アニーリングマシンを用いたテーマパークの経路最適化

高橋ひなの　(指導教員：工藤和恵)

1　はじめに

QUBO（Quadratic Unconstrained Binary Optimization）は、「二次の制約なし二値最適化」を意味し、0 または 1 の 2 値変数を用いて最適化問題を表現する数学的手法である。最大の利点は、目的関数と制約条件を 1 つのエネルギー関数に統一して表現できる点で、従来の線形計画法や動的計画法と比較して、複雑な組合せ最適化問題を効率的に解ける。従来の手法では、制約条件を別々に管理する必要があり、特に高次元の組合せ問題では計算負荷が急激に増大する。一方で、アニーリングマシンは QUBO 形式のエネルギー関数を直接最小化するプロセスを実行できるため、大規模な問題にも対応できる拡張性を持つ。本研究では、この特性を活かし、テーマパーク内のアトラクションの満足度や時間制約を考慮した経路最適化問題を QUBO 形式で定式化し、効率的に解く方法を提案する。

2　辺を変数とする手法

美術館の経路最適化 [1] では、展示間の経路を変数に設定する。展示 i から展示 j への辺 (経路) を通ることを表す変数 $x_{ij} \in \{0,1\}$ を用いて定式化する。x_{ij} が 0 のときは通らない、1 の時は通ることを意味する。以下で説明するコスト関数と制約条件を合わせた目的関数を次式で与える。

$$H = H_{\text{cost}} + p\big(\alpha_1 H_1 + \alpha_2 H_2 + \alpha_3 H_3 + \alpha_4 H_4 + \alpha_5 H_5 + \alpha_6 H_6\big) \tag{1}$$

ここで、各関数の重みを調整するための正規化パラメータを α_i、制約とコストの重みを調整するためのパラメータを p とする。

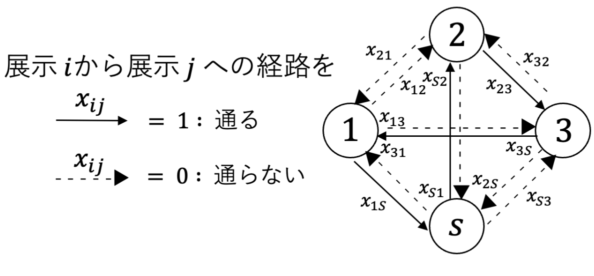

図 1: 手法 1: 経路を変数とする手法

目的関数: 満足度を最大化する

各展示 i にはそれぞれ満足度 s_i が設定されている。地点 i から j への経路を $x_{ij} = 0$ のときは通らない、$x_{ij} = 1$ のときは通ることを示す。$x_{ij} = 1$ のとき、展示 i を閲覧したことになり、満足度 s_i がエネルギーに加えられる。満足度は、最大化したいため符号は負とする。

$$H_{\text{cost}} = -\sum_i s_i \sum_j x_{ij} \tag{2}$$

制約: 各展示の流出辺数=流入辺数である

各展示の流出辺数と流入辺数が等しくなる時に値が 0 となる関数を定義する。流出辺数と流入辺数を等しくすると、到達していない展示や経路から、経路が存在してしまう場合を除くことができる。

$$H_1 = \sum_i \left(\sum_j x_{ij} - \sum_j x_{ji}\right)^2 \tag{3}$$

制約: 始点を通る

美術館の入口、もしくは、現在閲覧中の展示を始点として経路を求める。始点 s を通る、つまり、 始点からの流出辺が 1 辺のときに値が 0 となる関数を定義する。x_{sj} は、s から j への経路、すなわち始点 s からの流出辺を表す。これが 1 つだけ存在すれば $H_2 = 0$ となる。

$$H_2 = \left(\sum_j x_{sj} - 1\right)^2 \tag{4}$$

制約: 同じ展示に 2 回以上訪れない

各展示 i を 2 回以上閲覧しない、つまり，流入辺が 0 または 1 辺である必要がある。この制約を満たすときに値が 0 となる関数を定義する。(i) $\Sigma_j x_{ji} - 1 = 0$ のとき、展示 i を一度だけ閲覧することを示す。(ii) $\Sigma_j x_{ji} = 0$ のときは i を一度も閲覧していないことを示す。(i) または (ii) を満たせば $H_3 = 0$ となる。

$$H_3 = \sum_i \left(\sum_j x_{ji}\right)\left(\sum_j x_{ji} - 1\right) \tag{5}$$

制約: 任意の 2 地点間の往復はしない

展示 i と展示 j 間の往復が生じない場合に値が 0 となる関数を定義する。往復があった場合、$x_{ji} = 1$ かつ $x_{ij} = 1$ となり、$H_{A4} = 1$ となる。往復がない場合は x_{ji} か x_{ij} のいずれかが 0 となり、$H_4 = 0$ となる。

$$H_4 = \sum_i \sum_j x_{ij} x_{ji} \tag{6}$$

制約: 設定時間で出口に到着する

設定時間で巡回する経路を得るときにペナルティの値が小さくなる関数を設定する。t_{ij} は i から j へ移動する際の移動時間。t_i は展示 i を閲覧するのにかかる時間。T は自分で設定する巡回の制限時間。(i) $\Sigma_i \Sigma_j t_{ij} x_{ij}$ は、i から j へ移動する際の移動時間の合計。(ii) $\Sigma_i t_i \Sigma_j x_{ij}$ は、i の閲覧時間の合計。(i)+(ii)$-T = 0$、すなわち合計の所要時間と設定時間 T が等しいとき最小化される。

$$H_5 = \left(\sum_i \sum_j t_{ij} x_{ij} + \sum_i t_i \sum_j x_{ij} - T\right)^2 \tag{7}$$

制約: 絶対に見たい展示を閲覧する

絶対に見たい展示の集合を S とする。絶対に見たい展示 $i \in S$ を通る、つまり、展示 i からの流出辺が 1 辺のときに値が 0 となる関数を定義する。見たい展示

i を通ると、$x_{ij}=1$ となり、見たい展示が複数個存在する場合も同様に $H_6=0$ となる。

$$H_6=\sum_{i\in S}\left(\sum_j x_{ij}-1\right)^2 \tag{8}$$

3 点を変数とする手法

同じ展示を 2 回以上通れる経路最適化では、展示を変数に設定する [2]。展示 i を a 番目に通ることを表す変数 $x_{ai}\in\{0,1\}$ を用いる。そして、以下で説明するコスト関数と制約条件を合わせた目的関数を次式で与える。

$$H=H_{\text{cost}}+p\,(\alpha_1H_1+\alpha_2H_2+\alpha_3H_3) \tag{9}$$

目的関数: 満足度を最大化する

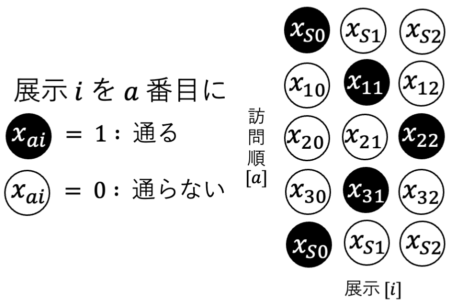

図 2: 手法 2: 点を変数とする手法

一つ目の手法と同様に各展示 i にはそれぞれ満足度 s_i が設定されている。x_{ai} は a 番目に展示 i を通るか否かを示すバイナリ変数である。また、満足度を最大化したいため符号は負とする。

$$H_{\text{cost}}=-\sum_i s_i\sum_a x_{ai} \tag{10}$$

制約: 絶対に見たい展示を閲覧する

一つ目の手法と同様に見たい展示 i を通ると、$x_{ai}=1$ となり、見たい展示が複数個存在する場合も同様に $H_1=0$ となる。

$$H_1=\sum_{i\in S}\left(\sum_a x_{ai}-1\right)^2 \tag{11}$$

制約: 設定時間で出口に到着する

一つ目の手法と同様に設定時間との差が小さくなるほど最小化される関数である。

$$H_2=\left(\sum_i\sum_j t_{ij}\sum_a x_{ai}x_{a+1,j}+\sum_i t_i\sum_a x_{ai}-T\right)^2 \tag{12}$$

制約: 行方向に one-hot 制約

a 行目に一つの成分のみ 1、他の成分は全て 0 のとき $H_3=0$ となる。

$$H_3=\sum_a\left(1-\sum_i x_{ai}\right)^2 \tag{13}$$

4 結果

実行にあたり、任意の絶対に見たい展示を複数指定することができる。また、全展示に『満足度』が設定されており、満足度の合計を計算する。『(満足度 ÷ 所要時間) × 100』の値をスコアとし、スコアの高いものをより良い解とする。

表 1: 手法 1 実行例

項目	実行例 1	実行例 2
絶対に見たい展示	展示 [1, 6, 9]	展示 [2, 3, 4, 5, 6]
目標時間	33	60
通過した展示	[s, 4, 10, 9, 6, 1, s]	[s, 2, 6, 7, 5, 10, 4, 3, 1, s]
合計時間	33.00	60.00
満足度	2.70	4.50
スコア	8.18 点	7.50 点

『絶対に見たい展示』以外の展示を通る理由は、制限時間内に多くの展示を見た方が満足度が高くなり、また設定時間に近くなるほどペナルティが小さくなるためである。

表 2: 手法 2 実行例

項目	実行例 3	実行例 4
絶対に見たい展示	展示 [2, 4]	展示 [2, 3, 4]
目標時間	45	35
通過した展示	[s, 3, 2, 3, 4, s]	[s, 3, 2, 1, 1, 4, 4, s]
合計時間	49.50	42.50
満足度	2.70	2.20
スコア	5.45 点	5.18 点

手法 1 と手法 2 の実行結果から、同じ展示を複数回通らない場合と通る場合の両者を実現できた。

5 まとめ

本研究で提案した 2 つの手法は、それぞれ異なる状況に応じて適用可能である。テーマパーク運営では、手法 1 の経路最適化アプローチが効率的な動線を確保する一方、手法 2 のように同じ展示を複数回通ることができる手法が重要である。今後は、リアルタイムデータ（例：混雑度や待ち時間）を活用した動的なパラメータ調整により、さらなる最適化が期待される。ユーザーの好みや施設の制約条件、混雑や季節変動を考慮することで、より柔軟なルート最適化が可能となる。

参考文献

[1] 小見山 朋子、小川 裕大、鈴木 智博、アニーリングマシンを利用した美術館の巡回経路最適化アプリケーション、情報処理学会研究報告、Vol.2024-QS-11 No.8、2024

[2] Fixstars, 量子アニーリングと共に進化するクラウド Fixstars Amplify 巡回セールスマン問題. https://amplify.fixstars.com/ja/demo/tsp (2024 年 1 月 20 日アクセス).