

最適避難経路の決定方法

名古屋市立大学・芸術工学部 王 琦 影山 正幸
京都大学大学院工学研究科建築学専攻 張 景耀

Qi Wang Masayuki Kageyama Jingyao Zhang

School of Design and Architecture, Nagoya City University

Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto University

概要

建物内に火災が発生する際に、速やかに安全な場所へ移動できるように、避難経路を考慮した上に特定の地域の存在を設定し各場所の安全性を把握するのは本研究の目的である。本研究はマルコフ決定過程の定式化により新たな指標で災害が発生する前に各状態の危険性を示し、最適な避難経路の決定法を探索する。

1 はじめに

世の中の災害は大きく分けて、自然災害と人為的な災害である。自然災害における、避難経路、救援ルートなどは不確実性であるため、確率モデルで記述されることが多々ある。従来の研究は災害が発生した後に最適避難経路を検証する研究が中心であったが、本研究は円滑に避難できるように、建築設計と最適避難経路の関係を調べ、設計の初期段階に最適避難経路を考慮し、最適な設計（施設配置など）を決定することを目指す。近年マルチエージェント避難シミュレーションモデルの建築設計での実務的利用や建築消防などの利用による活用が広がってきた。それらの問題について、目的関数を最小化（または最大化）することを目的として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最適化問題では、しばしばマルコフ決定過程が用いられる。

既往の避難経路に関する研究では、マルコフ決定過程で定式化した後、次元の呪いによる計算量の肥大化を避けるために DP(Dynamic Programming) による数値計算で解を求めるのが主流である。Russell & Norvig [3] の研究では 4×3 の状態空間を想定し、エージェントが出口までに到達する際に得られる報酬を最大にするルートの探索について議論されている。この探索はマルコフ決定過程により行われ、災害発生時の状態空間からの最適な脱出経路が提案されている。それを拡張し、Kana & Singer[1] は海難が発生した際の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。災害が発生する前に、船舶やビルなどの構造物の特性から最適な避難経路の推定を行っている。

しかし、建築設計と応用数学分野を結び付けた避難経路の研究は稀有である。実用的な最適な避難経路を考える際は、建築物の特性にまで踏み込んで数理モデルを構築することは意義があると思われる。位寄和久 [4] 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た。峯岸良和ら [6] は火災避難安全設計がより詳しく求められる劇場やスタジアムなど観客席の空間に対して、マルチエージェント避難シミュレーションモデルの適用を試みた。

本研究では事前にマルコフ決定過程 (Markov Decision Processes) による災害時に人間は不確実性の下で避難経路を探索するモデルの研究を行う。建築計画の初期段階において MDP による最適な避難経路を実現できるような施設配置を可能になる手法を目指す。2 章では人々の不確実な意思決定を考慮した避難モデルを紹介し、新たな指標で各状態の安全順位をつける。3 章では各パターンのアルゴリズムに基づいた計算を行い、事前に最適な避難経路を提示し、またはそれと施設配置の関連性について検討を行う。

2 モデル化

よく知られるように MDP は以下の四項組で構成される。

- 状態集合 : $s \in S$
- 行動集合 : $A = \{a_u, a_d, a_r, a_l\}$
- 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。

有名な最適な方程式 *Bellman* 方程式は式 (1) で与えられる。ただし、 $R(s)$ は報酬、 γ は割引係数である。

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

本研究は災害が発生する際により円滑に建物から脱出するため、MDP の定式化によって、 $R(s)$ は報酬ではなく人間の危険認識を定義し、安全性を表示する費用関数 $U(s)$ のもとで閾値政策の最適性を理論的に示すとともに、各パターンでの数値計算結果で分析を行う。

また、費用関数を最大化にする最適政策 π^* は式 (2) で表示する。

$$\pi(s)^* = \arg \max_a \sum_{s'} P(s'|s,a)U(s'). \tag{2}$$

下記の事例は建物の中に人間行動を考慮された費用関数の計算を示す。建物のレイアウトが表 (1) に示されており、各セルは異なる部屋を表す。セルには各部屋のラベル付け規則を示す (例えば、左下の部屋は (1,1) と表示される)。黒の状態はアクセス不可能な領域 (障害領域と認識してもよい) である。緊急事態をシミュレートするには、部屋 (4,2) で火災が発生したと想定し、(4,3) にある出口を見つけるために移動する必要がある。行動の集合は $A = \{a_u, a_d, a_r, a_l\}$ と定義する。緊急時の混乱をシミュレートする動きには不確実性があり、人はパニックに陥り、煙が視界を妨げている可能性があるため、逃げたい方向へ行く確率とその左右の方向への推移確率はそれぞれは $P(s'|s,a) = p_1, p_2, p_3$ と設定する。例えば、上方へ移動を意識決定した時に、実際に上、左、右方面への推移確率は図 1 通りになる。移動先には壁がある場合、その場所に留まる。また、火災が行った (4,2) の $R(s)$ は -1、出口 (4,3) の $R(s)$ は +1、それ以外な部屋の $R(s)$ は -0.04 である場合、表 (2) で各状態の安全性を表し、 $U(s)$ を式 (1) で求める。その結果 $U(s)$ は表 (3)、最適な避難経路は表 (4) で与える。

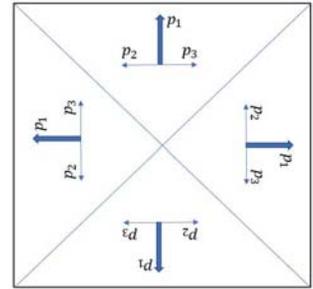


図 1: 推移確率 $P(s'|s,a)$

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

表 1: 障害は (2,2), 出口は (4,3), 出火点は (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: 各状態の $R(s)$

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

表 3: 各状態にいるときの安心感

→	→	→	Exit
↑		↑	Fire
↑	←	←	←

表 4: 最適避難経路

以下の式は一般的な状態 (周囲には壁、火災がなく、出口もない状態) にいるときの推移確率を表す。

$$P: \begin{cases} P((i, j+1)|(i, j), a_u) = p_1 & P((i, j-1)|(i, j), a_d) = p_1 \\ P((i-1, j)|(i, j), a_u) = p_2 & P((i-1, j)|(i, j), a_d) = p_2 \\ P((i+1, j)|(i, j), a_u) = p_3 & P((i+1, j)|(i, j), a_d) = p_3 \\ P((i-1, j)|(i, j), a_l) = p_1 & P((i+1, j)|(i, j), a_r) = p_1 \\ P((i, j+1)|(i, j), a_l) = p_2 & P((i, j+1)|(i, j), a_r) = p_2 \\ P((i, j-1)|(i, j), a_l) = p_3 & P((i, j-1)|(i, j), a_r) = p_3 \end{cases} \quad (3)$$

ただし、 $P = \sum_{i=1}^3 p_i = 1$ 。

最適避難経路を検証するため、各パターンのアルゴリズムに基づいて分析必要がある。例えば、出口を固定し、障害領域と出火点をランダムにする場合、各状態の平均値や標本偏差などの基本統計量で安心感を表示する。ただし、平均値は高く、標準偏差も大きな場合、その状態の安全性を判断しにくい。そのため、新たな指標で詳細を調べ、下記関数 $\rho_i(s, s')$ を定義する。

$$\rho_i(s, s') = \begin{cases} 1 & U_i(s) > U_i(s') \text{ のとき} \\ 0.5 & U_i(s) = U_i(s') \text{ のとき} \\ 0 & U_i(s) < U_i(s') \text{ のとき} \end{cases} \quad (4)$$

$U_i(s)$ は人間が状態 s にいるときの安心感、 $U_i(s')$ は次の状態 s' にいるときの安心感を表す。 $i(1 \leq i \leq n-2)$ は出火点が状態 $s(i)$ で発生する場合であり、 n は状態の総数である。 $\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{n-2} \rho_i(s, s') > 0.5$ のとき、状態 s は状態 s' より安全と定義する。

3 安全性の分析

3.1 出口を (4,3) と固定される場合

上記モデル (表 (4)) の最適避難経路は建物のレイアウト設計との関係について、下記数値計算で調べる。

まず、出口は (4,3) を固定、出火点はランダムに発生する場合、ブロックありなし、それぞれの状況でデータ分析を行う。主観的にブロックがない場合、スムーズに出口まで到着できるため、人の安心感が高まると考えられたが、表 (5) と表 (6) 比較したら、そうではないことが分かった。

0.7067	0.8129	0.9214	Exit
0.6937	0.7848	0.8705	0.9215
0.6522	0.7252	0.7776	0.8019

表 5: 障害はなし, 出口は (4,3) の場合, 各状態の平均値

0.7222	0.8307	0.9181	Exit
0.7269		0.8611	0.9196
0.6655	0.7292	0.7513	0.6721

表 6: 障害は (2,2), 出口は (4,3) の場合, 各状態の平均値

次、ブロックは移動して、出火点はランダムに発生する場合、安心感の平均値を求める。平均値の最大値と最小値ともブロックが出口の近くに設定されるときにある。ブロックは出口の左下方（表(7)）に設定される場合、上下左右四方面への移動に対して、出口まで壁とブロックがないため、安心感は高くなるのが解釈できる。ただし、出口の左側（表(8)）と下方に設定される場合、安心感の平均値は異なるので、その原因は興味深い。

0.7226	0.8349	0.95	Exit
0.7149	0.7888		0.95
0.6719	0.7554	0.8179	0.8262

表 7: 障害は (3,2) の場合、各状態の平均値が一番大きい

0.2892	0.3298		Exit
0.3634	0.4797	0.6446	0.8353
0.3504	0.4552	0.5669	0.6205

表 8: 障害は (3,3) の場合、各状態の平均値が一番小さい

また、各状態安心感の平均値と標準偏差を調べる。例えば、状態(4,1)に対して、平均値は低くないが、標準偏差は比較的に大きい。状態(3,1)と比べ、どの状態の安心感が高いかを判断しにくい。この場合、新しい判断指標が必要であり、次の節で紹介する。

0.5804	0.7387	0.9111	Exit
0.6088	0.7075	0.8190	0.9113
0.5245	0.6485	0.7060	0.6764

表 9: 各状態の平均値

0.1610	0.1556	0.0356	Exit
0.1197	0.1039	0.0922	0.0292
0.1158	0.1057	0.1098	0.1774

表 10: 各状態の標準偏差

3.2 安全性を判断する新たな指標

障害は(2,2), 出口は(4,3)の場合、 $\frac{1}{n-2} \sum_1^{n-2} \rho_i(s, s')$ を利用し、各状態を調べた結果は図(2)で与える。

	(1, 1)	(1, 2)	(1, 3)	(2, 1)	(2, 3)	(3, 1)	(3, 2)	(3, 3)	(4, 1)	(4, 2)
(1, 1)		0.4	0.3	0.5	0.2	0.4	0.2	0.1	0.3	0.1
(1, 2)	0.6		0.3	0.5	0.2	0.4	0.2	0.1	0.3	0.1
(1, 3)	0.7	0.7		0.6	0.2	0.4	0.2	0.1	0.3	0.1
(2, 1)	0.5	0.5	0.4		0.2	0.4	0.1	0.1	0.2	0.1
(2, 3)	0.8	0.8	0.8	0.8		0.8	0.2	0.1	0.8	0.1
(3, 1)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.2		0.2	0.1	0.2	0.1
(3, 2)	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8		0.1	0.8	0.1
(3, 3)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9		0.9	0.5
(4, 1)	0.7	0.7	0.7	0.8	0.2	0.8	0.2	0.1		0.1
(4, 2)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.5	0.9	

図 2: 各状態の $\frac{1}{n-2} \sum_1^{n-2} \rho_i(s, s')$

図(2)の結果に基づいて、安全順位をつけ、表(11)で表示する。その安全順位による推定された最適な避難経路を表(12)で示す。

7	4	1	EXIT
8		3	1
9	9	6	5

表 11: 新たな指標で各状態の安全順位をつける

→	→	→	Exit
↑		↑	↑
↑	→	↑	↑

表 12: 新たな指標による最適な避難経路を決定する

4 今後の課題

本研究では推移確率が意思決定方面と左右三つを設定したが、本来事前に船舶や建物などのレイアウトを把握する上に分析を行うため、行動は上下左右方面とその場で留まる選択がある。今後、推移確率を上記の五つ設定し、最適避難経路の決定方法を探索する。また、災害が発生時に状況の認識と心理状態を考慮するモデルについて研究を続けていく。

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] 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
- [5] 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
- [6] 峯岸良和, 竹市尚広, スタジアム・劇場等における避難性状のマルチエージェントシミュレーションによる予測, 日本建築学会計画系論文集, Vol.80, 1233-1241, 2015