

# マルコフ決定過程による場所の避難安全性 の評価について

長崎総合科学大学総合情報学部 王 琦  
 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 張 景耀  
 内モンゴル工業大学経済管理学院 楊 布和額尔敦

Qi Wang Jingyao Zhang Buheeerdun Yang

Faculty of Applied Information Technology, Nagasaki Institute of Applied Science  
 Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto University  
 School of Economics and Management, Inner MonGolia University of Technology

## 1 はじめに

災害発生時や災害の危険が迫っている状況において、円滑な避難行動は重要な課題である。その目的で行われている研究では、最小の待ち時間または、最短の避難経路に基づいた研究がほとんどである。しかし、安全に避難できる要因は避難者、避難経路、避難時間であるため、すべての要因を考慮した上に、事前に場所の避難安全性を評価する研究は少ない。

Kana & Singer[1] は Russell & Norvig [3] のモデルを拡張し、海難が発生した際に乗客と船員のリスク認知を考慮した最適な避難経路をマルコフ決定過程のフレームワークで議論している。特に災害が発生する前に、船舶の特性から最適な避難経路に対して、数理モデルを構築し、分析する。位寄 [5] は火災状況の認識と心理状態の変化によって、火災建物からの人々の避難行動をシミュレーションで表現し、モデルの妥当性、設計への適用性について検討している。上記の研究では3つの要因の一部のみ考慮しているが、避難安全性の評価に対して、議論されていない。吉村 [9] は巨大化・複合化された建物の平面計画を避難安全性の側面から検討し、特に階層分析法による実際に存在する施設の避難安全性を評価し、その妥当性を検討している。

それらの研究を踏まえ、王ら [6] と Wang et al.[4] はそれぞれマルコフ決定過程による心理状態を考慮した数理モデルを構築し、安全に避難できる最適避難経路と設計を導き、新しいリスク評価関数として  $p_i(s, s'), i = 1, 2, \dots, n$  を導入し、各状態の安全性を比較する。 $s$  は現在の状態を表し、 $s'$  は次の状態である。また、心理状態を考慮した確率モデルとして、設計上の特定な地域（出口やエレベーターなど）以外の場所に安全な順位をつける。しかし、常に変化された状況に応じて、人間のリスク認知も変わるため、避難安全性の評価に対して、より現実的な問題に应用できる確率変数の決め方などに課題が残っている。本研究ではその課題を解決するため、場所の避難安全性を評価する方法を探索する。

以降、第2節にてモデルの説明を行い、第3節にて、避難者の視野距離の設定により場所の避難安全性の評価を行う。

## 2 モデル化

人工知能において、Russell&Norvig[3]では表(1)のような $4 \times 3$ の状態空間の環境に置かれているエージェントを想定し、探索問題を考える。エージェントは初期状態(1,1)から出発して、ステップごとに一つの行動を選択しなければならない。目標状態(4,3)に達したとき、行動を終了する。各々の場所で可能な動作は、前後左右となる。環境は完全観測可能であると仮定し、エージェントは常に自分の場所を知っているものとする。後戻りするしか移動できない状況に陥らない限り、後戻りせず、進行方向に対して上記のモデルと同様に意図された方向と90度以上に曲がらないものとする。

不確実性である意思決定の行動モデルを図1で示す。それぞれの行動は確率 $p_1$ で意図された行動を実現するが、確率 $p_2, p_3$ で意図された方向に対し直角に進む。ただし、 $\sum_{i=1}^3 p_i = 1$ 。さらに、エージェントは壁とぶつかった場合は同じ状態に留まる。例えば、出発点(1,1)の状態では、エージェントが確率 $p_1$ で意図された行動 $N$ を決定し、(1,2)へ移動し、確率 $p_2$ で右の(2,1)へ、確率 $p_3$ で左へ動こうとして壁にぶつかり、(1,1)に留まる。

次節ではこのモデルを設計の平面図と見直し、(4,3)は出口、(2,2) (ブラックのマス)は障害領域(アクセス不可能な地域)と想定する。火災が(4,2)から発生する場合、MDPによる導いた最適避難経路を評価する。

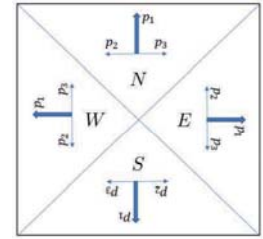


図1: 推移確率  $P(s'|s, a)$

## 3 避難安全性の評価

### 3.1 マルコフ決定過程について

本研究ではリスク認知を考慮した上に、リスクの目的関数の最小化(または安全性の最大化)することを目的とし、意思決定者が状態を観測しながら各時刻までの状況を基に決定を行う数理モデルとして定式化する際にマルコフ決定過程(Markov decision process, MDP)が用いられる(中出[7])。マルコフ決定過程は以下の要素から構成されている。

- 状態集合:  $s \in S$
- 行動集合:  $A = \{N, S, W, E\}$
- 推移確率:  $P(s'|s, a)$  は状態  $s \in S$  において決定  $a \in A$  をとるとき、次の状態が  $s' \in S$  となる確率である。
- 報酬関数:  $R(s, a)$  状態  $s \in S$  において決定  $a \in A$  をとるとき受け取る期待利得である。

MDPについては、下記無限期間総割引期待利得  $U^\pi(s)$  が目的関数とすると、それを最大化(または最小化)する最適政策  $\pi^*$  を発見するのが目指すところになる。

$$U^\pi(s) = E \left[ \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R(s_t) \right]$$

ここで  $\gamma$  は割引率、 $\pi$  は政策である。周知の Bellman 方程式は式(1)で最適政策を追い出すことができる。

$$U(s) = R(s) + \gamma \max_a \sum_s P(s'|s,a)U(s'). \quad (1)$$

### 3.2 リスク認知

前節のモデルを拡張し、緊急時における各状態にいるエージェントの心理過程などの人の要因を考慮した避難行動を推定する。エージェントが火災の煙などに対するの恐怖感をリスク認知として、各状態の安全性を報酬と見直しすると、最適な避難経路を探索する問題はリスクと報酬のバランスを考慮することになる。それは確定的な探索問題では生じないMDPの特徴である(Russell&Norvig[3])。本研究では式(1)の $R(s)$ を人間のリスク認知と定義し、 $U(s)$ は意思決定の根拠になる安全性を表す。 $U(s)$ を最大化する最適政策 $\pi^*$ は式(2)で与えられる。

$$\pi(s)^* = \arg \max_a \sum_s P(s'|s,a)U(s'). \quad (2)$$

$R(s)$ に表2の初期値 $R_0(s)$ を与え、推移確率 $p_1 = 0.8, p_2 = p_3 = 0.1, \gamma = 1$ の場合、式(2)の最適政策 $\pi^*$ に従って計算された $U^*(s)$ を表3で与え、最適政策 $\pi^*$ (つまり最適避難経路)は表4で示す。

(1,3)	(2,3)	(3,3)	(4,3)
(1,2)		(3,2)	(4,2)
(1,1)	(2,1)	(3,1)	(4,1)

表1: 障害(2,2), 出口(4,3), 出火点(4,2)のモデル

-0.04	-0.04	-0.04	1
-0.04		-0.04	-1
-0.04	-0.04	-0.04	-0.04

表2:  $R(s)$ の初期値

0.8116	0.8678	0.9178	+1
0.7616		0.6603	-1
0.7053	0.6553	0.6114	0.3879

表3: 居場所の安心感 $U^*(s)$

→	→	→	Exit
↑		↑	Fire
↑	←	←	←

表4: 最適避難経路

### 3.3 リスク認知により避難安全性の評価

Wang et al.[4]は各状態の安全順位をつける方法を研究したが、本研究ではそれ以外の状態の避難安全性を評価する方法を検討する。表4は、事前に人のリスク認知を想定し、MDPによる最適避難経路を推定されたが、災害が発生した際に、主観的なリスク認知が不確実性であり、避難経路の判明ができないケースが少なくない。例えば、避難警報が出されたにも関わらず、避難行動を行わない場合、時間とともに居場所の危険性が増し、事前に設計された避難経路の利用が不可能となる。本研究では、主観的な意思決定の影響で場所の避難安全性を評価する方法を探索する。火災において「煙が見えるかどうか」、「避難を始めた人を見たか否か」(位寄[5])等はリスク認知の指標として考える。それを踏まえて本研究では、視野距離を設定し、それぞれの場合によって場所の避難安全性を比較する。

### 3.3.1 視野距離が短い場合

視野距離の設定は避難情報が完全か不完全かによって、視野距離が長いと短い場合を分ける。具体的に、出火点が見える場合視野距離が短い、そうではない場合を視野距離が長いと定義する。まず、視野距離が短い場合下記  $a \rightarrow b \rightarrow c$  の順番で反復試行を行い、場所の避難安全性を評価する。

#### a. MDP による避難経路を求める

事前に各状態を  $R_0(s)$  とし、MDP により、最適政策つまり表 4 と同じような最適避難経路を求める。災害が発生する際に、エージェントは与えられた避難経路により避難行動を行う。状態  $s$  にいるエージェントは災害がどこで発生されるか把握できない場合、避難する避難者を見てから避難行動を行うと想定する。距離の関係で各状態にいるエージェントは避難を始める時刻が異なる。

#### b. 出火点から状態 $s$ に辿り着く時間 $T(i, s)$ を求める

隣接状態まで移動する時間を 1 とすると、表 4 の最適避難経路により出火点から状態  $s$  に辿り着く時間を  $T(i, s), i = 1, 2, \dots, n$  で定義する (ただし、 $T(0, s) = 0$ )。

#### c. リスク認知 $R_i(s)$ を求める

避難行動を行う時刻は遅くなるほど危険性が高まるため、リスク認知  $R_i(s), i = 1, \dots, n$  を式 (3) で表す。

$$R_i(s) = R_0(s) - \beta T(i, s) \quad (3)$$

ただし、 $\beta, 0 \leq \beta < \frac{R_0(s)+1}{T(i, s)}$  は割引率である。

式 (3) で求めた  $R_i(s)$  を利用し、再度 a の最適避難経路を導く。つまり、 $a \rightarrow b \rightarrow c$  の順番で反復試行を行い、避難経路、 $T(i+1, s), R_{i+1}(s)$  をそれぞれ求める。式 (4) を満たすまで反復試行を  $j$  回繰り返す。

$$T(j, s) = T(i, s), 1 \leq i < j \leq n. \quad (4)$$

数値計算 1 : 3 節のモデルに関して、反復試行した結果は下記ようになる。まず、表 5 は反復試行  $i = 1$  回目の場合、出火時刻  $t = 0$  とすると、各状態にいるエージェントが出火点から避難する避難者を見てから避難行動を行う時刻  $T(i, s)$  を表す。例えば、避難者は出火点から表 4 の避難経路順に、状態 (4,1) を通り、状態 (3,1) に到着する時間が  $T(1, (3, 1)) = 2$  になる。すなわち、(3,1) で出火点から避難する人が見える時刻は  $t = 2$  である。 $R_0(s)$  は表 2、 $R_1(s)$  は式 (3) で計算した結果は表 6 である。また、MDP により、求めた  $U_1(s)$  と最適避難経路を表 7 と表 8 で表す。

6	7	2	Exit
5		1	Fire
4	3	2	1

表 5: 時刻  $T(1, s)$

-0.1	-0.11	-0.06	+1
-0.09		-0.05	-1
-0.08	-0.07	-0.06	-0.05

表 6:  $R_1(s) = R_0(s) - \beta T(1, s), \beta = 0.01$

式 (4) を満たすまで反復試行を行うため、引き続き  $i = 2$  の場合、時刻  $T(2, s)$  を求める。表 8 により左側の半分 (状態 (1,1) から (2,3) まで) では出火点から直接に辿り着く経路がないため、それらの状態の時刻  $T$  を最大値  $T_{\max}(i, s) < \frac{R_0(s)+1}{\beta}$  で与える。それから反復試行の  $c \rightarrow a \rightarrow b$  順で  $R_2(s)$ , 避難経路、 $T(3, s)$  を求める。この一連の計算結果は下記図 2 で表す。図 2 より、 $T(3, s) = T(2, s)$  になるため、反復試行は終了となる。

0.61521	0.75428	0.89178	+1
0.50271		0.62602	-1
0.40515	0.42464	0.51214	0.28857

表 7:  $U_1(s)$

→	→	→	Exit
↑		↑	Fire
↑	→	↑	←

表 8:  $i =$  ときの最適避難経路

これから、反復試行の結果による、時間とともに最適避難経路も変わることを明らかにする。最初に避難を開始したエージェントはリスクが高いところを避け、安全な場所を通って避難したが(例えば、表 4 の (3,1) と (4,1) にいるエージェントは少し遠くても出火点 (4,2) を避けるルートで避難する)、徐々に、避難行動時刻は遅くなり遅いほど早く出口まで辿り着くようにリスクが高い場所 (3,2) でも避けずにそのまま通る(図 2 の避難経路)。

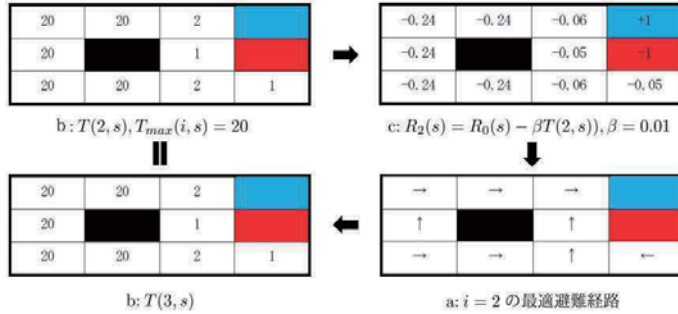


図 2: 反復試行  $i = 2$  の結果

数値計算 2: 異なる  $R_0(s)$  を表 9 で与えるとき、MDP による導いた最適避難経路は表 10 になる。反復試行の結果を図 3 で表す。

-0.08	-0.08	-0.08	1
-0.08		-0.08	-1
-0.08	-0.08	-0.08	-0.08

表 9: 初期値  $R_0(s)$

→	→	→	Exit
↑		↑	Fire
↑	←	↑	←

表 10: 最適避難経路

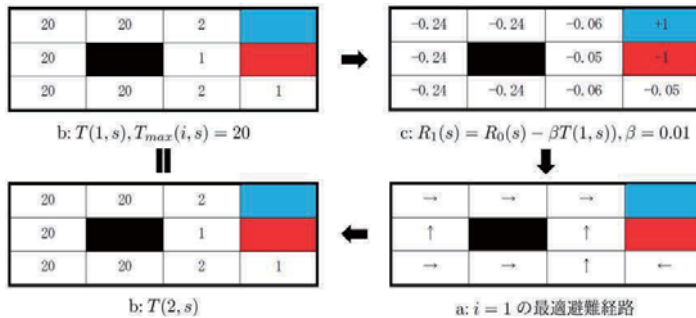


図 3:  $R_0(s)$  が表 9 の場合の反復試行結果

数値計算 1 と 2 の結果から、避難行動の開始時間が遅くなるにつれて、避難リスクは高くなるため、災害が発生すると、速やかに避難行動を行う必要がある。また、反復試行の回数によって、避難経路も変わった場所はリスクが高い場所と考えられ、避難安全性が低いことが明らかになった。

### 3.3.2 視野距離が長い場合

視野距離が長い場合、出火点が見えるため、反復試行せず、 $T(i, s)$  を直接に物理的な距離で計算する。本研究では、マンハッタン距離  $D(s, s') = \sum_{k=1}^n |s_k - s'_k|$  ( $n$  は状態空間の数) で  $T(i, s)$  の値を求める。状態 (1,2) と出火点の間に障害領域があるため、特別にマンハッタン距離ではなく近隣状態の  $T(i, s)$  値から  $T(i, (1,2))$  を計算する。

初期値  $R_0(s)$  は表 2 で与えられるとき、上記のマンハッタン距離、式 (3) と MDP で計算した  $T(1, s)$ 、 $R_1(s)$  と最適避難経路が図 4 となる。

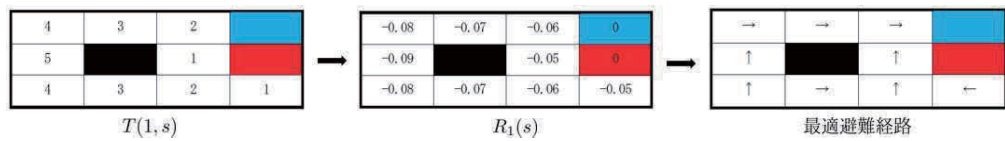


図 4: 視野距離が長い場合

図 2 と図 4 の最適避難経路はそれぞれ視野距離が長いと短い場合で推定されたものだが、出口まで物理的な距離が一番遠い (1,1) のみ経路は異なる。一方、両方とも表 4 と違うところが多いことが明らかになった。

## 4 おわりに

本研究では人間のリスク認知を考慮した避難モデルにおいてマルコフ決定過程による反復試行を行った。避難行動の開始時間が遅くなると危険性が高くなることを示した上に、場所の避難安全性を評価し、リスクが高い場所を推定した。

今後の課題としては、推定されたリスクが高い場所の避難誘導方法や時間差  $T(i, s)$  とリスク認知  $R_i(s)$  設定の妥当性を検討することである。また、不完全情報の場合、部分観測マルコフ決定過程による時間とともに変化された避難経路を導くことも今後の課題である。

## 5 謝辞

本研究は、京都大学数理解析研究所「共同利用・共同研究拠点事業」の支援を受けた。

## 参考文献

- [1] A. A. Kana and D. J. Singer, A ship egress analysis method using spectral Markov decision processes, Proceedings of the 13th international symposium on practical design of ships and other floating structures (PRADS' 2016), Copenhagen, 48 September 2016.

- [2] M. L. Puterman, Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming. Wiley, Hoboken, NJ, 2005
- [3] S. Russell and P. Norvig, Artificial Intelligence: A Modern Approach, 3rd ed, Upper Saddle River, NJ:Prentice Hall, 2010
- [4] Q. Wang, M. Kageyama, J. Y. Zhang, New evaluation criteria in the Markov decision processes, Journal of Statistics and Management Systems, Vol.24(3), 625-632, 2021
- [5] 位寄和久, 避難行動モデルに関する研究—火災状況の認識と心理状態を考慮したモデルの提案, 日本建築学会論文報告集 Vol.325, 125-132, 1983
- [6] 王 琦, 影山 正幸, 張 景耀, マルコフ決定過程による船の避難パターンを推定モデル, 京都大学数理解析研究所講究録 Vol.2126, 63-66, 2019
- [7] 中出康一, マルコフ決定過程, コロナ社, 2019
- [8] 福地信義, 小山清文, 篠田岳思, 緊急時の心理過程と歩行モデルによる避難行動の解析, 日本造船学会論文集 Vol.186, 545-558, 1999
- [9] 吉村英祐, 階層分析による評価指標の重みの推定に基づく建築平面の避難安全性の定量的評価について, 日本建築学会計画系論文報告集 Vol.437, 87-96, 1992