

建物内火災時における避難経路最適化問題へのイジングマシンの適用

伊藤 拓朗[†] 日野 幹太[†] 天野 和洋[‡] 今関 修[‡] 田中 宗[†]慶應義塾大学大学院 理工学研究科 基礎理工学専攻[†]鹿島建設株式会社[‡]

1. はじめに

現在、組合せ最適化問題のメタヒューリスティクスをハードウェア化したマシンであるイジングマシンが盛んに開発されている。組合せ最適化問題とは、制約条件を満足した上で目的関数が最小または最大となるような変数の組合せを探索する問題である。イジングマシンを用いて組合せ最適化問題を求解する際、イジングモデルまたはイジングモデルと等価な Quadratic Unconstrained Binary Optimization (QUBO) により定式化を行う必要がある[1]。組合せ最適化問題は、交通や金融など社会の様々な場面に内在しており、応用領域での研究も盛んである。

本研究では、広域な領域で多くの組合せ数とその最適化が必要となる建設業の課題に注目した。中でも火災時の避難経路最適化問題を組合せ最適化問題として捉え、イジングマシンでの実装を検討した。まずは、避難経路での人の混雑度の最小化と避難時間を最小化する多目的最適化の実装と1フロアの事務所を想定したモデルを用いたシミュレーションの妥当性を検討した。

2. 避難経路最適化問題の定式化

交通流最適化の先行研究[2]を参考に定式化を行った。上で述べた二つの目的関数に加え、制約条件の一つを設定した。一つ目の目的関数は、式(1)に示すように混雑度の総和で表し、これを最小化する。

$$\sum_{s \in S} \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_R} \sum_{q_{ij} \in S_j} q_{ij} \right)^2 \quad (1)$$

ただし、 N は避難人数、 N_R は各避難者に与える候補経路数である。決定変数は $q_{ij} \in \{1,0\}$ であり、避難者 i が経路 j を通る場合は1、それ以外の場合は0である。 s は建物内の代表的な地点を頂点として定義したグラフの各辺を表している。 S は辺の集合で、 S_j は経路 j に含まれる辺の集合である。

二つ目の目的関数は、式(2)に示すように避難時間の合計で表し、これを最小化する。

$$\sum_{s \in S} d_s \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_R} \sum_{q_{ij} \in S_j} q_{ij} \right) \quad (2)$$

ただし、 d_s は辺 s を通る場合の所要時間である。制約条件は、与える候補経路から一つの経路のみを選択することであり、式(3)で表す。

$$\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^{N_R} q_{ij} - 1 \right)^2 \quad (3)$$

最終的な定式化は、式(1)、式(2)及び式(3)の和である。ここで、本研究における候補経路の与え方は下記のとおりである。①ダイクストラ法で始点から終点までの最短経路の上位15個を事前に計算し、経路集合を生成する。②候補経路を選択する際、生成した経路集合の中から無作為に選ぶ場合と、経路の類似度を測るジャコカード係数の上限値 J_{\max} を設定し、それを超える類似度の高い経路は除外することで候補経路を選別する場合の二つの手法を用いた。

3. シミュレーションの検証モデル

解析検証に用いたモデルを図1に示す。これは1フロアの事務所を想定したものであり、事務室と廊下が6個のドアで繋がっており、廊下から2つの出口を通じて屋外へ避難する。

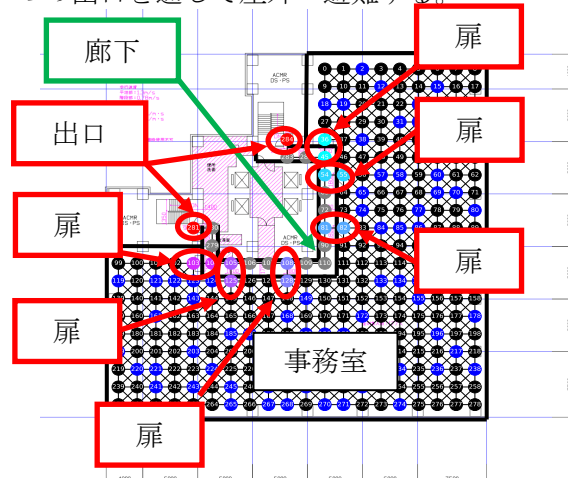


図1 建築図面上に定義したグリッドグラフ

Application of Ising machines to evacuation route optimization under fire

Takuro Itoh[†] Kanta Hino[†] Kazuhiro Amano[‡] Osamu Imazeki[‡]Shu Tanaka[†][†] Keio University[‡] Kajima Corporation

それぞれの空間には、図面上に節点と枝からなるグリッドグラフを配置しており、避難者は節点同士を繋ぐ枝上を通行する。赤点は出口、青点は避難者のスタート地点、黒点は事務室の地点、灰色は廊下の地点である。他の色の二組となっている頂点同士はその二組の頂点を通じて事務室から廊下へ移動できる扉を表す。定式化したハミルトニアンを Fixstars Amplify (以下、FA) [3] で求解した。

4. シミュレーション結果

本研究では、避難人数 N を 143 人とし、各避難者に与える候補経路数 N_R を 2, 3, 4, 5 個とした。ジャカード係数によって与える候補経路を選別した場合 ($J_{\max} = 0.75, 0.8, 0.85, 0.9$) とそうでない場合 ($J_{\max} = 1$) のそれぞれで問題を求解した。比較手法として、避難者の避難経路を無作為に選択する場合 (random) と、ダイクストラ法を用いて避難時間の短い経路から順番に避難者に割り当てる手法 (Dijkstra) とで比較を行った。その結果を図 2 から図 4 に示す。図 2 は式 (1)、式 (2) で表現される目的関数の値の合計、図 3 は式 (1) の値、図 4 は式 (2) の値である。式 (1) と式 (2) の線型結合の際、両者のオーダーを揃えるため、式 (1) の係数を 0.05、式 (2) の係数を 0.95 としている。横軸が各避難者に与える候補経路数を表し、縦軸が目的関数の値を表す。目的関数の値は、避難者の経路を無作為に選んだ場合の目的関数の値で規格化した。

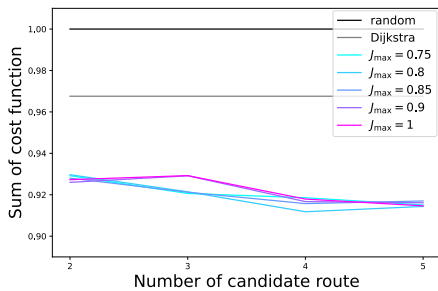


図 2 式 (1) と式 (2) の合計値の候補経路数依存性

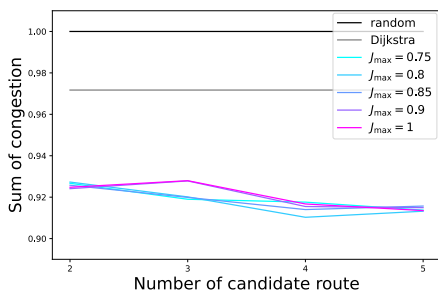


図 3 式 (1) の値の候補経路数依存性

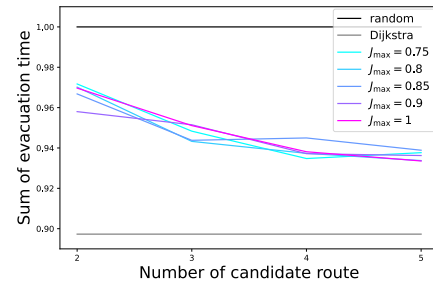


図 4 式 (2) の値の候補経路数依存性

図 2 から図 4 に示すように、いずれの場合においても避難者の経路を無作為に選んだ場合より FA で求解した場合の方が目的関数の値が優れていた。FA で求解した場合とダイクストラ法を比較すると、図 2 と図 3 より混雑の緩和という観点から FA で求解した場合がダイクストラ法より優れていることが確認できた。次に FA で求解した場合について考察する。与える候補経路数 N_R が増加すると目的関数の値が低下する傾向にある。また候補経路の与え方に着目すると、候補経路を無作為に選んだ場合 ($J_{\max} = 1$) とジャカード係数の上限値 J_{\max} を用いて候補経路の選別を行った場合で大きな差は確認できなかった。

5. 結論

本研究では、火災時の避難経路最適化問題をイジングマシンの一種である Fixstars Amplify [3] で実装した。その結果、避難者の経路を無作為に選択する場合やダイクストラ法で経路を割り当てる場合と比較して、更に混雑を緩和できる解が得られた。

今後は、扉幅の影響も考慮して流動係数の概念を取り込むとともに、イジングマシンと避難シミュレータ [4] との融合により、更に複雑な条件下でのシミュレータを開発する予定である。

参考文献

- [1] K. Tanahashi, et al., “Application of Ising Machines and a Software Development for Ising Machines,” *Journal of the Physical Society of Japan* **88**, 061010 (2019).
- [2] F. Neukart, et al. “Traffic flow optimization using a quantum annealer,” *Frontiers in ICT* **4**, 29 (2017).
- [3] Fixstars Amplify, <https://github.com/fixstars>
- [4] 天野ほか：熱煙流動を考慮した避難シミュレータの開発、日本火災学会研究発表会概要集、pp.182-183、2013