

マルコフ決定過程による船の避難パターンを推定するモデル

名古屋市立大学・芸術工学部 王 琦 影山 正幸 張 景耀

Qi Wang Masayuki Kageyama Jingyao Zhang

School of Design and Architecture, Nagoya City University

1 はじめに

災害には自然災害と人為的災害であり、例えば地震、津波、台風、火災、海難事故など。これまで災害の後の最適な避難ルートを見つける研究が数多くなされてきた。特に日本では地震が多い国の為、地震や津波などの避難問題について、よく研究されている。一方、船舶による定期旅客輸送は、現在全世界で年間1億人を超えており公共輸送の一端を担っているため、海難事故は発生する場合、船上の避難にも注目されている。例えば、海難事件では、2014年、韓国で乗客と乗組員476人を乗せたフェリー「セウォル」が沈没し、乗船者の6割以上が死亡した事件や、2015年中国江蘇省の長江で客船「東方之星号」が転覆し沈没、400人以上が死亡した事例などがある。事故原因などの調査により、上記事故は発生してから沈没したまで、避難行動と救援方法によって死亡人数は変わる可能性がある。

避難行動には2通りのパターンがある。一つは、時間的余裕がなく、船員の誘導がなく、避難経路を乗客自らが選択しなければならないケースがある。もう一つは、避難に時間的余裕があり、誘導員に従って避難するケースである。無論どちらも、速やかに安全な場所に着くことが望まれる。そのために、本研究は船舶を設計する際に避難経路を考慮し、2通りのパターンとも適用できるレイアウトの検討を行った。

Russell & Norvig [2] では船上避難経路に関して、逐次決定問題で、不確実な環境での行動のリスクと報酬のバランスをとる最適な行動を生成するモデルを紹介している。また、複数のエージェントがある環境について説明し、このような環境では、最適な行動はエージェント間の相互作用によって複雑になるということを説明している。

それを拡張して、Kana & Singer [3] は船中心型マルコフ決定過程のフレームワークに固有値解析を適用して船舶出口解析を行う手段を紹介している。この方法は、人がどのように出口まで行くか、不確実性の下での意思決定、および個人と船のレイアウトとの相互作用に焦点を当てている。目的は、一般的な配置設計における人々の不確実な意思決定の影響を理解することである。

更に、Kana & Droste [4] では避難時に船上の人員の位置を推定する初期段階の設計モデルが提示されている。このモデルは、船舶のレイアウトに関する詳細な情報を必要とせず、安全に向かう間に個人が感じる不確実性および痛みの様々なレベルを考慮に入れている。

本研究では緊急な海難事故が発生する場合をマルコフ決定過程（Markov Decision Processes）で定式化し、避難経路を探索し、個人が感じる危険性により最適な避難経路を導き出す。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、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、避難経路は船舶のレイアウトとの関連性について検討を行った。

2 モデル化

よく知られたマルコフ決定過程の費用関数は下記 *Bellman* 方程式 (1) で与えられる。 $U(s)$ は状態 s の費用関数、 $P(s'|s,a)$ は状態 s から s' へ遷移の確率、 a は状態 s からの行動、 $R(s)$ は遷移に応じた報酬、 γ は割引係数である。

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

費用関数を最大化にする最適政策 π^* は式 (2) で求めることができる。

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

本研究はこのマルコフ決定過程の定式化により、費用関数のある条件のもとでの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を分析している。この時、 $R(s)$ は個人の危険認識を表す。

水平方向の船舶レイアウトはイメージの表 (1) で示されており、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) と表示する）。黒の状態はアクセス不能な領域（障害領域と認識してもよい）である。これらの部屋はサーバールーム、エンジンルームなどとして既に分類されている。この情報は今回には使用されず、部屋のアクセシビリティに関する情報のみが使用される。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。緊急時の混乱をシミュレートする動きには不確実性 ($P(s'|s,a)$) がある。例えば、人はパニックに陥り、煙が視界を妨げている可能性があり、逃げたい方向へ行く確率は $p = 0.8$, その左右の方向へ行く確率は両方とも 0.1 と設定する。動こうと思った場所に壁があった場合は、その場に留まる。火災が行った (4,2) の $R(s)$ は -1 、出口 (4,3) の $R(s)$ は $+1$ 、それ以外部屋の $R(s)$ は -0.04 である場合、式 (1) を利用し、表 (2) のように最適な避難経路を求めることができる。

(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) の場合

→	→	→	Exit
↑		↑	Fire
↑	←	←	←

表 2: 障害は (2,2), 出火点は (4,2) の場合の最適避難経路

3 危険な場所の分析

障害領域と出口の場所によって、最適避難経路はどのように変わるかについて調べた。まず、出口は一ヶ所に固定し、障害領域と出火点をランダムに設定する場合、各セルにいるとき個人安心感を表す費用関数 $U(s)$ を計算した。それから、障害領域を固定し、出口と出火点を変わる場合にも計算を行った。最後、より現実に近いモデルを考慮し、出火点との距離により個人の危険認識値 $R(s)$ は変わる場合にも調べた（本研究の計算はすべて *Python3.7.0* を利用している）。

3.1 出口は (4,3) を固定される

出口を固定し、出火点と障害領域をランダムに設定する場合、 $\gamma, R(s)$ にそれぞれ $1, -0.04$ を与える。安心感を表示する費用関数の値が大きく大きいほど良いため、避難経路は費用関数の値が大きな場所へ遷移する。(4,3) が出口になる場合、表 (3) の設計は各部屋にいるときの安心感の平均値が一番高い。すべてのパターンを計算した結果、表 (4) のように (1,1) には安心感が一番小さくなるケースが多い。

0.7226	0.8349	0.9500	Exit
0.7149	0.7888		0.9500
0.6719	0.7554	0.8179	0.8262

表 3: 障害は (3,2), 出口は (4,3) の場合、出火点に関わらず各状態にいるときの安心感の平均値が一番大きい

●1	★2	●1		Exit
●2		●1		
●2	★2	●2	●1	★1

表 4: 同じ部屋は安心感が 0.5 以下になる回数. ●は最小値が 0.5 以下,★は最小値以外更に 0.5 以下

3.2 Block は (2,2) を固定される

各パターンで出口と障害領域を設置されるとき、個人の危険認識で避難経路はどのようになるかを調べてみた。状態 (2,2) をブロックされ、出口と出火点はランダムになる場合、表 (5) には (4,1) が出口であるとき、各状態にいるときの安心感が低い。一方表 (6) には (3,1) が出口であるとき、どこか出火しても、関わらず各状態にいるときの安心感が高いことが分かった。

0.6655	0.7174	0.7513	0.7832
0.7269		0.8611	0.9196
0.7222	0.8307	0.9181	Exit

表 5: 障害は (2,2), 出口は (4,1) の場合

0.7426	0.7896	0.7919	0.7531
0.8181		0.9195	0.8604
0.8263	0.95	Exit	0.9181

表 6: 障害は (2,2), 出口は (3,1) の場合

3.3 利得 $R(s)$ の変動

より現実世界に近いアルゴリズムを設定し、利得 $R(s)$ は変動がある場合を考えた。出火点の近くにいと不安が高まるため、(3,2) と (4,1) の $R(s)$ は -0.4 を与えて計算した (表 (7))。比較のため、表 (8) はすべての $R(s)$ が -0.04 のときに計算された結果を与える。表 (7) の各状態の安心感は表 (8) より弱くなってきた。特に出火点の下部屋 (4,1) はマイナスの値になっていたのも、それはある程度の不安になると、出火点にも関わらず、入り込んで出口まで行く可能性がある。

0.7622	0.8185	0.8685	+1
0.7122		0.2164	-1
0.6559	0.6059	0.5183	- 0.0949

表 7: 出火点と近い (4,1)、(3,2) では $R(s)=-0.4$ 、それ以外の状態では $R(s)=-0.04$

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

表 8: すべての状態では $R(s)=-0.04$

4 今後の課題

本研究では小さな空間として分析しており、現実な船舶では水平方向レイアウトがより大きな空間であり、更に船上のデッキまで鉛直方向にも分析する必要がある。また、交差点のところに避難される人々の合流について、本研究に定義された安心感だけではなく、人が増えるとともに危険性や避難スピードも変わってくるので、考慮する必要がある。これは今後の課題とする。

参考文献

[1] 村井 基彦, 西崎 大祐, 大木 義昭, 仲田 翔 (2008), マルチエージェントアルゴリズムによる船舶からの避難シミュレーションに関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 7E, 115-118.

[2] S. Russell and P. Norvig (2010), Artificial Intelligence: A Modern Approach, 3rd ed, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

[3] A. A. Kana and D. J. Singer (2016), Ashipegress 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.

[4] A. A. Kana and K. Droste (2017), An early-stage design model for estimating ship evacuation patterns using the ship-centric Markov decision process, in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment .