエージェントモデルの構築に向けた、最初のステップとして、エージェントを操作した被験者の操作モデルを獲得することを目的として、以下の二つの課題に取り組んだ。

ユーザ固有のモデルの獲得 参加型シミュレーションのログデータを用いて各被験者の操作を説明することで、個々の被験者の操作モデルを獲得することが可能になった。説明に用いられた操作ルールの組合せとルール間の優先順序により、各被験者は特徴付けられる。

モデルの一貫性の保証 各操作ルールが、モデリング対象の被験者によって利用されたかどうかを仮説とし、仮説の矛盾のない選択を保証する仮説推論に基づいたモデリングプロセスを確立した。このプロセスにより、モデルの一貫性を保ちながら、多様な操作ルールを用いて被験者の操作モデルを構築することが可能になった。

謝 辞

京都大学の杉万俊夫教授、中西英之助手に多大な御協力を頂きましたことをここに感謝します。また、本研究は、日本学術振興会科学研究費基盤研究(A)(15200012, 2003-2005)の補助を受けました。なお、FreeWalk/Qは、科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業の「デジタルシティのユニバーサルデザインプロジェクト」により開発されました。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Cassell 00] Cassell, J., Bickmore, T., Campbell, L., Vilhjalmsson, H., and Yan, H.: Human Conversation as a System Framework: Designing Embodied Conversational Agents, in Cassell, J., Prevost, S., Sullivan, J., and Churchill, E. eds., *Embodied Conversational Agents*, pp. 29–63, MIT Press (2000)
- [Cavazza 02] Cavazza, M., Charles, F., and Mead, S.: Interacting with Virtual Characters in Interactive Storytelling, in *Proc. of the First International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems*, pp. 318–325 (2002)
- [Ishida 02] Ishida, T.: Q: A Scenario Description Language for Interactive Agents, *IEEE Computer*, Vol. 35, No. 11, pp. 54–59 (2002)
- [Johnson 00] Johnson, W., Rickel, J., and Lester, J.: Animated Pedagogical Agents: Face-to-Face Interaction in Interactive Learning Environments, *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol. 11, pp. 47–78 (2000)
- [Lester 00] Lester, J., Towns, S., Callaway, C., Voerman, J., and FitzGerald, P.: Deictic and Emotive Communication in Animated Pedagogical Agents, in Cassell, J., Prevost, S., Sullivan, J., and Churchill, E. eds., *Embodied Conversational Agents*, pp. 123–154, MIT Press (2000)
- [Marsella 02] Marsella, S. and Gratch, J.: A Step Toward Irrationality: Using Emotion to Change Belief, in *Proc. of the First International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems*, pp. 334–341 (2002)
- [Murakami 03] Murakami, Y., Ishida, T., Kawasoe, T., and Hishiyama, R.: Scenario Description for Multi-Agent Sim-

ulation, in *Proc. of the Second International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, pp. 369–376 (2003)

- [Nakanishi 04] Nakanishi, H.: FreeWalk: A Social Interaction Platform for Group Behaviour in a Virtual Space, *International Journal of Human Computer Studies*, Vol. 60, No. 4, pp. 421–454 (2004)
- [Pelachaud 02] Pelachaud, C., Carofiglio, V., Carolis, B., Rosis, F., and Poggi, I.: Embodied Contextual Agent in Information Delivering Application, in *Proc. of the First International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems*, pp. 758–765 (2002)
- [Poole 87] Poole, D.: Theorist: A Logical Reasoning System for Defaults and Diagnosis, in Cercone, N. and McCalla, G. eds., *The Knowledge Frontier*, Springer-Verlag (1987)
- [Rickel 99] Rickel, J. and Johnson, W.: Virtual Humans for Team Training in Virtual Reality, in *Proc. of the Ninth International Conference on Artificial Intelligence in Education*, pp. 578–585 (1999)
- [Sugiman 88] Sugiman, T. and Misumi, J.: Development of a New Evacuation Method for Emergencies: Control of Collective Behavior by Emergent Small Groups, *Journal of Applied Psychology*, Vol. 73, No. 1, pp. 3–10 (1988)
- [Sukthakar 04] Sukthakar, G., Mandel, M., Sycara, K., and Hodgins, J.: Modeling Physical Capabilities of Humanoid Agents Using Motion Capture Data, in *Proc. of the Third International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems*, pp. 344–351 (2004)
- [Traum 02] Traum, D. and Rickel, J.: Embodied Agents for Multi-party Dialogue in Immersive Virtual Worlds, in *Proc. of the First International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems*, pp. 766–773 (2002)
- [Wray 03] Wray, R. and Laird, J.: Variability in Human Behavior Modeling for Military Simulations, in *Proc. of Behavior Representation in Modeling and Simulation Conference* (2003)

〔担当委員：桜井 成一郎〕

2005年6月6日 受理

— 著 者 紹 介 —



村上 陽平

2001年京都大学工学部情報学科卒。2003年同大学院社会情報学専攻修士課程修了。現在、同大学院社会情報学専攻博士課程に在学中。マルチエージェントの組織形成に興味を持つ。



杉本 悠樹

2003年京都大学工学部情報学科卒。2005年同大学院社会情報学専攻修士課程修了。同年、西日本電信電話株式会社入社。マルチエージェントシミュレーションに興味を持つ。



石田 亨(正会員)

1976年京都大学工学部情報工学科卒業、1978年同大学院修士課程修了。同年日本電信電話公社電気通信研究所入所。ミュンヘン工科大学、パリ第六大学、メリーランド大学客員教授など経験。工学博士。IEEEフェロー。情報処理学会フェロー。現在、京都大学大学院情報学研究所社会情報学専攻教授、上海交通大学客員教授。自律エージェントとマルチエージェントシステム、セマンティック Web 技術に取り組む。デジタルシティ、異文化コラボレーションプロジェクトを推進。