

대규모 양자컴퓨팅 회로 3차원 시각화 기법

김주환¹ · 최병수² · 조동식^{3*}

3D Circuit Visualization for Large-Scale Quantum Computing

Juhwan Kim¹ · Byungsoo Choi² · Dongsik Jo^{3*}

¹Researcher, Marine Disaster Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan, 49111 Korea

²Chief Researcher, Quantum Computing Research Section, Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon, 34129 Korea

^{3*}Assistant Professor, School of IT Convergence, University of Ulsan, Ulsan, 44610 Korea

요 약

최근, 양자컴퓨터를 활용하기 위한 연구개발이 다양한 분야에서 활발하게 이루어지고 있다. 양자컴퓨터는 양자 얽힘, 양자중첩과 같은 다양한 양자역학의 현상과 특성을 활용하여 연산을 수행하기 때문에 기존 컴퓨팅 환경에 비해 아주 복잡한 연산과정을 거치게 된다. 이러한 양자컴퓨터를 구동하기 위해서는 연산에 활용되는 양자게이트의 구성뿐만 아니라 큐비트의 종류, 배치, 연결성 등 물리적인 양자컴퓨터의 요소를 반영한 알고리즘이 구성되어야 한다. 따라서 양자컴퓨터 구성요소들의 상호간 영향을 포함한 구성 정보를 직관적으로 파악할 수 있는 회로 시각화가 필요하다. 본 논문에서는 양자컴퓨터를 구성하는 양자칩 정보와 양자컴퓨팅 회로 데이터를 3D로 시각화하여 직관적으로 데이터를 관측하고 활용할 수 있도록 시각화 하여 직관적인 정보를 분석할 수 있는 방법을 제안한다.

ABSTRACT

Recently, researches for quantum computers have been carried out in various fields. Quantum computers performs calculations by utilizing various phenomena and characteristics of quantum mechanics such as quantum entanglement and quantum superposition, thus it is a very complex calculation process compared to classical computers used in the past. In order to simulate a quantum computer, many factors and parameters of a quantum computer need to be analyzed, for example, error verification, optimization, and reliability verification. Therefore, it is necessary to visualize circuits that can intuitively simulate the configuration of the quantum computer components. In this paper, we present a novel visualization method for designing complex quantum computer system, and attempt to create a 3D visualization toolkit to deploy large circuits, provide help a new way to design large-scale quantum computing systems that can be built into future computing systems.

키워드 : 양자 컴퓨팅, 양자 회로, 회로 시각화, 과학적 시각화, 회로 최적화

Keywords : Quantum computing, Quantum circuit, Circuit visualization, Scientific visualization, Circuit optimization

Received 30 June 2021, Revised 15 July 2021, Accepted 21 July 2021

* **Corresponding Author** Dongsik Jo(E-mail:dongsikjo@ulsan.ac.kr, Tel:+82-52-259-1647)
Assistant Professor, School of IT Convergence, University of Ulsan, Ulsan, 44610 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2021.25.8.1060>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

양자컴퓨터(Quantum Computer)는 전기적인 신호를 연산에 활용하는 고전컴퓨터(Classic Computer)와는 다르게 양자역학의 원리를 적용하여 연산할 수 있다는 개념이 제시되며 등장했다[1]. 특정 부분에서 고전컴퓨터에 비해 더욱 빠른 속도로 연산이 가능하다고 알려진 양자컴퓨터는 고전컴퓨터에서 사용되는 비트(Bit) 대신 양자역학적인 현상/특성을 활용할 수 있는 큐비트(Qubit, Quantum Bit)를 활용해 정보를 처리한다. 따라서 비트연산에서 사용되는 논리게이트(Logic Gate)와는 다르게 양자정보를 정의된 양자게이트(Quantum Gate)를 활용한다[2]. 양자컴퓨터는 양자얽힘(Quantum Entanglement)이나 양자중첩(Quantum Superposition)과 같은 다양한 양자역학적 현상/특성을 활용하여 복잡한 과정을 거쳐 연산을 진행하고, 이 때 실질적인 양자컴퓨터의 구동을 위해서는 양자게이트로 이루어진 양자 알고리즘의 구성뿐만 아니라 양자컴퓨터의 물리적인 큐비트의 종류, 배치, 연결성 등 다양한 요소들이 고려된 양자알고리즘이 구성되어야 한다. 양자컴퓨터를 구성하는 다양한 요소들이 양자 알고리즘의 연산과정과 결과에 영향을 끼치기 때문에 양자컴퓨터를 구동하기 위한 양자컴퓨팅 회로를 구성할 경우 알고리즘을 구성하는 양자게이트 뿐만 아니라 물리적인 양자컴퓨터의 구성, 더 나아가 양자오류정정과 제어 등 많은 요소들을 고려한 오류검증/최적화/신뢰성검증이 이루어져야 한다.

고전컴퓨터에 비해 양자컴퓨터는 특정 부분에서 우월한 연산성능을 보이는 것으로 양자 알고리즘들을 활용하여 유의미한 결과를 얻기 위해서는 많은 수의 큐비트가 필요하다[3, 4]. 즉, 양자컴퓨터를 구성하는 큐비트의 수가 선형적으로 증가할 경우 양자컴퓨터를 활용하여 처리할 수 있는 정보의 양은 지수적으로 증가하기 때문에 많은 수의 물리적인 큐비트를 사용할 수 있는 양자컴퓨터의 연구개발이 전 세계적으로 이루어지고 있다[5-7]. 이러한 양자컴퓨터의 양자회로를 구성하는 정보에 대한 오류검증/최적화/신뢰성 검증을 위해 양자회로의 구성 정보를 직관적으로 파악 할 필요가 있다. 또한, 실질적인 연산을 수행하는 양자게이트 뿐만 아니라 물리적으로 양자컴퓨터를 구성하는 큐비트의 개수, 종류, 배치, 연결성 등 다양한 요소들의 영향이 양자컴퓨팅의

연산과정 및 연산결과에 영향을 끼치며 상호간의 밀접한 영향을 끼치기 때문에 다양한 구성요소들을 복합적이며 직관적으로 파악할 수 있는 방법이 필요하다. 이러한 양자컴퓨터는 구성요소들의 상호간 영향을 고려한 오류검증, 최적화, 신뢰성 검증이 이루어져야만 실질적인 양자컴퓨팅 환경에 적용 가능한 양자회로를 구성할 수 있기 때문에 양자컴퓨터의 구성요소를 파악할 수 있는 직관적인 양자 회로 시각화 방법이 필요하다[8]. 이러한 양자컴퓨터를 구동하기 위해 필요한 양자회로 구성 시 양자게이트의 조합과 실제 연산 과정과 결과에 영향을 미치는 물리적인 양자컴퓨팅 구성요소를 복합적으로 고려한 정보를 직관적으로 분석하는 것은 어렵다[9]. 그러므로, 대규모 양자컴퓨팅 환경에서의 고차원 회로 시각화를 통해 보다 직관적인 환경에서 대규모 양자컴퓨팅 회로를 분석하여 실질적인 양자컴퓨팅을 구동하기 이전에 오류검증/최적화/신뢰성검증을 통해 대규모 양자컴퓨팅을 구성하는 양자회로를 보다 효율적으로 구성할 수 있도록 해야 할 필요가 있다.

본 논문에서는 대규모 양자컴퓨팅을 구성하는 양자회로를 보다 직관적으로 시각화하여 오류검증, 최적화, 신뢰성 검증을 보다 명확하게 파악하고 분석하기 위해 대규모 양자컴퓨팅을 위한 3차원 회로 시각화를 제안한다. 대규모 양자컴퓨팅 회로 시각화 환경에서는 다양한 정보를 동시에 시각화 할 경우 양자회로 구성에 필요한 정보를 직관적으로 파악할 수 없는 문제를 가지게 되므로 대규모 양자컴퓨팅의 3차원 회로 시각화 기법을 통해 많은 양과 다양한 데이터들 중 양자회로 구성에서 필요한 유의미한 정보들을 3차원으로 정렬하여 양자회로를 시각화하여 양자회로 정보를 직관적으로 파악할 수 있도록 본 논문에서는 제시하였다. 본 논문의 결과에 따르면 3차원으로 시각화된 양자회로 정보는 다양한 정보가 포함된 양자회로 중 선별적으로 원하는 정보를 시각화 할 수 있기 때문에 직관적인 양자회로 정보의 시각화가 가능하다. 또한, 기존의 대규모 양자컴퓨팅 회로 시각화 방법에서의 다양한 양자회로 정보를 복합적으로 고려한 양자회로 정보를 얻을 수 있는 문제를 해결하여 방대하고 다양한 정보를 다루는 대규모 양자컴퓨팅 환경에서 양자회로를 시각화하여 보다 효율적인 대규모 양자컴퓨팅 구성요소의 영향파악 및 분석이 가능하다는 장점이 있다.

II. 양자컴퓨팅 회로 시각화

양자컴퓨팅의 양자회로는 기본적으로 양자게이트의 구성으로 이루어져 있다. 양자컴퓨팅의 물리적인 큐비트를 정의된 양자게이트로 조작하기 위해 양자게이트의 조합으로 양자회로를 구성한다. 양자컴퓨터의 제어된 물리적인 큐비트를 어떠한 방식으로 구동시킬 것인지에 대한 정의를 양자게이트의 구성을 통해 구성하며 이를 양자알고리즘 이라고 한다. 양자알고리즘은 양자컴퓨터를 구성하는 물리적인 큐비트에 큐비트를 조작하기 위해 정의된 양자게이트를 구성하고 큐비트를 측정(Measurement)하는 일련의 과정을 설계하여 양자컴퓨터는 양자알고리즘을 통해 특정 문제에서의 연산 과정을 수행하고 결과를 도출하게 된다.

양자컴퓨팅의 구동을 위해 설계된 양자알고리즘에 대한 정보를 오류검증, 최적화, 신뢰성 검증하기 위해 양자회로를 시각화 할 필요가 있다. 제어된 큐비트에 양자게이트를 적용하여 각각의 큐비트 상태를 변화시켜 특정 문제에 대한 연산을 진행하는 양자알고리즘을 구성할 수 있지만, 효율적인 양자컴퓨터의 구동을 위해서는 양자회로에 대한 오류검증/최적화/신뢰성검증이 이루어지기 위해서는 양자회로에 대한 정보를 직관적으로 파악하기 위해 양자회로의 시각화가 필요하다.

```

...
H qbit3
CNOT qbit3,qbit0
T qbit0
Tdag qbit3
CNOT qbit1,qbit0
CNOT qbit1,qbit3
CNOT qbit2,qbit0
Tdag qbit0
T qbit3
CNOT qbit3,qbit0
H qbit3
H qbit3
CNOT qbit3,qbit0
Tdag qbit0
T qbit3
CNOT qbit2,qbit0
CNOT qbit2,qbit3
Tdag qbit0
T qbit3
...
    
```

Fig. 1 Text based representation of quantum gates for constructing quantum circuits

그림1은 양자회로에 구성되는 양자게이트를 텍스트 형태로 표현한 것이다. 텍스트로 표현된 양자게이트의 내용을 통해 특정 큐비트에 특정 양자게이트가 적용된 정보를 파악할 수 있다. 텍스트로 표현된 양자회로 정보를 통해 적용된 양자게이트의 종류와 양자게이트가 적용된 시점에 대한 정보는 파악이 가능하지만 직관적으로 양자회로에 구성된 정보를 파악하는 것은 어렵다. 따라서, 직관적인 가시화를 통한 회로 설계가 필요하다고 할 수 있다.

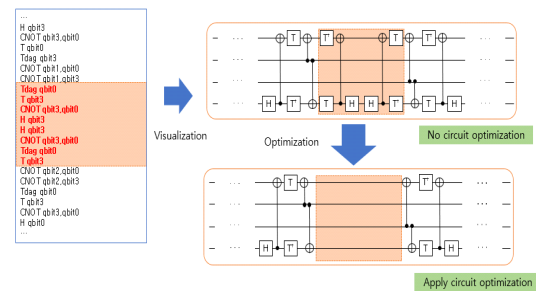


Fig. 2 Visualization and optimization of quantum circuits

그림2는 텍스트로 표현된 양자회로에 구성된 양자게이트를 시각화 한 후 양자회로 최적화를 진행한 것이다. 텍스트로 표현된 양자회로에 구성된 양자게이트의 조합은 양자회로 내부의 구성을 직관적으로 파악하기 어려운 문제를 가진다. 양자회로의 구성에서는 많은 양의 양자게이트가 사용되는데, 실질적인 양자컴퓨터의 구동시간을 줄이기 위해 양자알고리즘에서 사용되는 양자게이트의 개수를 줄이기 위한 양자회로 최적화는 매우 중요하다. 즉, 양자회로에 구성된 양자게이트는 양자컴퓨터의 연산을 위해 필요하지만, 불필요한 연산과정을 줄이는 최적화를 위해 사용된 양자게이트들 사이의 연관성을 직관적으로 파악하기 위한 방법이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 양자회로 3D시각화를 통해 양자회로에 구성된 복잡한 양자게이트들의 구성과 양자게이트 간의 연관성을 직관적으로 파악하고 보다 효과적인 양자회로에 대한 오류검증/최적화/신뢰성검증을 수행하였다.

III. 양자컴퓨팅 시각화 요구 사항 및 효과 분석

양자컴퓨팅 데이터의 시각화는 같은 데이터를 시각

화 하더라도 시각화된 데이터에서 원하는 정보를 보다 더 직관적으로 이해하고 파악할 수 있도록 시각화된 데이터들의 연결과 데이터 조합에 의한 정보의 직관적 파악을 효과적으로 하는데 목적이 있다. 양자컴퓨터의 실질적인 구동을 위해서는 양자컴퓨터를 구동하기 위해 양자게이트의 조합으로 구성된 양자회로 뿐만 아니라 양자컴퓨터에 구성된 물리적인 양자칩에서의 큐비트의 종류, 큐비트의 개수, 큐비트간의 물리적인 거리, 큐비트의 연결성 등 다양한 요소들이 고려된 양자회로가 구성되어야 한다. 기존의 양자컴퓨팅 회로 시각화 도구들은 양자게이트의 배치를 활용한 양자회로의 오류검증, 최적화, 신뢰성 검증은 가능하지만 물리적인 큐비트의 정보를 고려한 양자회로 최적화는 어렵다.

연산을 위한 양자게이트의 조합뿐만 아니라 큐비트의 종류, 큐비트의 개수, 큐비트간의 물리적인 거리, 큐비트의 연결성 등은 양자회로 구성에 직접적인 영향을 끼치기 때문에 구성요소들 간의 복합적인 정보들이 양자회로 구성 시 고려되어야 한다. 이를 위해 다양한 양자컴퓨팅 구성요소의 정보를 포함한 양자회로의 데이터 파악을 위해 양자회로 시각화를 통한 다양한 종류의 양자컴퓨팅 구성요소 정보를 포함한 직관적인 양자회로 정보 시각화 방법이 필요하다. 또한, 방대한 양의 양자게이트를 직관적으로 파악하기 위해 양자게이트를 최적화하여 양자게이트의 개수를 줄이는 방법 외에 전체적인 양자게이트를 직관적으로 파악할 수 있는 방법이 필요하다.

그림3은 각각의 큐비트마다 같은 시간상에서 수행될 수 있는 양자게이트를 같은 Y축에 배치한 것이다. 그림 3과 같은 양자회로 시각화를 통해 같은 시간상에서 수행되는 양자게이트에 대한 정보를 직관적으로 파악할 수 있다. 또한 동일한 시간상에서 수행될 수 있는 양자게이트를 같은 Y축으로 시각화함으로써 인해 기존의 양자컴퓨팅 회로 시각화 도구들 보다 많은 양의 양자게이트를 시각화 할 수 있고 실질적인 양자컴퓨터의 구동 시 시간순서대로 수행되는 양자게이트의 정보를 양자회로에서의 수행시간 관점에서의 정보를 보다 정확하고 직관적으로 파악할 수 있다. 그림에서 시각화된 양자회로 정보를 통해 양자컴퓨터의 구동 시 양자회로에 구성된 양자게이트의 시간관점에서의 수행 정보를 직관적으로 파악하는 것은 가능하지만 실질적인 양자컴퓨터의 구동 시 시간순서대로 수행되는 양자게이트에 대한 정보

를 중점으로 시각화를 진행했기 때문에 시각적으로 일부 양자게이트의 정보가 손실된 상황에서 양자회로 시각화가 진행됨을 보인다. 또한, 물리적인 양자칩의 구성 정보와 양자게이트의 수행 시점을 고려한 양자회로 시각화는 고전적인 2차원 양자회로 시각화 방법으로는 모든 정보를 표현하는 한계를 극복하는데 도움을 제공할 수 있다.

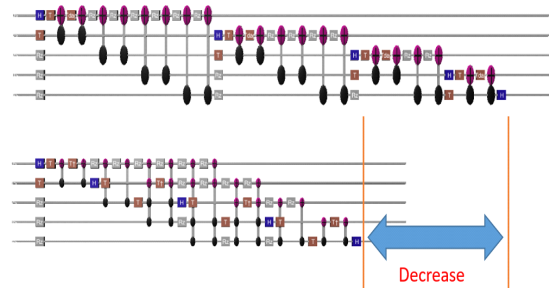


Fig. 3 Reduced circuit length through time optimization of quantum gates

IV. 대규모 양자컴퓨팅 회로의 3D 회로 시각화

대규모 양자컴퓨팅 환경은 보다 많은 양의 양자게이트와 큐비트를 가지는 양자컴퓨팅 환경을 의미한다. 대규모 양자컴퓨팅 환경의 양자회로 시각화 환경에서 기존의 양자회로 시각화보다 다양하고 많은 양자회로 정보를 직관적으로 시각화하여 양자회로를 보다 효과적으로 구성하기 위해 양자컴퓨팅 회로의 3차원 시각화 기법을 본 논문에서 제안한다. 대규모 양자컴퓨팅 회로에 대한 3차원 시각화 기법을 통해 기존의 양자회로 시각화 방법에서 보다 더욱 많은 양의 양자게이트와 큐비트를 시각화 할 수 있고 더 나아가 물리적인 양자컴퓨터의 큐비트 배치, 큐비트 개수, 큐비트 연결성, 큐비트간의 거리를 직관적으로 파악할 수 있는 양자컴퓨팅 회로 시각화 기법을 표현하였다. 또한, 양자컴퓨팅 회로에 대한 3차원 시각화를 통해 더욱 많은 종류의 양자컴퓨터의 구성정보를 포함한 양자회로 시각화가 가능하고, 같은 크기의 양자게이트를 시각화 하더라도 더욱 많은 개수의 양자게이트를 포함한 양자회로 시각화를 표현할 수 있다.

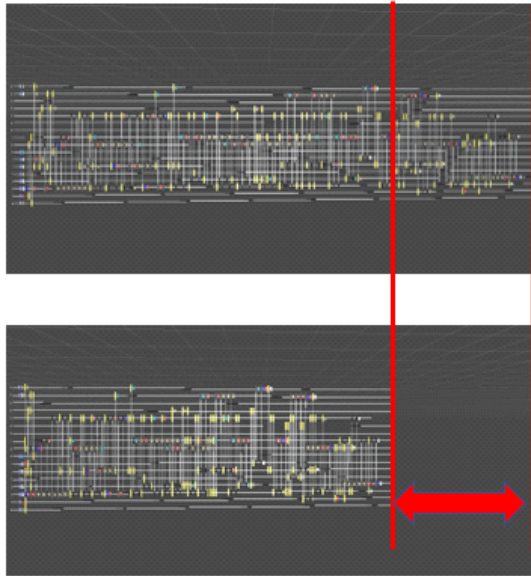


Fig. 4 Quantum gate visualization of large-scale quantum circuits

그림4는 양자게이트의 수행시간 관점에서 양자회로를 최적화 한 환경이다. 양자게이트의 수행시간 관점에서 양자회로를 최적화하였다. 하지만, 그림5와 같이 양

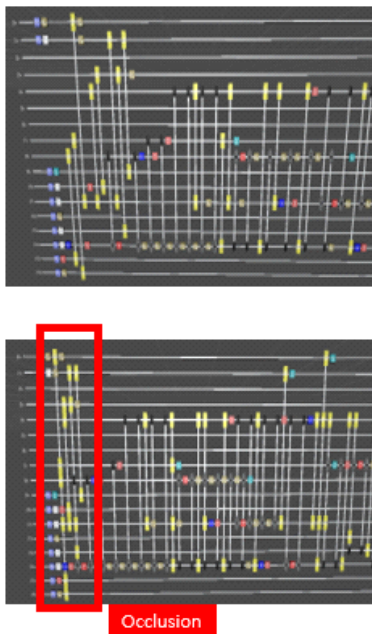


Fig. 5 Data occlusion problems in large-scale quantum computing circuits

자게이트 간의 겹침 현상이 발생하여 양자게이트를 파악할 수 없는 문제를 극복할 수 있는 방법이 추가적으로 필요하였다.

그림6은 물리적인 양자칩의 큐비트 배치, 큐비트 개수, 큐비트 연결성, 큐비트간의 거리 정보를 포함한 양자회로 시각화를 위해 3차원 양자회로 시각화를 최적화한 그림이다. 그림에서 표현된 바와 같이 3D 양자회로 시각화를 통해 물리적인 양자칩의 구성정보를 시각화하고 큐비트 배치, 큐비트 개수, 큐비트 연결성, 큐비트간의 거리를 고려한 양자회로 구성을 수행할 수 있도록 하였다.

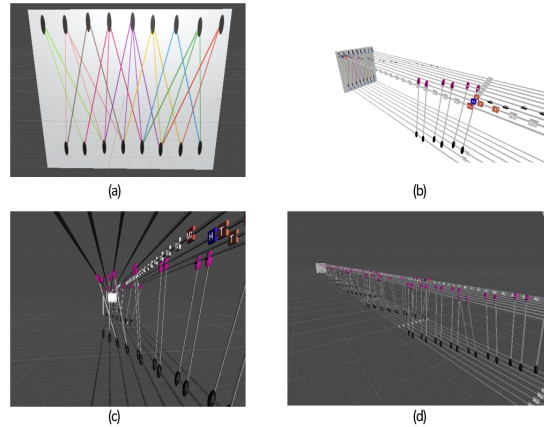


Fig. 6 Quantum circuit visualization reflecting virtual physical quantum chip information (a- 3D Quantum Chip Configuration Information, b,c,d - Quantum Chip-based 3D Quantum Circuit Visualization)

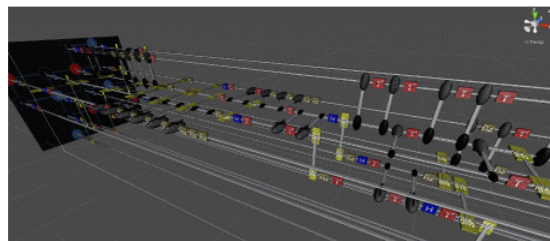


Fig. 7 3D visualization of large-scale quantum circuits visualized on the time axis

본 논문에서 구현된 그림7은 대규모 양자게이트를 양자 회로상에 시각화 한 상황에서도 실제 양자칩 구성 요소 정보를 반영하여 시각화를 제시하고 있다. 본 논문의 결과에 따르면 물리적인 양자칩의 정보 양자회로 내에서 직관적으로 파악됨과 동시에 양자게이트의 수행

시간 축으로 시각화를 진행하더라도 양자게이트의 정보가 손실되지 않고 시각화가 가능하다는 장점이 있다. 하지만, 본 논문의 방식은 양자컴퓨팅 회로에 대한 3D 시각화 방법에 대한 것으로 측정 기준에 대한 비교 대상이 없어서 이를 구체화할 필요가 있고, 이는 추후 연구로 수행할 예정이다.

Quantum Computing System) and This study was carried out with the support of 'R&D Program for Forest Science Technology (Project No. "2021410 B10-2125-0101)' provided by Korea Forest Service (Korea Forestry Promotion Institute).

V. 결 론

본 논문에서는 대규모 양자컴퓨팅 회로 시각화 환경에서 다양한 양자컴퓨팅 회로 구성요소들을 고려하여 효과적으로 양자회로의 오류검증, 최적화, 신뢰성 검증을 진행하기 위한 대규모 양자컴퓨팅 회로에 대한 3D 시각화 기법을 제안하였다. 대규모 양자컴퓨팅 회로에 대한 3D 시각화 기법을 통해 실질적인 양자컴퓨터의 구동을 위한 양자회로 구성 시 단순히 양자게이트의 조합과 최적화만으로 양자회로를 구성하는 것이 아닌 양자컴퓨터를 구성하는 양자칩의 비트 배치, 큐비트 개수, 큐비트 연결성, 큐비트간의 거리 정보를 포함한 양자회로의 오류검증, 최적화, 신뢰성 검증이 가능하도록 제안하였다. 그 결과 효과적인 양자회로 검증을 위한 다양한 양자컴퓨터 정보를 동시에 시각화 하더라도 직관적으로 양자회로 구성에 필요한 정보를 시각화 할 수가 있었다. 추후 각각의 양자게이트 시간정보와 양자 오류정정 등 더욱 많은 정보를 직관적으로 시각화 할 수 있는 대규모 양자컴퓨팅 환경에서도 회로 시각화를 수행할 수 있도록 구성하고자 한다. 또한, 본 논문에서 제시한 방법이 시각화한 정보를 바탕으로 양자 컴퓨팅 회로에 대한 오류를 파악하는데 얼마큼 도움이 되는지에 대한 정량적 평가 방법을 추후에 수행하고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was partly supported by Institute for Information & communications Technology Promotion (IITP) grant funded by the Korea government (MSIP) (No. 2019-0-00003, Research and Development of Core Technologies for Programming, Running, Implementing and Validating of Fault-Tolerant

REFERENCES

- [1] R. P. Feynman, "Simulating physics with computers," *Int. J.Theor. Phys.*, vol. 21, no. 6-7, pp. 467-488, Jun. 1982.
- [2] B. Sergey, D. Gosset, and R. Konig, "Quantum advantage with shallow circuits," *Science* 362.6412, pp. 308-311, 2018.
- [3] P. W. Shor, "Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring," in *Proc. Annu. Symp. Found. Comput. Sci.*, pp. 124-134, 1994.
- [4] B. Stephane, "Circuit for Shor's algorithm using $2n+ 3$ qubits," *Quantum Information and Computation*, vol. 3, no. 2, pp. 175-185, 2002.
- [5] F. Arute, K. Arya, R. Babbush, D. Bacon, J. C. Bardin, R. Barends, S. Boixo, F. G. S. L. Brandao, D. A. Buell, B. Burkett, Y. Chen, Z. Chen, R. Collins, W. Courtney, A. Dunsworth, E. Farhi, B. Foxen, A. Fowler, C. Gidney, M. Giustina, R. Graff, K. Guerin, S. Habegger, M. P. Harrigan, M. J. Hartmann, A. Ho, M. Hoffmann, T. Huang, S. V. Isakov, E. Jeffrey, Z. Jiang, D. Kafri, K. Kechedzhi, J. Kelly, P. V. Klimov, S. Knysh, A. Korotkov, F. Kostritsa, D. Landhuis, M. Lindmark, E. Lucero, J. R. McClean, A. Megrant, X. Mi, M. Mohseni, J. Mutus, O. Naaman, M. Neeley, C. Neill, M. Y. Niu, E. Ostby, A. Petukhov, J. C. Platt, C. Quintana, P. Roushan, N. C. Rubin, D. Sank, K. J. Satzinger, V. Smelyanskiy, K. J. Sung, M. D. Trevithick, A. Vainsencher, B. Villalonga, T. White, Z. J. Yao, P. Yeh, A. Zalcman, H. Neven, and J. M. Martinis, "Quantum supremacy using a programmable superconducting processor," *Nature*, 574, pp. 505-510. 2019.
- [6] Z. Y. Chen, Q. Zhou, C. Xue, X. Yang, G. C. Guo, and G. P. Guo, "64-qubit quantum circuit simulation," *Science Bulletin*, vol. 63, no. 15, pp. 964-971, 2018.
- [7] J. Kelly, "A preview of Bristlecone, Google's new quantum processor," *Google AI Blog*, 2018.
- [8] L. Rui and J. Chen, "Toward a deep understanding of what makes a scientific visualization memorable," *IEEE Scientific Visualization Conference (SciVis)*, 2018.

- [9] R. Prabhu and G. Varoquaux, "Mayavi: 3D visualization of scientific data," *Computing in Science & Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 40-51, 2011.



김주환(Juhwan Kim)

원광대학교 컴퓨터소프트웨어공학과 공학사
원광대학교 양자컴퓨터공학과 공학석사
한국해양과학기술원(KIOST) 연구원
※ 관심분야 : 양자컴퓨팅, 양자회로, 회로최적화, 과학적 시각화



최병수(Byungsoo Choi)

광주과학기술원 정보통신공학과 공학박사
한국전자통신연구원(ETRI) 선임연구원
한국전자통신연구원(ETRI) 양자컴퓨팅연구실장
※ 관심분야 : 양자컴퓨팅



조동식(Dongsik Jo)

고려대학교 컴퓨터학과 공학박사
한국전자통신연구원(ETRI) 선임연구원
울산대학교 IT융합학부 조교수
※ 관심분야 : VR/AR/MR, HCI, 과학적 가시화