

대규모 양자컴퓨팅 회로에 대한 계층적 시각화 기법

김주환^{1,*} · 최병수² · 조동식³

¹한국해양과학기술원 · ²한국전자통신연구원 · ³울산대학교

Hierarchical Circuit Visualization for Large-Scale Quantum Computing

JuHwan Kim^{1,*} · Byung-Soo Choi² · Dongsik Jo³

¹Korea Institute of Ocean Science and Technology · ²Electronics and Telecommunications Research Institute · ³University of Ulsan

E-mail : juhwan kim@kiost.ac.kr / bschoi3@etri.re.kr / dongsikjo@ulsan.ac.kr

요 약

최근, 고전컴퓨터(Classic Computer)의 한계를 뛰어넘는 양자컴퓨터(Quantum Computer)에 대한 연구개발이 다양한 분야에서 활발하게 이루어지고 있다. 고전컴퓨터의 전기적인 신호처리와는 다르게 양자역학적인 원리를 사용한 양자컴퓨터는 양자 중첩(Quantum Superposition), 양자 얽힘(Quantum Entanglement)과 같은 다양한 양자역학의 현상/특성을 활용하여 연산을 수행하기 때문에 고전컴퓨터의 연산에 비해 아주 복잡한 연산과정을 거치게 된다. 또한, 큐비트의 종류, 배치, 연결성 등 실제 양자컴퓨터를 구동시키기 위해 구성되는 많은 요소들에 의한 각각의 영향이 양자컴퓨터의 연산 결과와 연산 과정에서 많은 영향을 끼치기 때문에 각각의 요소를 효율적이고 정확하게 활용하기 위해 실제 양자컴퓨터의 구동 이전에 데이터를 시각화하여 오류검증/최적화/신뢰성검증을 할 필요가 있다. 하지만 양자컴퓨터 내부에 구성된 다양한 요소들의 데이터를 전부 시각화 할 경우 직관적으로 원하는 데이터를 파악하는 것이 어렵기 때문에 선별적으로 데이터를 시각화 할 필요가 있다. 본 논문에서는 양자컴퓨터를 구성하는 다양한 요소들의 데이터를 시각화 하여 직관적으로 데이터를 관측하고 활용할 수 있도록 복잡하게 구성되는 양자컴퓨터 내부 회로 구성요소들을 계층적으로 시각화 하는 방법을 제안한다.

ABSTRACT

Recently, research and development of quantum computers, which exceed the limits of classical computers, have been actively carried out in various fields. Quantum computers, which use quantum mechanics principles in a way different from the electrical signal processing of classical computers, have various quantum mechanical phenomena such as quantum superposition and quantum entanglement. It goes through a very complicated calculation process compared to the calculation of a classical computer for performing an operation using its characteristics. In order to utilize each element efficiently and accurately, it is necessary to visualize the data before driving the actual quantum computer and perform error verification, optimization, reliability, and verification. However, when visualizing all the data of various elements configured inside the quantum computer, it is difficult to intuitively grasp the necessary data, so it is necessary to visualize the data selectively. In this paper, we visualize the data of various elements that make up a quantum computer, and hierarchically visualize the internal circuit components of a quantum computer that are complicatedly configured so that the data can be observed and utilized intuitively.

키워드

Quantum Computing, Quantum Circuit, Visualization, Scientific Visualization, Quantum Circuit Optimization

1. 서 론

양자역학의 원리를 적용한 양자컴퓨터는 양자정보의 양자병렬성을 이용해 고전컴퓨터에서는 해결

하기 힘든 문제를 빠른 속도로 해결할 수 있는 방법을 제공한다. 하지만 이러한 양자컴퓨팅을 연산에 직접 활용하기 위해서는 다양한 방면에서 해결해야 할 문제들이 존재한다. 전기적인 신호를 활용하여 연산에 활용하는 고전컴퓨터와는 다르게 양

* speaker

자컴퓨팅은 양자역학을 활용한 양자얽힘(Quantum Entanglement), 양자중첩(Quantum Superposition)과 같은 다양한 양자역학적인 특성을 활용하여 복잡한 과정을 거쳐 연산을 진행한다[1-2]. 양자컴퓨터의 연산에 사용되는 큐비트(Qubit)의 종류, 배치, 연결성 과 양자 게이트 등 다양한 요소들이 상호간 영향을 끼치며 양자컴퓨터를 구동하는 양자 알고리즘으로 구성되기 때문에 각각의 요소를 효율적으로 정확하게 활용하기 위해 실제 양자컴퓨터의 구동 이전에 데이터를 시각화하여 오류검증/최적화/신뢰성검증을 할 필요가 있다[3-5].

또한 유의미한 연산 및 알고리즘의 구동을 위해서는 많은 양의 큐비트와 양자게이트를 사용하는 양자컴퓨팅의 양자 알고리즘 구성을 필요로 한다 [6-7]. 소규모의 양자 알고리즘을 위한 큐비트와 양자게이트의 구성에서는 구성된 요소들의 오류검증/최적화/신뢰성검증을 진행하는 것이 가능하지만, 많은 양의 큐비트와 양자게이트를 사용하는 대규모 양자컴퓨터의 경우 알고리즘에 구성된 요소들의 영향과 기능을 직관적으로 파악하고 개선을 위해 분석하는 것은 어렵다.

양자컴퓨터를 구동하기 위해 필요한 다양한 구성 요소들을 계층적으로 분류하여 각 계층별로 시각화 한다. 계층적으로 분류된 양자컴퓨팅 구성요소들은 각각의 정보를 보다 직관적으로 시각화하여 양자컴퓨팅 구성요소의 정보를 직관적으로 파악할 수 있다.

대규모 양자컴퓨팅 회로 시각화를 통해 보다 실제적인 환경에서 대규모 양자컴퓨팅 회로를 분석하여 실제 양자컴퓨팅을 구동하기 이전에 오류검증/최적화/신뢰성검증을 진행하여 양자컴퓨팅을 구성하는 회로를 보다 효율적으로 구성할 수 있도록 한다.

본 논문에서는 대규모 양자컴퓨팅을 구성하는 회로를 직관적으로 파악하여 오류검증/최적화/신뢰성검증을 보다 명확하게 파악하고 분석하기 위한 대규모 양자컴퓨팅의 회로에 대한 계층적 시각화 기법을 제안한다.

대규모 양자컴퓨팅 회로 시각화 환경에서는 많은 양의 정보를 동시에 시각화 할 경우 원하는 정보를 직관적으로 파악할 수 없는 문제를 가지게 된다. 이러한 해결하기 위해 회로 시각화를 통해 얻고자 하는 정보를 계층적으로 분류한다.

계층적으로 분류된 회로 시각화 정보는 많은 양의 정보가 시각화 된 환경에서 선별적으로 원하는 정보를 시각화 할 수 있기 때문에 직관적인 회로 정보의 시각화가 가능하다.

기존의 대규모 양자컴퓨팅 회로 시각화 방식에서의 문제를 해결하여 방대하고 다양한 정보를 다루는 대규모 양자컴퓨팅 환경에서 양자컴퓨팅 회로를 시각화하여 보다 효율적인 대규모 양자컴퓨팅 구성요소의 구성 및 분석이 가능하도록 한다.

II. 양자컴퓨팅 회로의 계층적 시각화 기법

대규모 양자컴퓨팅 회로에 대한 계층적 시각화를 위해 대규모 양자컴퓨팅에 사용되는 요소들을 계층적으로 분류할 필요가 있다. 양자컴퓨팅의 구동을 위해 구성되는 양자게이트는 각각의 게이트가 특정한 의미와 수식을 가지며 이러한 양자게이트의 조합으로 특정한 기능을 수행하는 모듈을 구성할 수 있으며, 이러한 모듈을 조합하여 실질적인 양자컴퓨팅 알고리즘의 구성이 이루어진다. 소규모 양자컴퓨팅 알고리즘의 경우 조합된 양자게이트의 개수가 비교적 적어 양자알고리즘 전체를 분해하여 양자게이트를 시각화 한 후 오류검증/최적화/신뢰성검증을 진행할 때 원하는 정보를 직관적으로 파악하는 것이 어렵지 않지만 많은 양의 큐비트와 양자게이트를 다루는 대규모 양자컴퓨팅 환경의 경우 회로 분석을 위해 전체 알고리즘의 양자게이트를 전부 시각화 할 경우 많은 양의 복잡한 양자게이트의 구성으로 인해 직관적인 회로의 내용 파악 및 분석이 어렵다. 따라서 대규모 양자컴퓨팅 회로의 직관적인 분석을 위해 4단계 수준의 알고리즘수준, 컴파일수준, 아키텍처수준, 양자칩수준으로 분류하여 양자컴퓨팅의 구동을 위해 구성된 양자게이트를 시각화 하여 양자알고리즘 분석 시 원하는 정보를 직관적으로 파악할 수 있도록 한다.

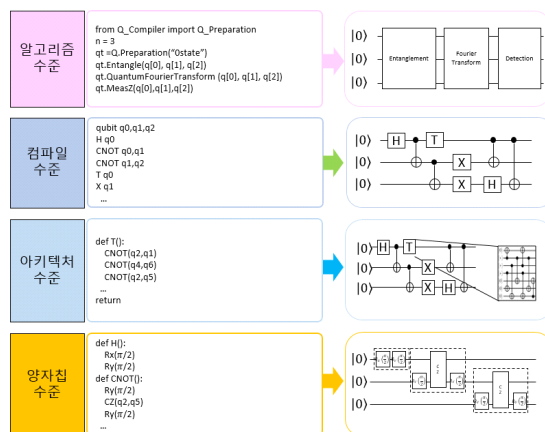


그림 1. 양자알고리즘의 4단계 계층적 시각화

그림1과 같이 4단계 수준으로 분류하여 계층적으로 시각화한 양자컴퓨팅 회로는 각각의 수준에서 개선이 필요한 양자게이트를 직관적으로 파악할 수 있다. 이를 통해 양자알고리즘의 개선이나 분석이 필요한 수준에서 특정한 양자게이트의 정보를 파악하므로 보다 효율적으로 양자알고리즘을 개선하여 구성하는 것이 가능하다.

III. 대규모 양자컴퓨팅 회로의 시각화

그림2는 동일한 N=15 Shor's Algorithm을 서로 다른 수준의 계층으로 시각화 한 모습이다[8]. N=15 Shor's Algorithm의 경우 컴파일수준까지 분리된 양자게이트를 전부 시각화 할 경우 약 43만개의 게이트가 시각화 된다.

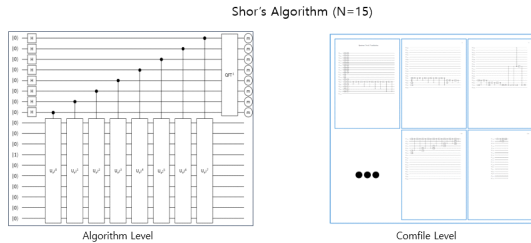


그림 2. N=15 Shor Algorithm의 알고리즘수준 시각화(좌) 컴파일수준 시각화(우)

컴파일 수준으로 모든 양자게이트를 시각화 할 경우 양자게이트 각각의 구성은 파악이 가능하지만 많은 양의 양자게이트로 인해 양자알고리즘에 적용된 전반적인 기능을 직관적으로 파악하는 것은 어렵다. 반대로 모듈별로 시각화된 양자 알고리즘의 경우 전체 알고리즘에 어떤 기능이 적용되었는지에 대한 파악은 용이하지만 세부적인 양자게이트에 대한 분석은 어렵다. 따라서 분석하고자 하는 양자알고리즘의 구성요소에 따라 계층적인 수준별 회로 시각화를 통해 양자알고리즘을 분석하여 구성요소별로 양자컴퓨팅을 구성하는 양자알고리즘의 오류검증/최적화/신뢰성검증을 할 수 있다.

IV. 결론 및 추후연구

본 논문에서는 대규모 양자컴퓨팅 환경에서 양자회로를 직관적으로 분석하기 위해 양자회로의 계층적 회로 시각화 기법을 제시하였다. 본 논문에서 제안한 대규모 양자컴퓨팅 회로에 대한 계층적 시각화 기법을 통해 실질적인 양자컴퓨터 구동 시 고려되어야 하는 다양한 요소들을 다방면에서 효과적으로 오류검증/최적화/신뢰성검증 할 수 있다.

대규모 양자컴퓨팅 회로 시각화 환경에서 4단계 수준으로 양자알고리즘을 분석할 수 있기 때문에 알고리즘에 구성된 기능, 양자게이트, 모듈 등을 직관적으로 파악하여 분석하는 것이 가능하다.

추가적인 연구를 통해 양자게이트 및 양자컴퓨팅 구성을 위한 기능단위 시각화 이외에 큐비트의 구성 및 양자컴퓨팅 구성 시 고려되어야 하는 오류정보 등 다양한 정보들을 계층적으로 시각화 하여 효과적인 분석이 가능하도록 한다.

Acknowledgement

본 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(2019-0-00003, 결합허용 양자컴퓨팅 시스템 프로그래밍, 구동, 검증 및 구현을 위한 요소기술 개발). 또한, 본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “지역혁신클러스터육성사업(P0004797)”으로 수행된 연구결과입니다.

References

- [1] Feynman, Richard P. "Simulating physics with computers." *Int. J. Theor. Phys.* 21.6/7 (1982).
- [2] Nielsen, Michael A., and Isaac L. Chuang. "Quantum computation and quantum information." *Phys. Today* 54.2 (2001): 60.
- [3] Cross, Andrew. "The IBM Q experience and QISKit open-source quantum computing software." *APS 2018* (2018): L58-003.
- [4] "An Open High-Performance Simulator for Quantum Circuits". IBM. IBM Research Editorial Staff. May 1, 2018. Retrieved September 24, 2019.
- [5] Magee, Tamlim (August 24, 2018). "What is Qiskit, IBM's open source quantum computing framework". *Computerworld UK*. Retrieved 11 December 2018.
- [6] Valiron, Benoît, et al. "Programming the quantum future." *Communications of the ACM* 58.8 (2015): 52-61.
- [7] Green, Alexander S., et al. "Quipper: a scalable quantum programming language." *Proceedings of the 34th ACM SIGPLAN conference on Programming language design and implementation*. 2013.
- [8] Shor, Peter W. "Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring." *Proceedings 35th annual symposium on foundations of computer science*. Ieee, 1994.