



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Applications of quantum annealing in combinatorial optimization

Yarkoni, S.

Citation

Yarkoni, S. (2022, December 20). *Applications of quantum annealing in combinatorial optimization*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3503567>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3503567>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Samenvatting

In dit proefschrift onderzoeken we het gebruik van quantum annealing bij het oplossen van praktische combinatorische optimalisatie in verschillende situaties. Met de continue ontwikkeling van quantum hardware en -software wordt het potentieel van quantum algoritmes langzaam werkelijkheid. Sommige eigenaardigheden van quantum hardware hebben echter geen exacte parallel in klassieke informatica, en daarom ontwikkelt het werk in dit proefschrift nieuwe methoden om quantum annealing voor combinatorische optimalisatie te gebruiken. We beginnen met het beschrijven van het quantum annealing (QA) paradigma in Hoofdstuk 2. De onderliggende theorie van het algoritme als een metaheuristisch quantum optimalisatie-algoritme wordt besproken. We schetsen de basis met betrekking tot de quantum processing units (QPU's) geproduceerd door D-Wave Systems die de transversal field Ising Hamiltonian gebruiken om QA te implementeren. De wiskundige beschrijving van de te optimaliseren functies en modellen die toelaatbaar zijn voor QA QPU's wordt ook gepresenteerd, hetgeen de context vormt voor algemene combinatorische optimalisatie met behulp van deze QPU's.

In Hoofdstuk 3 gaan we dieper in op het rechtstreeks oplossen van problemen met behulp van qubits in QA door het probleem van de “maximum independent set” (MIS) te bestuderen, een bekend NP-hard probleem. We ontdekken hoe het insluiten van willekeurig gestructureerde grafieken in vaste QPU-topologieën de prestaties beïnvloedt, en welke parameters daarbij betrokken zijn. Vervolgens proberen we de prestatieproblemen die we tegenkomen bij het inbedden van procedures te verminderen door een controleparameter van de QPU, de *annealing offsets*, af te stemmen. We gebruiken het (1+1)-CMA-ES-algoritme om deze offsets af te stemmen als een voorbewerkingsstap. We vinden dat de afstemmingsprocedure de QPU-prestaties gemiddeld verbetert, en de CMA-ES-routine is hierin efficiënter in vergelijking met andere afstemmingsroutines. De afweging tussen het wel en

niet gebruiken van de afstemmingsroutine wordt onderzocht. We gaan hierna in Hoofdstuk 4 over op het oplossen van problemen uit de echte wereld, in tegenstelling tot eenvoudige bekende modellen. We introduceren twee methoden voor het oplossen van combinatorische optimalisatieproblemen: (i) het afleiden van een nieuw QUBO/Ising-model uit praktijk data, en (ii) het verwerken van praktijk data en het optimaliseren ervan met behulp van een bekende QUBO-formulering. De eerste strategie wordt gebruikt om een praktische logistiek combinatorisch optimalisatieprobleem op te lossen, het *shipment rerouting-probleem*, een tussenliggende taak van het meer welbekende “less-than-truckload” probleem. De introductie van een mix van harde beperkingen (vrachtwagencapaciteit) en eenvoudige optimalisatie (verkleining van vrachtwagenafstanden) in een gecombineerde QUBO resulteert in een overhead in transformatie die niet wordt overkomen door de geteste QUBO-solvers. In het laatste geval van (ii), gebruiken we bekende discretisatietechnieken om continue tijdreeksgegevens om te zetten in een reeks karakters, die vervolgens worden gebruikt om gegevensreconstructie uit te voeren (uit een bekende database). Dit wordt bereikt door de reconstructietaak te formuleren als een set-cover-probleem (een ander bekend NP-hard probleem) dat een eenvoudige bekende QUBO-formulering heeft. We laten zien hoe deze “set cover QUBO” de originele strings correct reconstrueert uit fragmenten in de database, en zo het originele tijdreeksprobleem oplost. We laten verder zien hoe dit kan worden uitgebreid om classificatie uit te voeren, wat resulteert in een semi-supervised classificatie-algoritme.

Om quantum annealing in de praktijk te gebruiken, moeten we de QUBO/Ising-modelleringsproblemen en de hardwarebeperkingen overwinnen. Hiertoe onderzoeken we het gebruik van hybride kwantum-klassieke algoritmen in Hoofdstuk 5. We beginnen met het motiveren van een reëel verkeersoptimalisatieprobleem: het navigeren van een vloot bussen tussen bekende afstanden. Een volledig geautomatiseerde hybride optimalisatieservice wordt gebouwd en gelanceerd als onderdeel van een proefproject met een vloot van negen bussen voor de Web Summit 2019-conferentie. De verbindingen tussen live verkeersgegevens die worden gebruikt om de verkeersstroom QUBO op te bouwen en toegang te krijgen tot hybride algoritmen, worden in de praktijk gebouwd en ingezet. We merken dat hoewel de ingebouwde service resulteert in een stabiele navigatie, het systeem alleen kleine vloten aankan. Daarom motiveren we in de tweede helft van Hoofdstuk 5 een andere use-case voor real-world optimalisatie, het *lakwinkelprobleem*: het schilderen van een reeks autocarrosserieën in een fabriek met zo min mogelijk kleur wisselingen.

We laten zien hoe u een Ising-model construeert dat direct de gegevens van de spuitrij weergeeft met minimale overhead. Door dit te doen, nemen we meerdere technieken op die in de vorige hoofdstukken van dit proefschrift zijn gepresenteerd, en lossen we problemen uit de echte wereld rechtstreeks op op twee verschillende generaties D-Wave QPU's, evenals klassieke en hybride algoritmen. We zijn in staat om deze Ising-modellen op relatief grote schaal te onderzoeken, waarbij we de probleemgrootte van industriële relevantie benaderen. Hoewel de prestaties van het geteste hybride algoritme het meeste nut vertoonden, was een eenvoudig hebzuchtig algoritme bijna net zo effectief bij de grootste probleemgroottes. We concluderen het een en ander over het werk van dit proefschrift in Hoofdstuk 6. De nuttigheid van de verschillende methodes uit deze thesis worden gediscussieerd, en het toekomstige werk dat nodig is om quantum annealing (en vergelijkbare) algoritmes in praktijk toe te passen wordt uitgelicht.

