

避難シミュレーションにおける反応閾値モデルによる 複数タスクのモデル化

Modeling Multiple Tasks by the Response Threshold Model in Evacuation Simulation

鶴島 彰

Akira Tsurushima

セコム株式会社 IS 研究所
SECOM CO., LTD., Intelligent Systems Laboratory

It is widely known that herd behavior, a cognitive bias in humans, causes irrational or inappropriate behaviors in evacuation situations. In this paper, we propose the evacuation decision model for herding based on the biological response threshold model. We also show that the proposed model can be applied for multi task problems in which the agents must choose two or more tasks to perform such as evacuation and fire fighting.

1. はじめに

災害避難の現場において、避難行動に対する認知バイアスの影響が指摘されている。代表的なものとして正常性バイアスと同調行動があり、その影響による避難行動の遅れや非効率、不合理な行動がしばしば大きな被害に結びついている。

このような認知バイアスや心理的要因を、シミュレーションモデルに組み込み、よりリアルな状況を再現しようとする試みがいくつか行われてきた [Tsai 11, Bulumulla 17]。しかし、これらのモデルの多くは認知バイアスを、事前定義したシナリオやルールとして直接エージェントに組み込んでいるため、予め設計者が想定した状況下でその行動が再生されるのみであり、未知の状況下における認知バイアスの影響の分析や、認知バイアスを誘発させる原因の探求などの、より踏み込んだ研究の目的には適さない。

一方、[Helbing 00] は、ソーシャルフォースモデルにより、パニック状況における人間の避難行動をモデル化し、事前定義したシナリオやルールを使うことなく、アーチ形状の滞留や出口の非対称な使用などの特徴的な行動を再現してみせた。しかし、[Helbing 00] のモデルは、速度、力、摩擦などの物理量のみ（壁から離れたい、などの心理的な効果も物理量に置き換えられている）で組み立てられたものであり、認知バイアスのような認知的な要因を組み込むことはそのままでは難しい。

本稿は、災害避難状況における人間の同調行動に焦点を当て、それが避難行動におよぼす影響をモデル化する。そして、これを拡張することにより、たとえば救助活動や消火活動などの避難以外の行動を導入したとき、対立する二つの行動間でジレンマ状態に晒されるエージェントの行動モデルを提案する。

2. 反応閾値モデル

同調行動とは、（自分の意志や意図でなく）他者の行動により自分の行動を決定する一連の行為の連携であり、心理学や社会学、動物行動学など様々な分野で研究されている。同調行動が発生するためには、集団の中に、自分の意志によって行動する個体と、他人の行動に影響されて行動する個体の二種類が必要になる。前者がいなければ、集団中にいかなる行動も発生

しないので、このことは明らかであろう。以後、前者をリーダー、後者をフォロワーと呼ぶことにする。

同調行動を記述するには、集団をリーダーとフォロワーに割り当てる必要がある。そのため、どの個体をリーダーにし、どの個体をフォロワーにするか、その役割は永続的なのか動的に変わるのか、リーダーとフォロワーの比率はどれくらいで、その比率は定常的なのか動的に変化するのか、変化するのであればその規則はどんなものなのか、といった疑問に答える必要が出てくる。本稿ではこれらを説明するモデルとして、生物学や生態学の分野で、真社会性生物の分業の説明に使用される反応閾値モデル [Bonabeau 96] を採用する。

実行すべきタスクがあり、そのタスクに関連付けられた刺激 s があるとすると、タスクに従事する個体数が少なく、遂行度が十分でない時、刺激 s は増加し、タスク遂行が十分なとき s は抑制される。個体は心的状態を表す確率変数 X と個別の反応閾値 θ をもつ。 $X = 1$ のとき個体は活動的であり、 $X = 0$ のとき非活動的である。個体は以下の確率で活動的になる。

$$P(X = 0 \rightarrow X = 1) = \frac{s^2}{s^2 + \theta^2} \quad (1)$$

個体は以下の固定確率で非活動的になりタスク遂行を止める。

$$P(X = 1 \rightarrow X = 0) = \epsilon \quad (2)$$

タスクに関連した刺激の強度は以下の式により与えられる。

$$s(t+1) = s(t) + \delta - \alpha \frac{c}{C} \quad (3)$$

ただし、 δ は単位時間あたりの刺激の増加量、 α はタスク遂行効率のスケールファクター、 c は現在タスクに従事する個体数、 C は全体の個体数を表す。

3. 避難意思決定モデル

2. 節で示した反応閾値モデルを避難シミュレーションに適用するための避難意思決定モデルを提案する。実行すべきタスクとしては、部屋を表す閉鎖空間内にいる全てのエージェントが部屋の外に出る作業とする。エージェントは二つの心的状態をとり、 $X = 1$ のときはリーダーとして自分の判断で避難を行い、 $X = 0$ のときはフォロワーとして近傍内の最も多いエージェントの取る行動に同調する。

連絡先: 鶴島 彰

セコム株式会社 IS 研究所

a-tsurushima@secom.co.jp



図 1: 避難シミュレーションの例

式 3 における c と C は、実際には各エージェントが知ることが難しい大域的な情報なので、これらの代わりにタスクの遂行状況を指し示す局所的な推定値を導入する。ここでのタスクは、全エージェントが部屋から出る事なので、各エージェントの周囲のエージェント数とその推定値として利用できる。作業の遂行度を推定する進捗関数 F を次のように定義する。

$$F(n) = \begin{cases} 1 - n/N_{max} & n < N_{max} \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 n はエージェントの近傍にいるエージェント数、 N_{max} は近傍における最大エージェント数を表す固定値である。

部屋または空間を表す環境は、客観的なリスクを表す値 r を持っており、この情報には室内の全てのエージェントがアクセスできる。環境内の全ての場所においてリスク値は同一であるとする。エージェントは、個体に固有の値 θ と μ を持ち、 θ は反応閾値、 μ はエージェントのリスク感度を表すパラメータである。各エージェントのリスク認知 R を以下の関数で表す。

$$R(r) = \frac{1}{1 - e^{g(r-\mu)}} \quad (5)$$

ただし、 g はシグモイド関数の曲率を表すパラメータである。

避難タスクの刺激 s として、式 3 の刺激抑制項を、タスクの進捗に加えて、個体の安全の認知（1 からリスク認知を引いたもの）で拡張し、以下のように定義する。

$$s(t+1) = \max\{s(t) + \hat{\delta} - \alpha(1-R)F, 0\} \quad (6)$$

ただし $\hat{\delta}$ は単位時間あたりの刺激の増加分である。

$$\hat{\delta} = \begin{cases} \delta & \text{if } r > 0 \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (7)$$

s は時間とともに増大するが、 $r < \mu$ のとき、または近傍の人数が少なくなったとき、 α が働き抑制的となる。また、タスクが十分以上に遂行された事を意味する負の値をとると、式 1 が正となり、不必要に活動的になってしまう事を避けるため非負としている。

図 1 に避難意思決定モデルを組み込んだエージェントによる避難シミュレーションの例を示す。この例では 16×128 グリッドの部屋に配置された 600 人のエージェントが、線形に増加する r 値によって避難行動を行っている様子が示されている。室内のエージェントは唯一の出口がある左方向に向かって避難を行っている。図において赤で示されたエージェントは $X = 1$ のもの、緑で示されたエージェントは $X = 0$ かつすでに行動中のもの、黄色で示されたエージェントは $X = 0$ かつまだ行動を起こしていないものである。

図 1 は避難の途中であるが、エージェントは空間に一樣に分布しておらず、所々に塊を作りながら不均一に分布している。また未だ行動を起こしていない（黄色い）エージェントが、出口から最も遠い右端にのみ分布している。これは、全てのエージェントが左方向に移動するため、部屋の右端にいるエージェントは同調行動の影響を受けにくいからである。

4. 複数タスク避難意思決定モデル

3. 節で示した避難意思決定モデルは、全てのエージェントは部屋から外に出るという、単一のタスクしか持っていなかった。本節では避難タスクに加えて、救助活動や消火活動といった新たなタスクを導入して、複数タスクの遂行を求められるエージェントをモデル化する。エージェントが実行できるのは、一度に一つのタスクのみのため、シミュレーション中のエージェントは対立する二つのタスク間でジレンマ状態に置かれている。

エージェントは、避難タスクを表す X_1 、消火タスクを表す X_2 の二つの確率変数を持ち、確率変数が 1 を取るとき、そのタスクに従事するとする。ただし二つの確率変数が同時に 1 を取ることはないものとする。 X_1 、 X_2 がどちらも 0 のとき、エージェントはフォロワーの状態にあり同調行動を行う。同調行動では、周囲のエージェントが行っている行動のうち、最も従事しているエージェント数の多い行動を行う。

エージェントは X_1 、 X_2 のそれぞれに対し、反応閾値 θ_1 、 θ_2 と、タスクに関する刺激 s_1 、 s_2 を持つ。 X_1 に対する進捗関数 F_1 、タスク刺激 s_1 は、それぞれ式 4、式 6 と同じであるが、 X_2 の進捗関数に関しては消火タスクへの過剰な割当てを防ぐ目的で、

$$F_2(n) = \begin{cases} 1 - \text{abs}(\frac{n_2 - \xi}{N_{max}}) & n_2 < N_{max} \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (8)$$

とした。さらにタスク刺激を

$$s_2(t+1) = \max\{s_2(t) + \hat{\delta}_2 - \alpha_2 R F_2, 0\} \quad (9)$$

とする。ただし式 8 の n_2 は消火タスク X_2 に従事しているエージェント数、 ξ は局所領域あたりの消火タスクに対するエージェントの最適割当数を表し、 $r > \mu$ かつ $n_2 = \xi$ のとき最も抑制的になることを意味する。

環境のリスク r は、 n_2 により以下のように変化する。

$$r(t+1) = \max\{r(t) - \gamma n_2 + \pi, 0\} \quad (10)$$

ただし γ は消火タスクに関するスケールファクター、 π は単位時間あたりの増加分とする。

以上より、複数タスク避難意思決定モデルは以下のようになる。

$$P_1(X_1 = 0 \rightarrow X_1 = 1) = \frac{s_1^2}{s_1^2 + \theta_1^2} \quad (11)$$

$$P_2(X_2 = 0 \rightarrow X_2 = 1) = \frac{s_2^2}{s_2^2 + \theta_2^2} \quad (12)$$

$$P_1(X_1 = 1 \rightarrow X_1 = 0) = \epsilon_1 \quad (13)$$

$$P_2(X_2 = 1 \rightarrow X_2 = 0) = \epsilon_2 \quad (14)$$

エージェントが実行できるタスクは一度に一つなので、 X_1 、 X_2 のうちから一つを選ばねばならない。この競合解消法として、

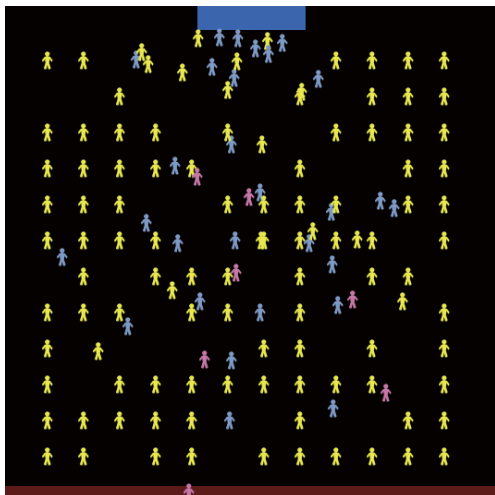


図 2: 避難消火シミュレーションの例

$P_i(X_i = 0 \rightarrow X_i = 1) > P_j(X_j = 0 \rightarrow X_j = 1) + offset$ を i への状態遷移の条件とし、 X_i, X_j の値に関わらず常に P_i, P_j を計算し、その差が $offset$ 以上になると $X_i = 1 \wedge X_j = 0$ に遷移する。

5. 避難消火シミュレーション

本節では、避難と消火の二つのタスクを想定したシミュレーションについて説明する。図 2 のような 40×40 グリッドの部屋に、144 人のエージェントが整列して配置されている。144 人のエージェントには、 θ_1 と θ_2 と μ が $(0, 100]$ の範囲でランダムに割り当てられている。部屋上部の青い部分は部屋からの出口を、下部の薄赤の部分は消火活動の行われる場所を示している。青いエージェントは $X_1 = 1$ のもの（避難行動）、赤いエージェントは $X_2 = 1$ のもの（消火行動）、黄色いエージェントは $X_1 = 0 \wedge X_2 = 0$ のものである。シミュレーションの初期には全てのエージェントは黄色で、一定の間隔で室内に配置されている。避難行動を行うエージェントは出口に向かって移動し、消火行動を行うエージェントは、 $r > 0$ なら部屋の下部に向かって移動し、そうでなければ初期の配置に戻る。シミュレーション初期には環境のリスクは $r = 0$ で、シミュレーションが開始されると式 10 に従って変化していく。

図 2 は、シミュレーションを開始してすぐの画面である。リスク値の増加により、すでに多くのエージェントが避難を開始しており、それらの中には同調行動を行う黄色のエージェントも混じっている。また、比較的少数のエージェントが消火活動に従事しているのも見られる。

この後エージェントには、避難行動をするもの、消火行動をするもの、同調行動により避難や消火をするもの、一方の行動を打ち切り別の行動に切り替えるもの、一度は部屋から出たにも関わらず再び戻って来るもの、一度動き出したにも関わらず再び停止してしまうものなど、多様な行動をとるものが現れ、シミュレーションは複雑な様相を示すようになる。シミュレーション終了時には、ほとんどのケースで消火に成功するが、消火に失敗し、全てのエージェントが避難して無人になってしまうこともある。なお、上記のシミュレーションで使ったパラメータは、 $\epsilon_1 = 0.3, \epsilon_2 = 0.0, \delta_1 = 1.0, \delta_2 = 0.2, \alpha_1 = 1.2, \alpha_2 = 1.2, g = 1.0, N_{max} = 10, \xi = 5.4, \gamma = 0.05, \pi = 0.7$ である。また、エージェントの進行方向に向かって 180 度、半

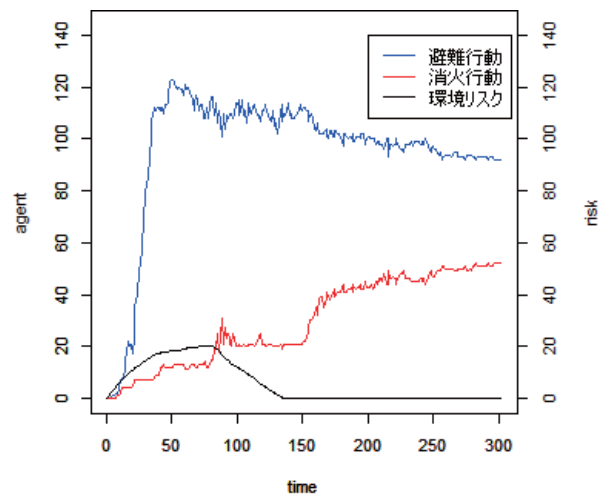


図 3: 環境リスクと避難行動、消火行動の変化

径 10 グリッドの範囲をエージェントが影響を受ける近傍であるとした。

6. 分析

図 3 に、シミュレーション中の環境リスク、避難行動、消火行動に携わるエージェント数の変化の一例を示す。シミュレーションが始まるとすぐに、同調行動により避難行動をとるエージェントが増加するが、同時に少数のエージェントが消火活動を行う。やがて消火エージェントが増えると環境リスクが減少し、それにともなう消火エージェント数が増え、避難エージェント数が減少していく。

避難意思決定モデルは、エージェントの心的状態の確率的变化を記述したモデルであるから、シミュレーション期間中のエージェントの心的状態の遷移を分析することにより、エージェント全体の動きを調べることができる。ここで、避難消火シミュレーションを 20 回行った結果の、2880 人（144 人 $\times$ 20）のエージェントの心的状態が、シミュレーション中にどう変化したかについて分析してみよう。

同調行動を 0、避難行動を 1、そして消火行動を 2 とした時、各行動間の遷移の頻度を図 4 に示した。図を見ると、同調行動 (0) と避難行動 (1) の間で頻繁に遷移が起きているが、消火行動 (2) と他の行動の間ではほとんど遷移が起きない事が読み取れる。これは、 $\epsilon_2 = 0.0$ と設定したこと、 δ_1, δ_2 に大きな差があることが主な原因となっている。しかし X_1, X_2 のパラメータを同じにしても、避難行動と消火行動間の遷移はほぼ発生せず、二つの行動間で遷移が起きるのは、ほとんどの場合、同調行動を通してであることが分かった。

状態遷移の頻度によりエージェントを特徴づけるため、階層型クラスタリングを使って、2880 人のエージェントを四グループに分類した (表 1)。大多数が属するグループ 1 のエージェントは、避難行動と同調行動を交互に繰り返す。グループ 2 は、避難と消火の両方を行うが、両者間の遷移は頻繁ではなく、しばらく一方を行ってから他の行動に移るという動きである。グループ 3 は、同調行動によって消火行動に従事する例外的なエージェントで、グループ 4 はほぼ常に消火活動に従事するエージェントである。このように同調行動は、消火よりも避難に対してより強く働く。

これらのグループと、エージェントのもつ反応閾値との関係を示したのが図 5 である。図 5 は、横軸に θ_1 縦軸に θ_2 を取っ

グループ	size	$0 \rightarrow 1$	$1 \rightarrow 0$	$0 \rightarrow 2$	$2 \rightarrow 0$	$1 \rightarrow 2$	$2 \rightarrow 1$	$0 \rightarrow 0$	$1 \rightarrow 1$	$2 \rightarrow 2$
1	2178	0.1900	0.1884	0.0009	0.0	0.0001	0.0006	0.1583	0.4402	0.0215
2	411	0.0426	0.0445	0.0052	0.0	0.0002	0.0021	0.1550	0.1032	0.6472
3	26	0.0037	0.0040	0.0033	0.0	0.0	0.0004	0.7107	0.0085	0.2694
4	265	0.0024	0.0026	0.0035	0.0	0.0002	0.0004	0.0736	0.0052	0.9119

表 1: 状態遷移の頻度によるエージェントの分類

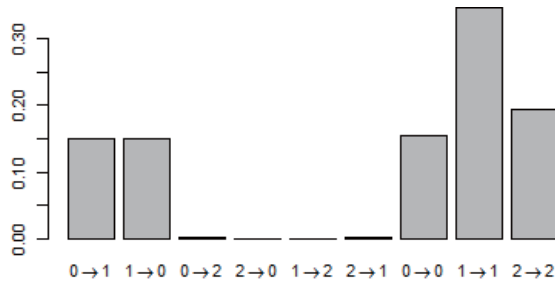


図 4: 心的状態の遷移の頻度

た散布図に各グループを示したものである。図から、グループ 1 はパラメータに関わらず空間全体に広がり、グループ 2 と 4 は θ_2 に影響され、特にグループ 4 はその傾向が強く、グループ 3 は主に θ_2 が大きい領域で例外的に現れる事が分かる。

7. まとめと今後の課題

避難意思決定モデルは、反応閾値モデルをベースに、避難状況での人間の同調行動を再現したもので、これまで筆者らが避難状況における人口密度の影響や、出口選択問題 [Helbing 00] の分析などに活用してきたものを、消火などの複数タスクがある状況へと拡張したものである。むろん 6. 節で示したような行動は、 θ_1, θ_2, μ などのパラメータ設定に左右され、設定によっては二つの状態間での振動が頻繁になるなど不自然な動きも起きるが、本モデルは避難状況での様々な行動を再現する潜在力をもつと考えている。

本モデルは心理的な要因のみを扱ったものであり、人間行動のモデルとしては、高次認知と物理的要因という二つの重要な要素が欠けている。たとえば、本稿で示したシミュレーションでは、エージェントは最短経路を探索しようとしもしないし、目の前に他人がいてもそれを通り抜けてしまう。現実的なシミュレーションを行うには、これら二つは不可欠であろう。同時に避難意思決定モデルは、複数の心的状態を確率的に切り替える単純なモデルに過ぎず、それらの状態のとき何を行うかについては言及していない。だから、心的状態のひとつを高次認知のモデルにしたり、本モデルの出力を、たとえば [Helbing 00] のモデルなどに繋げることで、高次認知や物理的行動モデルと自然に繋げていくことは、おそらく容易であろうと考える。

最後に、避難意思決定モデルの実証的な検証は困難で、特に現実のデータが乏しい避難状況などに関しては極めて難しい。この問題については、やや遠回りではあるが、たとえば出口選択問題のような、人間の認知過程が影響すると考えられる、避難状況に特異な現象をひとつひとつ定性的に再現してみせることによりアプローチしていきたい。

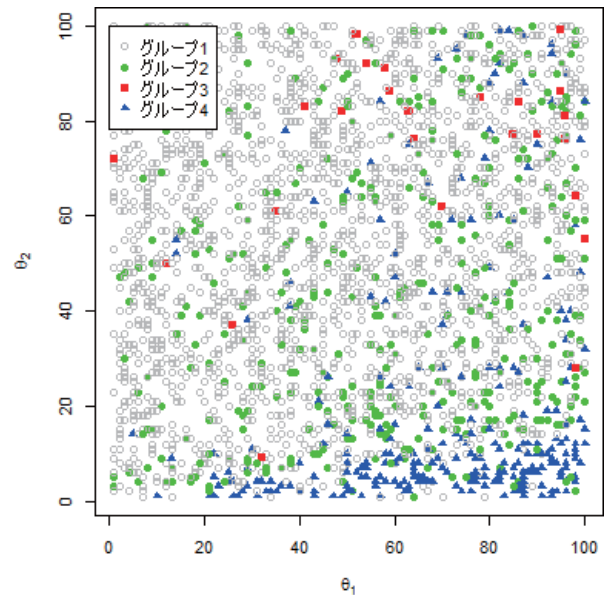


図 5: 反応閾値とエージェントの種類

参考文献

- [Bonabeau 96] Bonabeau, E., Theraulaz, G., and Deneubourg, J.-L.: Quantitative study of the fixed threshold model for the regulation of division of labour in insect societies, *Proceedings of The Royal Society B*, Vol. 263, No. 1376, pp. 1565–1569 (1996)
- [Bulumulla 17] Bulumulla, C., Padgham, L., Singh, D., and Chan, J.: The importance of modeling realistic human behaviour when planning evacuation schedules, in *Proceedings of the 16th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems AAMAS 2017*, pp. 446–454 (2017)
- [Helbing 00] Helbing, D., Farkas, I., and Vicsek, T.: Simulating dynamical features of escape panic, *Nature*, Vol. 407, No. 28, pp. 487–490 (2000)
- [Tsai 11] Tsai, J., Fridman, N., Bowring, E., Brown, M., Epstein, S., Kaminka, G., Marsella, S., Ogden, A., Rika, I., Sheel, A., Taylor, M. E., Wang, X., Zilka, A., and Tambe, M.: ESCAPES - evacuation simulation with children, authorities, parents, emotions, and social comparison, in *Proceedings of 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems AAMAS 2011*, pp. 457–464 (2011)