

アニーリングマシンのための 時間制約付き経路最適化の QUBO 定式化*

小見山 朋子[†] 鈴木 智博[‡]

山梨大学大学院 医工農学総合教育部 工学専攻

1 はじめに

量子アニーリングは、計算に関わる全ての量子ビットが常に互いに結合し、全体としてのエネルギーが最も低い状態（基底状態）を探索することにより最適解を得る [1]. このエネルギーは二次制約なし二値最適化 (QUBO) で定式化可能であり、量子ビット数 N 、量子ビットの状態 $x_i \in \{0, 1\}$ ($i = 1, \dots, N$), 2つの量子ビット $x_i - x_j$ ($i \neq j$) 間の相互作用 Q_{ij} を用いて次式で表現される.

$$H(x) = \sum_i \sum_j Q_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

経路最適化の一つに、巡回時間などの制約を満たした中で満足度が最も高くなる巡回経路を求める問題である Selective Traveling Salesman Problem (STSP) がある. 本発表で扱う、時間制約付き経路最適化問題は STSP に分類される問題であり、NP 困難な問題である. 経路探索の先行研究 [2] では、アミューズメントパーク経路最適化問題を、TSP を拡張した手法によりイジングマシンで解を得た. また、[3] では、複数の観光バスの経路を最適化することで、観光地の駐車場や周辺道路の混雑を解消する観光経路最適化問題の定式化を、時系列情報を持ったグラフである Time Expand Network (TEN) を利用して定式化している.

本発表では、美術館等の展示物閲覧経路探索問題を時間制約付き経路最適化問題として扱い、個人経路最適化と全体経路最適化のそれぞれにおいて定義し、定式化について考察する.

2 個人経路最適化

美術館等の個人の閲覧経路最適化問題を、設定時間内に巡回でき、閲覧者の満足度が最も高くなる経路を求める問題と定義する. この問題に対して、有向グラフにおける地点 i から地点 j への経路の利用を表す変数 $x_{ij} \in \{0, 1\}$ を用いて QUBO 定式化を行う. ただし、 s_i, t_i をそれぞれ展示物 i の満足度、閲覧時間、 t_{ij} を地点 i から地点 j への移動時間、 T を設定時間とする.

*QUBO formulation of time-constrained routing optimization for annealing machines

[†]Tomoko Komiyama, University of Yamanashi

[‡]Tomohiro Suzuki, University of Yamanashi

(1) 満足度を最大化する

$$H_{cost} = \sum_i s_i \sum_j x_{ij} \quad (2)$$

(2) 制約: 各地点において流入辺数=流出辺数である

$$H_{const1} = \sum_i \left(\sum_j x_{ij} - \sum_j x_{ji} \right)^2 \quad (3)$$

(3) 制約: 始点を通る (始点からの流出辺が1辺ある)

$$H_{const2} = \left(\sum_j x_{sj} - 1 \right)^2 \quad (4)$$

(4) 制約: 同じ展示に2回以上訪れない

$$H_{const3} = \sum_i \left\{ \sum_j x_{ji} \left(\sum_j x_{ji} - 1 \right) \right\} \quad (5)$$

(5) 制約: 時間内に始点に戻る

ここで、 α に β よりも十分に大きな値を設定することで、設定時間内かつ設定時間に近い経路を得る.

$$H_{const4} = \alpha \left(\sum_i \sum_j t_{ij} x_{ij} + \sum_i t_i \sum_j x_{ij} - T \right)^2 + \beta \left(\sum_i \sum_j t_{ij} x_{ij} + \sum_i t_i \sum_j x_{ij} - (T - 1) \right)^2 \quad (6)$$

2.1 サブツアー排除

前述の定式化では、制約を満たしていても、始点を通る環状閉路の他に複数の環状閉路 (サブツアー) が生じることがある. 次の3つのサブツアー排除手法から、最もアニーリングマシンに適した手法に関して議論する.

- MTZ メソッドによるサブツアー排除

地点に訪問した時間を表す連続決定変数 $t_i \in \{1, \dots, N\}$ を用いて次の制約を追加する.

$$t_i - t_j + N x_{ij} \leq N - 1 \quad (7)$$

- 複数回最適化によるサブツアー排除
得られた解からサブツアーを検出し, 特定のツアーの発生を回避する不等式制約を追加, 再度最適化の流れをサブツアーが検出されなくなるまで繰り返す手法. ここで不等式制約は, サブツアー S に含まれる N 地点の間には存在する線は $(N-1)$ 個以下でなければならないという制約である.

$$\sum_{v_i \in S} \sum_{v_j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad (8)$$

- 後処理によるサブツアー排除
後処理において, サブツアーを含めて訪問する地点全てを最短時間で巡回する経路を求める TSP として最適化を行う.

2.2 評価実験

美術館として山梨大学構内にある大村智記念学術館のデータを用いて, 美術館の経路探索問題を解く. 実験に用いるソルバーは, GPU ベースのアニーリングを行う Fixstars Amplify Annealing Engine (Amplify AE), Pyqubo Simulated Annealing (SA), 分枝限定法により最適化を行う Gurobi Optimizer (Gurobi) である.

MTZ によるサブツアー排除:

全てのソルバーで制約を満たす解が得られなかった. これは, 制約関数や変数の大幅な追加が発生したことにより, 制約を満たす解が得られにくくなるのが原因であると考えられる.

複数回最適化によるサブツアーの排除:

全てのソルバーにおいてサブツアーを排除することができたが, SA は時間制約を超過する解のみ得た. また, SA 以外のソルバーにおいて, Amplify AE の方が高速に満足度の高い解を得た.

後処理によるサブツアーの排除:

全てのソルバーにおいて, $T \leq 100$ では設定時間を超過してしまう制約違反の解しか得られなかった. この結果から, 設定時間のある程度の超過は許せる場合には, この手法も有効であると考えられる.

以上の結果から, イジングマシンを用いた経路探索におけるサブツアー排除には, 複数回最適化が最も有効な手法であると考えられる.

3 全体経路最適化

巡回者それぞれが設定する時間内に巡回可能で, 巡回者全員の満足度の総和が最も高くなる (混雑を緩和する) 経路を求める問題を定義する. 本問題の定式化では, 時系列情報を持ったグラフである Time Expand Network (TEN) を用いる. TEN は, 時間軸と地点対

して頂点を設定し, 発生しうる移動を有向辺で接続したグラフ (図 1) である. 同じ地点間でも移動経路や手段によって異なる移動時間や, 同じ地点でも異なる滞在時間なども有向辺により表現可能である.

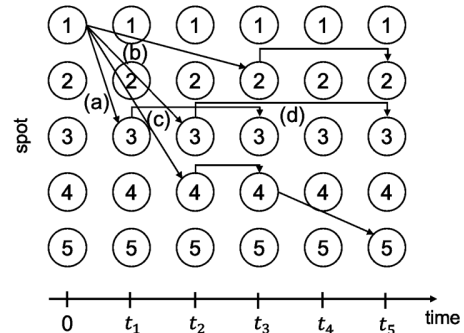


図 1: Time Expand Network の例

TEN を用いた定式化では, 2.(1), (2) と, 出発地に戻る制約, 複数人が同じ地点に滞在しない (混雑緩和) 制約の 4 つ関数により QUBO を定義した.

3.1 評価実験

2.2 の実験データ (移動時間を整数値に変更) と 3 種類のソルバーを用いて動作確認を行なった. その結果, 総巡回時間を 10 分に設定した場合に, Amplify AE のみで満足度の高い経路が得られた. しかし, 総巡回時間を 20 分以上に設定すると全てのソルバーで制約を満たす解が得られなかった.

4 まとめ

本発表では, 美術館等の展示物閲覧経路探索問題を例に, 個人経路探索におけるサブツアー排除手法と TEN を用いた全体経路最適化の評価を行なった. どちらの問題においても, 定式化した QUBO によりアニーリングマシンや数理最適化ソルバにより満足度の高い経路を得られた. また, 個人経路最適化におけるサブツアー排除では, 複数回最適化によるサブツアー排除が最も有効であった.

参考文献

- [1] 西森秀稔, 他, "量子アニーリングの基礎", 共立出版, (2018).
- [2] 武笠陽介, 他, "アミューズメントパーク経路最適化問題を対象としたイジングマシンによる解法と補正処理の評価", 信学技法 119(443), pp. 167 - 172, (2020).
- [3] 蓮池隆, 他, "到着地の混雑緩和を考慮した観光経路割当問題", 自動制御連合講演会講演論文集, 57, pp. 1360 - 1364, (2014).