

イジングマシンによるアミューズメントパーク 経路最適化問題を対象とした解法と補正処理の評価

武笠 陽介¹ 若泉 朋弥¹ 田中 宗^{2,3} 戸川 望¹

概要： 組合せ最適化問題を効率的に解く計算技術としてイジングマシンが近年注目されている。イジングマシンはイジングモデルの基底状態を探索することに特化したハードウェアであり、組合せ最適化問題をイジングモデルに変換し、イジングマシンで解法することで、もとの組合せ最適化問題の準最適解が高速に得られることが期待されている。本稿では、アミューズメントパーク経路最適化問題に注目し、イジングマシンを用いた解法と得られた解に対する補正処理を提案する。アミューズメントパーク経路最適化問題とは、アトラクションの待ち時間や移動時間、利用者のアトラクションに対する満足度を考慮した上で、好みに応じて同一アトラクションを複数回利用することを想定し、一定時間内で利用者の総満足度を最大化する経路を求める組合せ最適化問題である。イジングマシンを用いた組合せ最適化問題の解法は確率的な近似解法であるため、後処理を加えることで解の品質が向上する可能性がある。提案手法はイジングマシンで得られた解のうち、すべての制約を満足した解と総所要時間に関する制約に違反した解に対して解の品質を改善する処理であり、イジングマシン実機による評価により提案手法の有効性を示す。

1. はじめに

アミューズメントパークの利用者にとって移動時間や待ち時間は満足度を低下させる要因となるため、これらを考慮した最適経路を求めることは利用者の満足度向上に不可欠となる。例えば、動物園における動的な待ち時間を考慮して所要時間を最小化する経路最適化 [1]、特定のアミューズメントパークのアトラクション予約システムを考慮して所要時間を最小化する経路最適化 [2], [3] に関する研究が知られている。いずれも各地点を1度ずつ訪問するという制約下で最短経路を求める巡回セールスマン問題 (TSP) を拡張した問題を扱っている。一方、アミューズメントパークでは利用者の好みに応じて同一アトラクションを複数回利用する場合が想定される。アミューズメントパークの経路最適化は、アトラクションの待ち時間や移動時間、利用者のアトラクションに対する満足度を考慮した上で、好みに応じて同一アトラクションを複数回利用することを想定し、一定時間内で利用者の総満足度を最大化する経路を求める組合せ最適化問題に帰着される。

近年、組合せ最適化問題を効率的に解く計算技術としてイジングマシンが注目を集めている [4], [5], [6], [7], [8], [9]。組合せ最適化問題とは、与えられた制約下で評価関数が

最大または最小となる変数の組合せを探索する問題である。イジングマシンはイジングモデル [10] と呼ばれる統計力学におけるモデルのエネルギー最小状態 (基底状態) を探索することに特化した計算機である。組合せ最適化問題をイジングモデルもしくはイジングモデルと等価な Quadratic Unconstrained Binary Optimization (QUBO) にマッピングすることで、イジングマシンを用いて組合せ最適化問題の解を求めることができる。組合せ最適化問題をイジングモデルにマッピングする手法や実際にイジングマシンで組合せ最適化問題を解いた結果が報告されている [11], [12], [13], [14]。イジングマシンは組合せ最適化問題を効率的に解けるという利点があるが、イジングマシンを用いた解法は確率的に近似解を求める手法であるため、必ずしも最適解や制約を満たす解が得られるわけではない。

以上の背景より、本稿ではアミューズメントパーク経路最適化問題に注目し、イジングマシンによって得られた解に対する補正処理を提案する。提案手法はイジングマシンで得られた解のうち、すべての制約を満足した解と総所要時間に関する制約に違反した解に対して解の品質を改善する処理であり、イジングマシン実機による評価により提案手法の有効性を示す。

本稿は以下のように構成される。2章でアミューズメントパーク経路最適化問題を定義する。3章でアミューズメントパーク経路最適化問題の QUBO マッピングを説明す

¹ 早稲田大学大学院基幹理工学研究科情報理工・情報通信専攻

² 慶應義塾大学理工学部物理情報工学科

³ 早稲田大学グリーン・コンピューティング・システム研究機構

る。4章でイジングマシンによって得られた解に対する補正処理を提案する。5章で補正処理を適用および評価した結果を説明する。6章で本稿をまとめる。

2. アミューズメントパーク経路最適化問題の定義

本章では、文献 [1], [2], [3] を参考に、アミューズメントパーク経路最適化問題を定義する。まず、アミューズメントパークでは利用者の好みやアトラクションの待ち時間があるため、最短経路が利用者にとって最適であるとは限らない。そこで、利用者の好みを反映する指標としてアトラクションに満足度を設定し、一定時間内で利用者の満足度が最大となる経路を求める。さらに、アミューズメントパーク経路最適化問題では同一アトラクションを複数回利用することを許容する。しかしながら、同一アトラクションの連続利用は利用者の満足度が低下する。同一のアトラクションを利用するたびにそのアトラクションに対する利用者の満足度が減少し、連続利用を防ぐしくみを設定する。

以上を踏まえてアミューズメントパーク経路最適化問題を以下のように定義する。

定義 1. アミューズメントパーク経路最適化問題とは、 $(m+1)$ 個のアトラクションの集合を $I = \{a_0, a_1, a_2, \dots, a_m\}$, アトラクション $a_i \in I$ の満足度を s_i , 利用時間（待ち時間を含む）を c_i , アトラクション $a_i, a_j \in I$ 間の移動時間を $d_{i,j}$, 1つの経路におけるアトラクションの利用数を n , 滞在予定時間を t_{\max} としたとき、以下の制約を満たし、利用者の満足度の合計が最大となる経路を求める問題である。ただし、あるアトラクションを複数回利用する場合は利用するたびに満足度が b 減衰する。

- 入退場制約：経路の開始地点と終了地点は入退場ゲートでなければならない。
- 総所要時間制約：総所要時間が滞在予定時間以内である。
- アトラクション同時利用禁止制約：同時に複数のアトラクションを利用することはできない。
- 同一アトラクション連続利用禁止制約：同一アトラクションを連続して利用することはできない。

3. アミューズメントパーク経路最適化問題の QUBO マッピング

本章では、イジングモデルと QUBO を紹介し、[15] にならないアミューズメントパーク経路最適化問題を QUBO にマッピングする。マッピングした QUBO のエネルギー関数を構成する 4 つの項を紹介する。

3.1 イジングモデルと QUBO

イジングモデルとは、ミクロな構成要素が複数集まり、マクロにどのような性質を表すかを表現するモデルである。

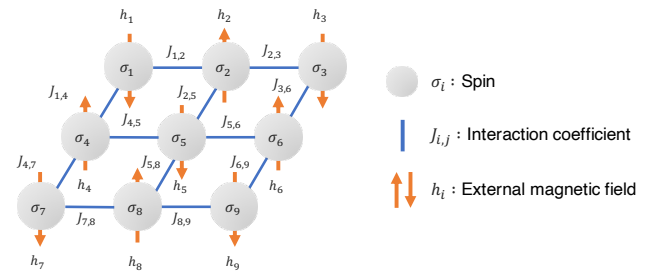


図 1: イジングモデルの例。

例えば、磁性体の性質解明に用いられる。磁性体では、電子スピンと呼ばれるミクロな要素が膨大に集まり、電子スピン間の相互作用と電子スピンの局所磁場がかかっている状態となる。イジングモデルは相互作用と局所磁場によって、磁性体全体としてどのような性質を示すかを調べることができるモデルである。図 1 にイジングモデルの例を示す。イジングモデルは無向グラフ $G = (V, E)$ 上に定義される。頂点 $i \in V$ に配置されたスピン σ_i は上向きを表す 1 または下向きを表す -1 の 2 つの状態のいずれかをとる。イジングモデルのエネルギー関数 H_{Ising} は、スピンの状態 σ_i と 2 つのスピン間の相互作用の大きさを表す相互作用係数 J_{ij} , スピンに作用する外部磁場 h_i を用いて以下の式で表される。

$$H_{\text{Ising}} = - \sum_{(i,j) \in E} J_{ij} \sigma_i \sigma_j - \sum_{j \in V} h_j \sigma_j \quad (1)$$

ここで、 J_{ij} と h_j は実数値である。

物理の原理によれば、エネルギー関数が小さいほどより安定な状態となる。つまり、相互作用係数 J_{ij} が大きいほどスピン σ_i と σ_j は同じ向きになりやすく、小さいほど異なる向きになりやすい。外部磁場 h_i が大きいほどスピン σ_i は上向きになりやすく、小さいほど下向きになりやすい。

イジングモデルにおいて、スピン $\sigma_i \in \{-1, 1\}$ の代わりにバイナリ変数 $n_i \in \{0, 1\}$ を用いたモデルを QUBO と呼ぶ。イジングモデルのスピン σ_i と QUBO のバイナリ変数 n_i は以下の式で相互に変換することができるため、イジングモデルと QUBO は等価なモデルとして扱われる。

$$n_i = \frac{\sigma_i + 1}{2} \quad (2)$$

2 つのバイナリ変数 n_i, n_j の二次係数を v_{ij} , バイナリ変数 n_i の一次係数を w_i とすると、QUBO のエネルギー関数 H_{QUBO} は以下の式で定義される。

$$H_{\text{QUBO}} = - \sum_{(i,j) \in E} v_{ij} n_i n_j - \sum_{i \in V} w_i n_i - \text{const} \quad (3)$$

ただし、 v_{ij} と w_i は実数値であり、const は定数を表す。

3.2 QUBO へのマッピング手法

QUBO にマッピングするに当たり、以下のようなバイナ

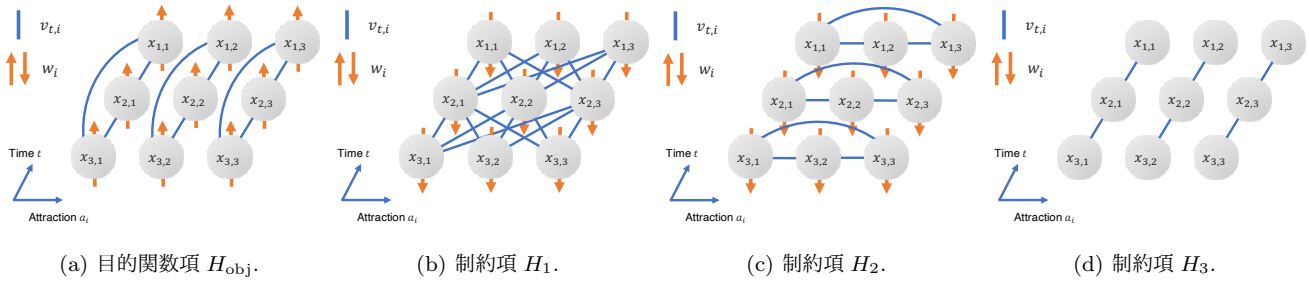


図 2: アミューズメントパーク経路最適化問題 ($n = 3, m = 3$) の QUBO マッピング。

り変数 $x_{t,i}$ を導入する。

$$x_{t,i} = \begin{cases} 1 & (t \text{ 番目にアトラクション } i \text{ を利用する}) \\ 0 & (\text{利用しない}) \end{cases} \quad (4)$$

2章で定義した制約を満たし、満足度が最大となる場合に最小となるようなエネルギー関数 H を以下のように設定する。

$$H = H_{\text{obj}} + \lambda_1 H_1 + \lambda_2 H_2 + \lambda_3 H_3 \quad (5)$$

H は 1 つの目的関数項 H_{obj} と 3 つの制約項 H_1, H_2, H_3 から構成され、 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ は各制約の重みを表す正の制約係数である。以下で各項を説明する。

3.2.1 目的関数項

アミューズメントパーク経路最適化問題の目的である満足度の最大化を表す項である。アトラクション i を複数回利用する場合、得られる満足度は利用するたびに b 減衰させているため、得られる満足度の合計は初項 s_i 、公差 $-b$ の等差数列の和とみなすことができる。アトラクション i の利用回数 k_i は以下の式で表される。

$$k_i = \sum_{t=1}^n x_{t,i} \quad (6)$$

アトラクション i の最初の満足度を s_i としたとき、アトラクション i の利用で得られる満足度の合計 S_i は以下の式で表される。ただし、本稿で扱う問題では $b = 2$ としている。

$$S_i = k_i (s_i - k_i + 1) \quad (7)$$

そして、総満足度 S はすべてのアトラクションについて式 (7) の総和をとったものであり、以下の式で表される。

$$S = \sum_{i=1}^m S_i = \sum_{i=1}^m k_i (s_i - k_i + 1) \quad (8)$$

式 (6) と式 (8) を用いた以下の式を目的関数項 H_{obj} とする。ただし、総満足度が最大となるときに QUBO のエネルギーが最小となるように、符号を反転している。

$$H_{\text{obj}} = - \sum_{i=1}^m \left(\sum_{t=1}^n x_{t,i} \left(s_i - \sum_{u=1}^n x_{u,i} + 1 \right) \right) \quad (9)$$

図 2(a) に $n = 3, m = 3$ の場合の目的関数項の QUBO マッピングを示す。

3.2.2 総所要時間制約

総所要時間が滞在予定時間以内であるという制約を表す項である。アミューズメントパークの経路における総所要時間はアトラクションの総利用時間とアトラクション間の総移動時間に分けられる。アトラクションの総利用時間はアトラクションの利用時間 c_i を用いて以下の式で表される。

$$\sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^n c_i x_{t,i} \quad (10)$$

総移動時間はアトラクション間の移動時間 $d_{i,j}$ を用いて以下の式で表される。

$$\sum_{t=1}^{n-1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m d_{i,j} x_{t,i} x_{t+1,j} \quad (11)$$

ただし、入退場制約があるためゲートから最初のアトラクションまでの移動時間と最後のアトラクションからゲートまでの移動時間を考慮する必要がある。ゲートをアトラクションの一種とみなし、 $a_0 \in I$ をゲートに対応させると、 $d_{0,i}$ がゲートからアトラクション a_i までの移動時間となる。したがって、ゲート-アトラクション間の移動時間を考慮した総移動時間は以下の式で表される。

$$\sum_{t=1}^{n-1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m d_{i,j} x_{t,i} x_{t+1,j} + \sum_{i=1}^m d_{0,i} x_{1,i} + \sum_{i=1}^m d_{i,0} x_{n,i} \quad (12)$$

総所要時間は式 (10) と式 (12) の和となる。滞在予定時間以内であるという制約を表現するため、総所要時間と滞在予定時間の差をとり、制約項 H_1 を以下のように設定する。

$$H_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^n c_i x_{t,i} + \sum_{t=1}^{n-1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m d_{i,j} x_{t,i} x_{t+1,j} + \sum_{i=1}^m d_{0,i} x_{1,i} + \sum_{i=1}^m d_{i,0} x_{n,i} - t_{\max} \quad (13)$$

式(13)では、総所要時間が短いほど H_1 が小さくなる。滞在予定時間を可能な限り使う方が総満足度の最大化に効果的であるため、 H_1 の制約係数 λ_1 によって調整する。図2(b)に $n = 3, m = 3$ の場合の総所要時間制約の QUBO マッピングを示す。

3.2.3 アトラクション同時利用禁止制約

同時に複数のアトラクションを利用することはできないという制約を表す項である。バイナリ変数 $x_{t,i}$ の行方向について、ただ1つの要素だけが1の値をとり、それ以外の要素は0の値をとることに相当する。 t 番目の訪問についてこの制約は、

$$\sum_{i=1}^m x_{t,i} = 1 \quad (14)$$

と表される。すべての訪問についてこの制約を満たす必要があるため、制約項 H_2 を以下のように設定する。

$$H_2 = \sum_{t=1}^n \left(1 - \sum_{i=1}^m x_{t,i} \right)^2 \quad (15)$$

図2(c)に $n = 3, m = 3$ の場合のアトラクション同時利用禁止制約の QUBO マッピングを示す。

3.2.4 同一アトラクション連続利用禁止制約

同一アトラクションを連続して利用することはできないという制約を表す項である。バイナリ変数 $x_{t,i}$ の列方向について、連続して1の値をとらないことに相当する。アトラクション i についてこの制約は、

$$\sum_{t=1}^{n-1} x_{t,i} x_{t+1,i} = 0 \quad (16)$$

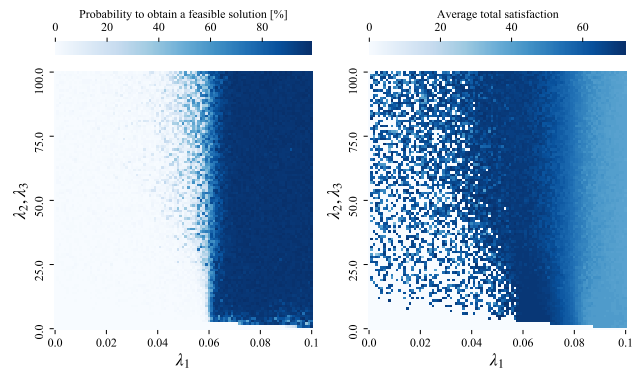
と表される。すべてのアトラクションについてこの制約を満たす必要があるため、制約項 H_3 を以下のように設定する。

$$H_3 = \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{n-1} x_{t,i} x_{t+1,i} \quad (17)$$

図2(d)に $n = 3, m = 3$ の場合の同一アトラクション連続利用禁止制約の QUBO マッピングを示す。

3.2.5 スピン数

提案した目的関数項 H_{obj} と制約項 H_1, H_2, H_3 を用いて、式(5)のエネルギー関数 H が表される。式(5)は、式(4)で表されるバイナリ変数 $x_{t,i}$ で表現され、各バイナリ変数が1つのスピンの対応するため、 m をアトラクション数、 n をアトラクションの利用数としたとき、 $m \times n$ 個のスピンの必要となる。



(a) 制約充足率 (b) 総満足度

図 3: 制約係数と解の品質の関係。

4. 補正処理

イジングマシンによる解法は確率的な手法であるため、必ずしも最適解や制約条件を満たす解を得られるわけではない。したがって、イジングマシンによって得られた解に対して追加で処理を適用することで解の品質が向上する可能性がある。本章では、アミューズメントパーク経路最適化問題のイジングマシンによる解法の事前実験の結果を説明し、イジングマシンによって得られた解に対する補正処理を提案する。

4.1 事前実験

補正処理の事前実験として、イジングマシンの設定および制約係数と解の品質の関係を調査した。

4.1.1 入力データ

本実験では、アトラクションの利用数 $n = 10$ 、アトラクション数 $m = 34$ 、滞在予定時間 t_{\max} [min] = 720 で固定し、アトラクションの利用時間 c [min] および移動時間 d [min] は実在するアミューズメントパークのデータに基づいて設定した。一般に、満足度が高いアトラクションほど待ち時間が長くなる傾向がある。したがって、待ち時間を含む利用時間 c_i と満足度 s_i の間には正の相関があるため、満足度 s_i は利用時間 c_i に基づいて設定した。

4.1.2 イジングマシンの環境

本実験では、イジングマシンとして [6] を使用した。イジングマシン [6] はスピン数が 8192 で全結合型のトポロジを持つ。全結合型のトポロジとは、2つの任意のスピン σ_i, σ_j ($i \neq j$) に対して相互作用 J_{ij} を設定可能なイジングマシンの構造である。そのため、QUBO における任意のバイナリ変数 x_i, x_j ($i \neq j$) に対する二次係数を設定可能であり、式(5)を直接入力できる。表1に本実験におけるイジングマシン [6] の設定を示す。イテレーション数は 2×10^9 まで設定可能であるが、 1×10^6 以上の値にしても解の品質が改善されなかった点およびイテレーション数の増加に伴い計算時間も増加する点を考慮して 1×10^6 に設定した。

表 1: イジングマシン [6] の設定.

設定項目	値
イテレーション数: $N_{\text{iteration}}$	1×10^6
温度更新間隔: I_{update}	1×10^3
開始温度: T_{initial}	10
冷却率: T_{decay}	0.9977

イジングマシン [6] では、温度 T は $N_{\text{iteration}}$ 回のイテレーションのうち I_{update} 回ごとに $T \leftarrow T \times T_{\text{decay}}$ で更新される。したがって、開始温度を T_{initial} 、最終温度を T_{final} としたとき冷却率 T_{decay} は以下の式で表される。

$$T_{\text{decay}} = \left(\frac{T_{\text{final}}}{T_{\text{initial}}} \right)^{\frac{I_{\text{update}}}{N_{\text{iteration}}}}. \quad (18)$$

温度更新間隔は初期設定である 1×10^3 とし、開始温度と最終温度を変化させて得られた解の総満足度を比較したところ、 $T_{\text{initial}} = 10, T_{\text{final}} = 1$ が平均的に最も高い結果となったため、式 (18) に基づいて $T_{\text{decay}} = 0.9977$ とした。

4.1.3 制約係数

式 (5) において H_1 は、他の制約項 H_2, H_3 と比較して一次係数および二次係数の値が 10-100 倍程度のオーダーであったことを考慮し、制約係数と解の品質の関係を調査した。制約係数を $\lambda_1 = i \times 10^{-3}$ ($1 \leq i \leq 100$), $\lambda_2 = \lambda_3 = j$ ($1 \leq j \leq 100$) の範囲で変化させたときの制約充足率と総満足度の関係を図 3 に示す。各制約係数の組合せでそれぞれ 100 個の解を取得したときの制約を満たす解の割合と総満足度の平均値であり、白い点は制約を満たす解が得られなかったことを表している。図 3 の結果から、おおよそ $\lambda_1 \geq 0.06, \lambda_2, \lambda_3 \geq 5$ と設定することが適切だと考えられる。

4.2 補正処理の提案アルゴリズム

アミューズメントパーク経路最適化問題には 2 章で説明した 4 つの制約条件がある。このうち、入退場制約は 3.2.2 節で示したように必ず満足される。イジングマシンによって得られる解で制約違反となる可能性があるのは総所要時間制約、アトラクション同時利用禁止制約、同一アトラクション連続利用禁止制約の 3 つである。

事前実験の結果に基づいて設定した制約係数で得られた解のうち、制約違反となった解はすべて総所要時間制約のみに違反していた。総所要時間制約は総所要時間が滞在予定時間以内であるという不等式制約だが、単純に不等式を満たすだけでなく、滞在予定時間を可能な限り使う方が総満足度の最大化に効果的であるということを考慮しているためだと考えられる。そこで、イジングマシンで得られた解のうち、すべての制約を満足した解と総所要時間制約を満足していない解に対して、総所要時間制約を満足しながら総満足度を大きくする補正処理を提案する。

状態 $A = \{x_{t,i} \mid 1 \leq t \leq n, 1 \leq i \leq m\}$ の総満足度を

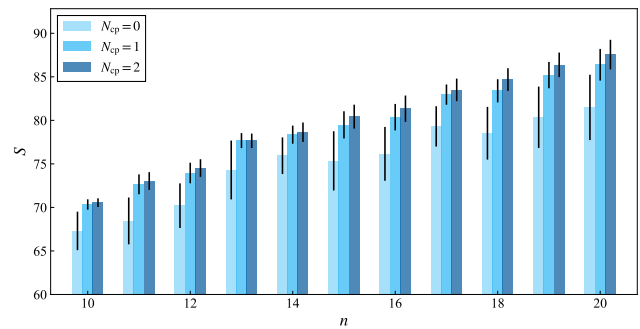


図 4: 補正処理の適用回数による総満足度の比較.

$S(A)$, 総所要時間を $T(A)$ とした場合の補正処理の手順を以下に示す。

- (1) 元の状態を X とし、 $S_{\text{best}} \leftarrow S(X)$, $T_{\text{best}} \leftarrow T(X)$, $r \leftarrow 1$ とする。 X が総所要時間制約を満たしていない場合は $S_{\text{best}} \leftarrow 0$ とする。
- (2) $X_1^{(r)} \leftarrow \{x_{r,i} \in X \mid x_{r,i} = 1\}$ とする。
- (3) すべての $x_{r,i} \in X_1^{(r)}$ の値を 0 にし、 $i \leftarrow 1$ とする。
- (4) $x_{r,i}$ の値を 1 にした状態 X_{trial} について以下の処理を適用する。
 - (i) X_{trial} が総所要時間制約を満たす場合、 $S(X_{\text{trial}}) > S_{\text{best}}$ であれば $S_{\text{best}} \leftarrow S(X_{\text{trial}})$, $X' \leftarrow X_{\text{trial}}$ とする。
 - (ii) X_{trial} が総所要時間制約を満たさない場合、 $T(X_{\text{trial}}) < T_{\text{best}}$ であれば $T_{\text{best}} \leftarrow T(X_{\text{trial}})$, $X' \leftarrow X_{\text{trial}}$ とする。

ただし、 $x_{r-1,i} = 1$ または $x_{r+1,i} = 1$ の場合はこの手順をスキップする。
- (5) $i \leftarrow i + 1$ として (4) を繰り返す ($1 \leq i \leq m$)。
- (6) $r \leftarrow r + 1$ として (2)–(5) を繰り返した後 ($1 \leq r \leq n$), X' を新しい状態とする。

補正処理では、アトラクション同時利用禁止制約と同一アトラクション連続利用禁止制約を満たす解空間内で探索するため、これらの制約を違反することなく総満足度を向上させることができる。また、補正処理では総所要時間制約に違反する場合でも元の解より総所要時間が短くなる解を採用するため、補正処理を複数回適用することによって結果的に総所要時間制約を満足することが期待される。

5. 補正処理の適用と評価

4.2 節で提案した補正処理を適用し、評価する計算機実験を行った。アミューズメントパーク経路最適化問題の入力データとイジングマシンの環境は 4.1 節の事前実験と同様の設定とした。制約係数は $\lambda_1 = 0.003n + 0.03$, $\lambda_2 = \lambda_3 = 20$ とした。補正処理は、OS が macOS 10.15.5, CPU が Intel Core i7 2.7GHz, メモリが 16GB の環境下で Python で実行した。

アトラクションの利用数 n を 10–20 で変化させ、イジングマシンによって各 100 個の解を取得して補正処理を N_{cp}

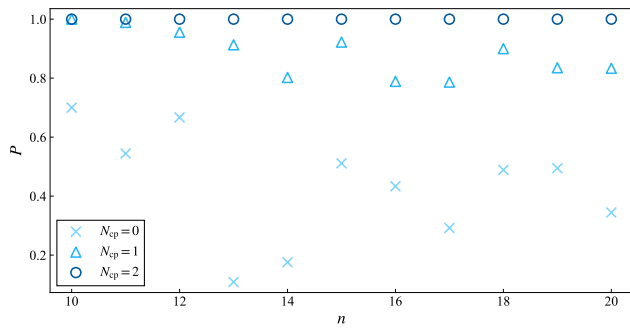


図 5: 補正処理の適用回数による制約充足率の比較.

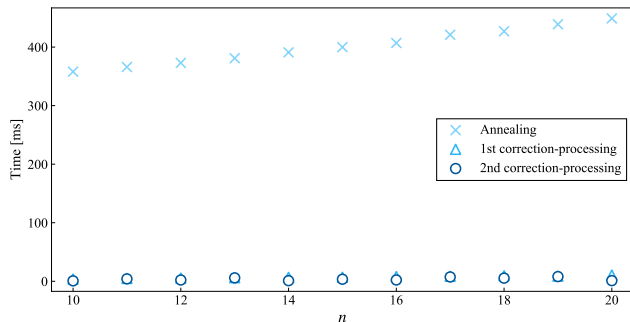


図 6: イジングマシンにおけるアニーリング時間と補正処理の計算時間.

回適用し、解の品質を評価する。補正処理の適用回数による総満足度の比較を図 4 に示す。図 4 のグラフは 100 個の解のうち、すべての制約を満足するものについて、総満足度の平均値、エラーバーは標準偏差を表している。補正処理を適用した場合、総満足度が平均的に向上し、ばらつきが小さくなったことから補正処理が効果的であることがわかる。 $N_{cp} \geq 3$ の場合は、大幅な改善は見られなかった。補正処理の適用回数による制約充足率の比較を図 5 に示す。図 5 のプロットは制約充足率として 100 個の解のうちすべての制約を満たす解の割合 P を表している。補正処理を適用するほど制約充足率が向上し、2 回適用した場合ですべての n について 100% となった。問題の規模や入力データによって必要な適用回数は異なるが、補正処理を繰り返し適用することによって確実に制約を満たす解が得られると考えられる。

以上の結果から提案した補正処理が解の品質向上の点で効果的であることが判明したため、計算時間を評価する。イジングマシンにおけるアニーリング時間と補正処理の計算時間を図 6 に示す。イジングマシンにおけるアニーリング時間と 1 回目および 2 回目の補正処理の計算時間をそれぞれ表している。本実験での補正処理の計算時間はイジングマシンでのアニーリング時間の数パーセントであり、効率的に解の品質を向上させる手法だといえる。ただし、補正処理の適用回数ならびに問題の規模が大きいほど補正処理の計算時間が占める割合も大きくなる点に注意する必要がある。

6. おわりに

本稿では、アミューズメントパーク経路最適化問題を定義し、イジングモデルへのマッピング手法を提案した。加えて、イジングマシンによって得られた解に対して解の品質を向上させる補正処理を提案した。提案した補正処理を適用することで、制約充足率とアミューズメントパーク経路最適化問題の目的である総満足度を効率的に向上させることに成功した。イジングマシンによって得られた解からスピンを数個のみフリップさせた状態でも解の品質が向上する可能性が十分あり、本稿で提案した補正処理のような後処理はイジングマシンを用いた解法において有効であるといえる。

謝辞

本研究は、一部、JST CREST (Grant No. JPMJCR19K4) の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] H. Xu, Q. Li, X. Chen, J. Chen, J. Guo, and Y. Wang, "Logistical routing of park tours with waiting times: case of Beijing Zoo," *Tourism Geographies*, vol. 17, no. 2, pp. 208–222, 2015.
- [2] T. Shibuya, K. Kanamori, and H. Ohwada, "A route search system in consideration of the reservation service in amusement parks for smart phone," *International Journal of Machine Learning and Computing*, vol. 2, no. 6, p. 771, 2012.
- [3] H. Ohwada, M. Okada, and K. Kanamori, "Flexible route planning for amusement parks navigation," *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Cognitive Informatics and Cognitive Computing, ICCI*CC 2013*, pp. 421–427, 2013.
- [4] M. W. Johnson, M. H. S. Amin, S. Gildert, T. Lanting, F. Hamze, N. Dickson, R. Harris, A. J. Berkley, J. Johansson, P. Bunyk, and et al., "Quantum annealing with manufactured spins," *Nature*, vol. 473, no. 7346, pp. 194–198, 2011.
- [5] M. Yamaoka, C. Yoshimura, M. Hayashi, T. Okuyama, H. Aoki, and H. Mizuno, "A 20k-spin Ising chip to solve combinatorial optimization problems with CMOS annealing," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 51, no. 1, pp. 303–309, 2016.
- [6] M. Aramon, G. Rosenberg, E. Valiante, T. Miyazawa, H. Tamura, and H. G. Katzgraber, "Physics-inspired optimization for quadratic unconstrained problems using a digital annealer," *Frontiers in Physics*, vol. 7, no. 48, pp. 1–14, 2019.
- [7] T. Inagaki, Y. Haribara, K. Igarashi, T. Sonobe, S. Tamate, T. Honjo, A. Marandi, P. L. McMahon, T. Umeki, K. Enbutsu, O. Tadanaga, H. Takenouchi, K. Aihara, K.-i. Kawarabayashi, K. Inoue, S. Utsunomiya, and H. Takesue, "A coherent Ising machine for 2000-node optimization problems," *Science*, vol. 354, no. 6312, pp. 603–606, 2016.
- [8] H. Goto, K. Tatsumura, and A. R. Dixon, "Combinatorial optimization by simulating adiabatic bifurcations in nonlinear Hamiltonian systems," *Science Advances*,

- vol. 5, no. 4, pp. 1–9, 2019.
- [9] M. Maezawa, G. Fujii, M. Hidaka, K. Imafuku, K. Kikuchi, H. Koike, K. Makise, S. Nagasawa, H. Nakagawa, M. Ukibe, and S. Kawabata, “Toward practical-scale quantum annealing machine for prime factoring,” *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 88, no. 6, p. 061012, 2019.
 - [10] E. Ising, “Beitrag zur Theorie des Ferromagnetismus,” *Zeitschrift für Physik*, vol. 31, no. 1, pp. 253–258, 1925.
 - [11] A. Lucas, “Ising formulations of many NP problems,” *Frontiers in Physics*, vol. 2, no. 5, pp. 1–15, 2014.
 - [12] D. Oku, K. Terada, M. Hayashi, M. Yanaoka, S. Tanaka, and N. Togawa, “A fully-connected Ising model embedding method and its evaluation for CMOS annealing machines,” *IEICE Transactions on Information and Systems*, vol. E102.D, no. 9, pp. 1696–1706, 2019.
 - [13] K. Tanahashi, S. Takayanagi, T. Motohashi, and S. Tanaka, “Application of Ising machines and a software development for Ising machines,” *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 88, no. 6, p. 061010, 2019.
 - [14] S. Tanaka, R. Tamura, and B. K. Chakrabarti, *Quantum Spin Glasses, Annealing and Computation*. Cambridge University Press, 2017.
 - [15] 武笠陽介, 若泉朋弥, 田中宗, 戸川望, “イジングマシンを用いたアミューズメントパークの経路最適化手法,” in *信学技報*, vol. 119, no. 443, 2020, pp. 167–172.