

1. 導入

近年では、新たなハードウェアの開発と提供が行われており、カナダの D-Wave.inc が提供するイジング型アニーリングマシンの D-Wave 2000 や富士通の古典的な論理回路を基にするアニーリングアクセラレータを用いた Digital Annealer がある。これらのアニーリングマシンは最適化問題の近似解を得るために用いられる。

上記のアニーリングマシンはイジングタイプのハミルトニアンを基にしているため、解きたい最適化問題のコスト関数を QUBO 形式に変換する必要がある。ここで、連続変数は二進数展開を行うことでイジング型の変数に変換することができるが、元のコスト関数の定量的な QUBO 形式の導出方法はまだ見つからない。しかしながら、いくつかの再定式化は Lucas の先行研究によって与えられており、QUBO 形式で表現する論理ゲートを示している。また、近年ではルジャンドル変換を用いた q -loss 関数の QUBO 形式の導出がされている。

q -loss 関数は機械学習のラベルノイズに対してロバスト性を持つコスト関数を提供し、ルジャンドル変換を用いた QUBO 形式への変換はいくつかの数学的な変換に関係している。実際に、ReLU タイプ関数に対してはルジャンドル変換だけでは不十分であり、Wolfe の双対定理を追加で用いられた。この結果から QUBO 形式を直接的に導出することは困難であり、ときには元のコスト関数に依存したさらなる変換を行う必要がある。

このように、アニーリングマシンを機械学習で用いるために QUBO 形式を導出する研究がある。この他にも最適化問題に関連のある研究分野は数多くあり、その 1 つにデータ解析がある。データ解析において「正規化」の概念は重要な役割を持ち、機械学習でも用いられる。例えば L_2 ノルムは実用的な問題に対して幅広く利用されており、また、 L_1 ノルムは解に「スパース性」を加えるために適用される。特に LASSO はスパース推定を行うための有名な方法であり、コスト関数に L_1 ノルムを加えるだけで良いので実装が容易である。近年では、スパース推定の考え方はブラックホールの分析に利用されている。ブラックホールに関するデータはとても小さくため画像の解像度が低く、観測することが困難である。そのため、世界中の電波望遠鏡から同時に観測を行い、観測されたビッグデータに対してスパース推定に基づく方法を適用することで必要な情報のみを抽出しブラックホールの画像が得られた。

アニーリングマシンを用いた正規化の実装に関して、 L_2 ノルムは二次形式なので QUBO 形式への変換は容易であるが、 L_1 ノルムは微分不可能なため QUBO 形式への変換は困難であった。

以前の研究では、 L_1 ノルムの QUBO 形式への定式化を行い、二進数展開までは行わず連続変数を用いて、シミュレーテッドアニーリングによる数値実験を行うことで検証を行った。その結果から変数の削減を行うことができた。

本研究では、以前の研究では行えなかった、二進数展開を適用した離散値に対しての古典マシンと Digital Annealer を用いた数値実験結果の比較を行う。また、本稿では量子アニーラに関連する研究動向についても記載する。

以降の章では、量子アニーラに関連する研究動向および本研究で用いる手法の詳細について説明する。三章では、QUBO 形式とイジングモデルについてと先行研究で行われたいくつか問題を QUBO 形式へ変換する手法について記載する。四章では、本研究の連続変数に対して二進数展開することで離散値に変換する手法についての説明と古典とデジタルアニーリングマシンで用いるハミルトニアンの形式についての説明を行う。五章では、四章で紹介したものとは異なるハミルトニアンについての説明を行い、量子アニーリングハードウェアへの実装について考える。

2. 背景と先行研究

2.1 QUBO 形式とイジングモデル

デジタルアニーラで組み合わせ最適化問題を解くためには問題をイジング形式もしくは QUBO 形式で表現する必要がある。QUBO 形式は $q_i \in \{0, 1\}$ のバイナリ変数をとる。また、イジングモデルは $\sigma_i \in \{-1, +1\}$ のバイナリ変数を取り、QUBO 形式は等価であるので、QUBO 形式をイジングモデルに変換するることができる。イジングモデルは次のように表現される。

$$H = - \sum_{i,j} J_{ij} \sigma_i \sigma_j - \sum_i h_i \sigma_i \quad (1)$$

ここで、 J_{ij} は i 番目と j 番目のスピン間の二次項の係数であり、 h_i は i 番目のスピンの一次項の係数である。イジングモデルから QUBO 形式への変換は $q_i = (\sigma_i + 1)/2$ を計算すればよい。

$$H = - \sum_{i,j} \tilde{J}_{i,j} q_i q_j - \sum_i \tilde{h}_i q_i \quad (2)$$

2.2 q -loss 関数

Denchev らが行った先行研究について説明する。?? で提案された q -loss 関数は次のように表される

2.3 ReLU タイプ関数

3. L_1 ノルムの QUBO 形式

4. 関連研究

4.1 Non-Stoquastic ハミルトニアン

5. 関連する研究について

A4 2 ページで作成してください。表・裏の 1 枚に印刷し、提出してください。

6. 2 段組の感じ

参考文献

[1] ほげほげ: あべば入門, 何らか出版社, 200?年?月.