

Title	JSSPのBQM生成におけるボトルネック分析と直接構築手続きの整理による高速化およびQPUの性能調査 [課題研究報告書]
Author(s)	河本, 大貴
Citation	
Issue Date	2026-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	https://hdl.handle.net/10119/20548
Rights	
Description	Supervisor:井口 寧, 先端科学技術研究科, 修士(情報科学)

Bottleneck Analysis in BQM Generation for JSSP, Speedup through Systematization of Direct Construction Procedures, and QPU Performance Investigation

s2110054 Daiki Kawamoto

Quantum annealing is expected to be applied to combinatorial optimization problems, but its performance on real-world problems has not been sufficiently clarified. In the application of quantum annealing to the Job Shop Scheduling Problem (JSSP), Carugno et al. reported an implementation using the `dwavebinarycsp` library; however, BQM (Binary Quadratic Model) generation requires more than 8 hours for problems of approximately $n = 26$, making evaluation of large-scale problems difficult. Yet, which specific process within the library causes the exponential growth has not been identified.

In this study, we analyzed the bottleneck in BQM generation and consolidated previously dispersed methods from prior research to resolve it. First, we reproduced Carugno’s method and measured processing times in detail. As a result, we identified that $O(2^T)$ enumeration processing (where T is the timespan) in the uniqueness constraint processing within the `dwavebinarycsp` library is the bottleneck. For a 20×20 instance, approximately 7.5 minutes were required, making BQM generation practically infeasible for larger problem sizes.

Next, we developed a method to construct BQM directly without using `dwavebinarycsp`. We formalized four procedures that were not explicitly stated in Venturelli’s paper: (a) variable index assignment, (b) conversion to QUBO coefficients, (c) coefficient accumulation, and (d) BQM object construction. This approach calculates QUBO coefficients directly from Venturelli’s formulation without enumeration processing.

In the evaluation experiments, this method achieved approximately 5200 times speedup compared to the conventional method for a 20×20 instance. The speedup did not degrade solution quality. Furthermore, we conducted QPU performance evaluation, which became possible by resolving the bottleneck, and investigated the performance limits of quantum annealing for problem sizes up to $n = 30$. We confirmed that optimal solutions are reliably obtained for $n \leq 15$, while the success rate decreases for $n \geq 26$.

JSSP の BQM 生成におけるボトルネック分析と直接構築手続きの整理による高速化および QPU の性能調査

s2110054 河本 大貴

量子アニーリングは組合せ最適化問題への適用が期待されているが、実問題に対する性能は十分に解明されていない。ジョブショップスケジューリング問題（Job Shop Scheduling Problem：JSSP）への量子アニーリング適用において、Carugno らは `dwavebinarycsp` ライブラリを用いた実装を報告しているが、 $n = 26$ 程度の問題では BQM（Binary Quadratic Model）生成に 8 時間以上を要するため、大規模問題での評価が困難な状況にある。しかし、ライブラリ内部のどの処理が指数増大を引き起こすかは特定されていない。

本研究では、この BQM 生成のボトルネックを分析し、先行研究で散在していた手法を整理することでその解消を図った。まず、Carugno らの手法を再現実装し処理時間を詳細に計測した結果、`dwavebinarycsp` ライブラリ内部の一意性制約処理において $O(2^T)$ （ T はタイムスパン）の列挙処理がボトルネックであることを特定した。20 × 20 インスタンスでは約 7.5 分を要し、それ以上の問題サイズでは実質的に BQM 生成が困難となることがわかった。

次に、`dwavebinarycsp` を経由せずに BQM を直接構築する手法を整理した。Venturelli らの論文では明示されていなかった 4 つの手続き、すなわち (a) 変数インデックス割り当て、(b) QUBO 係数への変換、(c) 係数の累積、(d) BQM オブジェクト構築を明示化し、列挙処理を経ずに Venturelli の定式化から直接 QUBO 係数を計算する手法を整理した。

本手法の評価実験では、20 × 20 インスタンスにおいて従来手法と比較して約 5200 倍の高速化を達成した。高速化に伴う解品質の劣化は観測されなかった。さらに、ボトルネック解消により可能となった QPU 性能評価を実施し、 $n = 30$ までの問題サイズで量子アニーリングの性能限界を調査した。 $n \leq 15$ では安定して最適解が得られ、 $n \geq 26$ で達成率が低下することを確認した。