(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0110290
(43) 공개일자 2024년07월15일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06N 10/70 (2022.01) *G06N 10/20* (2022.01)
G06N 10/60 (2022.01) *G06N 7/01* (2023.01)
B82Y 10/00 (2017.01)
(52) CPC특허분류
G06N 10/70 (2022.08)
G06N 10/20 (2022.01)
(21) 출원번호 10-2023-0002208
(22) 출원일자 2023년01월06일
심사청구일자 2023년01월06일

(71) 출원인
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(72) 발명자
신현동
경기도 수원시 영통구 청명로 132, 323동 501호(영통동, 벽산삼익아파트)
정해준
경기도 안양시 동안구 부림로 52, 505동 505호 (평촌동, 초원럭키아파트)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
김연권

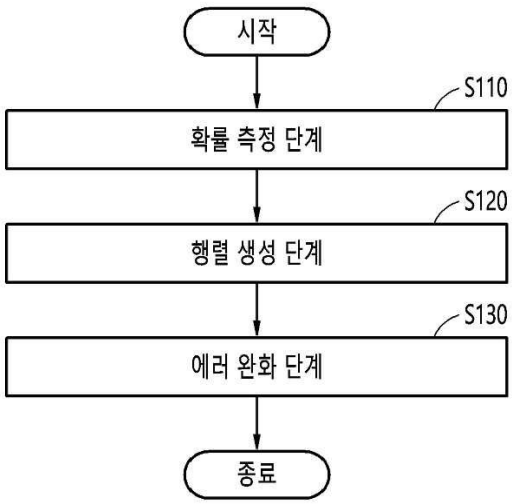
전체 청구항 수 : 총 16 항

(54) 발명의 명칭 **NISQ 계산을 위한 에러 완화 방법**

(57) 요 약

본 개시의 기술적 사상에 의한 일 양태에 따르면, 양자 회로를 시뮬레이터에서 실행한 제1 양자 상태 확률을 측정하고, 양자 회로를 양자 컴퓨터에서 실행한 제2 양자 상태 확률을 측정하는 확률 측정 단계, 제1 양자 상태 확률 및 제2 양자 상태 확률을 기초로 측정 에러 확률 행렬을 생성하는 행렬 생성 단계, 및 양자 회로를 양자 컴퓨터에서 실행한 제2 양자 상태 확률에 측정 에러 확률 행렬의 역행렬을 곱하여 에러가 완화된 양자 상태 확률을 획득하는 에러 완화 단계를 포함하는 에러 완화 방법이 개시된다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
G06N 10/60 (2022.01)
G06N 7/01 (2023.01)
B82Y 10/00 (2013.01)

(72) 발명자
최민석
경기도 용인시 기흥구 서그내로53번길 3-7, 402호
파커 자만
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 7321 경희대학교 국제캠퍼스 전자정보대학관 559호
시에드 무하마드 아부자르 리즈브
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 7321 경희대학교 국제캠퍼스 전자정보대학관 559호
압두라만 와치드 샤파르
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 7321 경희대학교 국제캠퍼스 전자정보대학관 559호
파델 하리츠 줄피카르
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 7321 경희대학교 국제캠퍼스 전자정보대학관 559호

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711172939
과제번호 2022R1A4A3033401
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 (혁신법) 기초연구실지원사업_개척형
연구과제명 [기초연구실_개척형] 무선-양자통신융합 기초연구실(1/3)
기 여 율 40/100
과제수행기관명 경희대학교 산학협력단
연구기간 2022.06.01 ~ 2025.02.28
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711155671
과제번호 2019R1A2C2007037
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 (혁신법)이공분야기초연구사업/중견연구자지원사업/(유형1-2)중견연구
연구과제명 [중견연구 유형1-2] 양자네트워킹 핵심기술 연구(4/5)
기 여 율 40/100
과제수행기관명 경희대학교 산학협력단
연구기간 2019.03.01 ~ 2024.02.29
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711152558
과제번호 2021-0-02046-002
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 정보통신기획평가원
연구사업명 (혁신법)정보통신방송혁신인재양성_2022
연구과제명 [정부] 2022 ITRC 6H 차세대 이동통신 기술 개발 (1단계 2차년도)(2/8)
기 여 율 20/100
과제수행기관명 경희대학교 산학협력단
연구기간 2021.07.01 ~ 2028.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

양자 회로를 시뮬레이터에서 실행한 제1 양자 상태 확률을 측정하고, 상기 양자 회로를 양자 컴퓨터에서 실행한 제2 양자 상태 확률을 측정하는 확률 측정 단계;

상기 제1 양자 상태 확률 및 상기 제2 양자 상태 확률을 기초로 측정 에러 확률 행렬을 생성하는 행렬 생성 단계; 및

상기 양자 회로를 상기 양자 컴퓨터에서 실행한 제2 양자 상태 확률에 상기 측정 에러 확률 행렬의 역행렬을 곱하여 에러가 완화된 양자 상태 확률을 획득하는 에러 완화 단계

를 포함하는 에러 완화 방법.

청구항 2

제1 항에 있어서,

상기 확률 측정 단계는,

상기 양자 회로를 상기 시뮬레이터에서 바닥 상태 및 여기 상태에서의 큐비트의 양자 확률을 측정하고, 상기 양자 회로를 상기 양자 컴퓨터에서 바닥 상태 및 여기 상태에서의 큐비트의 양자 확률을 측정하는 단계

를 더 포함하는, 에러 완화 방법.

청구항 3

제1 항에 있어서,

상기 에러 완화 방법은,

상기 양자 회로를 하나 이상의 양자 컴퓨터 및 상기 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대응하는 시뮬레이터에서 실행하여 양자 상태를 측정하는 측정 단계;

상기 양자 상태를 기초로 상기 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대한 충실도를 산출하는 충실도 산출 단계; 및

상기 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대한 충실도를 기초로 상기 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터를 선택하는 양자 컴퓨터 선택 단계

를 더 포함하는 에러 완화 방법.

청구항 4

제3 항에 있어서,

상기 측정 단계는,

상기 하나 이상의 양자 컴퓨터 및 상기 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대응하는 시뮬레이터에서 단일 큐비트 상태를 실행하고, 상기 하나 이상의 양자 컴퓨터에서 실행한 제1 결과 및 상기 시뮬레이터에서 실행한 제2 결과를 측정하는 단계; 및

상기 하나 이상의 양자 컴퓨터 및 상기 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대응하는 시뮬레이터에서 중첩 상태의 다중 큐비트를 실행하고, 상기 하나 이상의 양자 컴퓨터에서 실행한 제3 결과 및 상기 시뮬레이터에서 실행한 제4 결과를 측정하는 단계

를 더 포함하고,

상기 충실도 산출 단계는,

상기 제1 결과 및 상기 제2 결과 간의 제1 충실도를 산출하는 단계; 및

상기 제3 결과 및 상기 제4 결과 간의 제2 충실도를 산출하는 단계

를 더 포함하고,

상기 양자 컴퓨터 선택 단계는,

상기 제1 충실도 및 상기 제2 충실도를 기초로 상기 하나 이상의 양자 컴퓨터 중에서 상기 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터를 선택하는 단계

를 더 포함하는, 에러 완화 방법.

청구항 5

제3 항에 있어서,

상기 에러 완화 방법은,

상기 측정 단계 및 상기 충실도 산출 단계를 소정의 횟수 이상 실행하는 단계; 및

상기 충실도의 평균을 산출하는 단계;

를 더 포함하고,

상기 양자 컴퓨터 선택 단계는,

상기 충실도의 평균을 기초로 상기 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터를 선택하는 양자 컴퓨터 선택 단계

를 더 포함하는, 에러 완화 방법.

청구항 6

제3 항에 있어서,

상기 에러 완화 방법은,

상기 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터에서 한 세트의 큐비트로 큐비트 중첩 회로를 구성하고, 상기 큐비트 중첩 회로에 대한 양자 상태 확률을 측정하는 양자 상태 측정 단계; 및

상기 양자 상태 확률의 충실도를 산출하고, 상기 양자 상태 확률의 충실도를 기초로 최종 세트의 큐비트를 결정하는 큐비트 결정 단계

를 더 포함하는 에러 완화 방법.

청구항 7

제1 항에 있어서,

상기 양자 회로는 소규모(small-scale) 모듈러 컴퓨팅에 연결할 수 있도록 광섬유 네트워크를 사용하는 비잔틴 콘센서스 알고리즘(Byzantine consensus algorithm)을 이용하는, 에러 완화 방법.

청구항 8

제1 항에 있어서,

상기 양자 회로는 싱글렛-기반 콘센서스 알고리즘(Singlet-based consensus algorithm)을 이용하는, 에러 완화 방법.

청구항 9

양자 컴퓨팅 시스템을 동작시키기 위한 명령어를 저장하는 비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체로서,

상기 명령어는,

양자 회로를 시뮬레이터에서 실행한 제1 양자 상태 확률을 측정하고, 상기 양자 회로를 양자 컴퓨터에서 실행한

제2 양자 상태 확률을 측정하는 제1 코드 세그먼트;

상기 제1 양자 상태 확률 및 상기 제2 양자 상태 확률을 기초로 측정 에러 확률 행렬을 생성하는 제2 코드 세그먼트; 및

상기 양자 회로를 상기 양자 컴퓨터에서 실행한 제2 양자 상태 확률에 상기 측정 에러 확률 행렬의 역행렬을 곱하여 에러가 완화된 양자 상태 확률을 획득하는 제3 코드 세그먼트

를 포함하는 비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체.

청구항 10

제9 항에 있어서,

상기 제1 코드 세그먼트는,

상기 양자 회로를 상기 시뮬레이터에서 바닥 상태 및 여기 상태에서의 큐비트의 양자 확률을 측정하고, 상기 양자 회로를 상기 양자 컴퓨터에서 바닥 상태 및 여기 상태에서의 큐비트의 양자 확률을 측정하는,

비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체.

청구항 11

제9 항에 있어서,

상기 명령어는,

상기 양자 회로를 하나 이상의 양자 컴퓨터 및 상기 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대응하는 시뮬레이터에서 실행하여 양자 상태를 측정하는 제4 코드 세그먼트;

상기 양자 상태를 기초로 상기 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대한 충실도를 산출하는 제5 코드 세그먼트; 및

상기 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대한 충실도를 기초로 상기 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터를 선택하는 제6 코드 세그먼트

를 더 포함하는 비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체.

청구항 12

제11 항에 있어서,

상기 제4 코드 세그먼트는,

상기 하나 이상의 양자 컴퓨터 및 상기 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대응하는 시뮬레이터에서 단일 큐비트 상태를 실행하고, 상기 하나 이상의 양자 컴퓨터에서 실행한 제1 결과 및 상기 시뮬레이터에서 실행한 제2 결과를 측정하고,

상기 하나 이상의 양자 컴퓨터 및 상기 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대응하는 시뮬레이터에서 중첩 상태의 다중 큐비트를 실행하고, 상기 하나 이상의 양자 컴퓨터에서 실행한 제3 결과 및 상기 시뮬레이터에서 실행한 제4 결과를 측정하며,

상기 제5 코드 세그먼트는,

상기 제1 결과 및 상기 제2 결과 간의 제1 충실도를 산출하고,

상기 제3 결과 및 상기 제4 결과 간의 제2 충실도를 산출하며,

상기 제6 코드 세그먼트는,

상기 제1 충실도 및 상기 제2 충실도를 기초로 상기 하나 이상의 양자 컴퓨터 중에서 상기 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터를 선택하는,

비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체.

청구항 13

제11 항에 있어서,

상기 명령어는,

상기 제4 코드 세그먼트 및 상기 제5 코드 세그먼트를 소정의 횟수 이상 실행하여 상기 충실도의 평균을 산출하고,

상기 제6 코드 세그먼트는,

상기 충실도의 평균을 기초로 상기 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터를 선택하는,

비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체.

청구항 14

제11 항에 있어서,

상기 명령어는,

상기 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터에서 한 세트의 큐비트로 큐비트 중첩 회로를 구성하고, 상기 큐비트 중첩 회로에 대한 양자 상태 확률을 측정하는 제7 코드 세그먼트; 및

상기 양자 상태 확률의 충실도를 산출하고, 상기 양자 상태 확률의 충실도를 기초로 최종 세트의 큐비트를 결정하는 제8 코드 세그먼트

를 더 포함하는 비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체.

청구항 15

제9 항에 있어서,

상기 양자 회로는 소규모(small-scale) 모듈러 컴퓨팅에 연결할 수 있도록 광섬유 네트워크를 사용하는 비잔틴 콘센서스 알고리즘(Byzantine consensus algorithm)을 이용하는, 비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체.

청구항 16

제9 항에 있어서,

상기 양자 회로는 싱글렛-기반 콘센서스 알고리즘(Singlet-based consensus algorithm)을 이용하는, 비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 개시(disclosure)의 기술적 사상은 NISQ(Noisy Intermediate-Scale Quantum) 계산을 위한 에러 완화 방법 및 시스템에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 양자 컴퓨터의 개념은 물리학자 리처드 파인먼에 의해 제시되었다. 양자계 연구에서 상태 공간이 기하급수적으로 증가하기 때문에 이를 시뮬레이션하기 위하는 데에는 종래의 컴퓨터를 사용하기 어렵기 때문이다. 양자 컴퓨터는 물리학을 시뮬레이션하는 데 유용할 뿐만 아니라, 큰 합성 정수 분해, 검색 및 최적화와 같은 복잡한 계산에서도 종래의 컴퓨터를 능가한다.

[0003] 양자 얽힘(entanglement)과 양자 중첩(superposition)은 종래의 컴퓨터와 구별되는 양자의 두 가지 근본적인 현상이다. 이러한 특성은 고밀도 코딩(superdense coding), 양자 키 분배(quantum key distribution) 및 양자 전송(quantum teleportation)과 같은 양자 기술의 응용 분야에서 중요한 역할을 한다.

[0004] 현재, IBM은 자사 서비스인 IBM Quantum Experience를 사용하여 양자 컴퓨팅을 탐색할 수 있는 클라우드 기반 플랫폼을 제공한다. 2022년 4월 9일 기준으로, 20개 이상의 장치가 서비스 중이다. 7개의 장치는 일반인이 자유

롭게 사용할 수 있다. 이러한 장치는 불완전하며, 준비된 양자 상태는 이상적인 상태와 항상 다르다. 각 장치는 큐비트 간에 서로 다른 연결성을 가지고 있다. 2개의 큐비트 게이트 작업을 구현하기 전에 양자 장치의 아키텍처를 신중하게 고려해야 한다.

[0005] 서로 더 가까운 큐비트에 CNOT(controlled-NOT)을 구현하면 다른 연결 조합보다 게이트 오류가 적다. 니스크(noisy intermediate-scale quantum, NISQ)에서 양자 컴퓨터는 제한된 수의 큐비트를 가지며 최적의 성능을 제한하는 잡음이 많은 작업에 직면한다. 잡음의 일반적인 원천으로는 불완전한 제어 신호, 환경 간섭 및 큐비트 간의 바람직하지 않은 상호 작용이 있다. 에러 정정 방법을 사용할 수 있지만 필요한 큐비트 및 게이트 수에 상당한 오버헤드가 발생한다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 개시의 기술적 사상이 이루고자 하는 기술적 과제는, 양자 계산의 에러 를 줄이는 에러 완화 방법 및 시스템을 제공하는데 있다.

[0007] 본 개시의 기술적 사상이 이루고자 하는 다른 기술적 과제는, 소규모 클러스터에서 양자 컴퓨터를 활용할 수 있는 NISQ 계산을 위한 에러 완화 방법 및 시스템을 제공하는데 있다.

[0008] 본 개시의 기술적 사상이 이루고자 하는 또 다른 기술적 과제는, 양자 하드웨어 벤치마킹을 위한 도구를 제공하는 NISQ 계산을 위한 에러 완화 방법 및 시스템을 제공하는데 있다.

[0009] 본 개시의 기술적 사상에 따른 가 이루고자 하는 기술적 과제는 이상에서 언급한 과제로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 과제는 아래의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0011] 상기와 같은 목적을 달성하기 위하여, 본 개시의 기술적 사상에 의한 일 양태(aspect)에 따르면, 양자 회로를 시뮬레이터에서 실행한 제1 양자 상태 확률을 측정하고, 상기 양자 회로를 양자 컴퓨터에서 실행한 제2 양자 상태 확률을 측정하는 확률 측정 단계, 상기 제1 양자 상태 확률 및 상기 제2 양자 상태 확률을 기초로 측정 에러 확률 행렬을 생성하는 행렬 생성 단계, 및 양자 회로를 양자 컴퓨터에서 실행한 제2 양자 상태 확률에 측정 에러 확률 행렬의 역행렬을 곱하여 에러가 완화된 양자 상태 확률을 획득하는 에러 완화 단계를 포함하는 에러 완화 방법이 개시된다.

[0012] 예시적인 실시예에 따르면, 확률 측정 단계는, 양자 회로를 시뮬레이터에서 바닥 상태 및 여기 상태에서의 큐비트의 양자 확률을 측정하고, 양자 회로를 양자 컴퓨터에서 바닥 상태 및 여기 상태에서의 큐비트의 양자 확률을 측정하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0013] 예시적인 실시예에 따르면, 에러 완화 방법은, 양자 회로를 하나 이상의 양자 컴퓨터 및 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대응하는 시뮬레이터에서 실행하여 양자 상태를 측정하는 측정 단계, 양자 상태를 기초로 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대한 충실도를 산출하는 충실도 산출 단계, 및 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대한 충실도를 기초로 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터를 선택하는 양자 컴퓨터 선택 단계를 더 포함할 수 있다.

[0014] 예시적인 실시예에 따르면, 측정 단계는, 하나 이상의 양자 컴퓨터 및 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대응하는 시뮬레이터에서 단일 큐비트 상태를 실행하고, 하나 이상의 양자 컴퓨터에서 실행한 제1 결과 및 시뮬레이터에서 실행한 제2 결과를 측정하는 단계, 및 하나 이상의 양자 컴퓨터 및 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대응하는 시뮬레이터에서 중첩 상태의 다중 큐비트를 실행하고, 하나 이상의 양자 컴퓨터에서 실행한 제3 결과 및 시뮬레이터에서 실행한 제4 결과를 측정하는 단계를 더 포함하고, 충실도 산출 단계는, 제1 결과 및 제2 결과 간의 제1 충실도를 산출하는 단계; 및 제3 결과 및 제4 결과 간의 제2 충실도를 산출하는 단계를 더 포함하고, 양자 컴퓨터 선택 단계는, 제1 충실도 및 제2 충실도를 기초로 하나 이상의 양자 컴퓨터 중에서 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터를 선택하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0015] 예시적인 실시예에 따르면, 에러 완화 방법은, 측정 단계 및 충실도 산출 단계를 소정의 횟수 이상 실행하는 단계, 및 충실도의 평균을 산출하는 단계를 더 포함하고, 양자 컴퓨터 선택 단계는, 충실도의 평균을 기초로 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터를 선택하는 양자 컴퓨터 선택 단계를 더 포함할 수 있다.

[0016] 예시적인 실시예에 따르면, 에러 완화 방법은, 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터에서 한 세트의 큐비트로 큐비트 중첩 회로를 구성하고, 큐비트 중첩 회로에 대한 양자 상태 확률을 측정하는 양자 상태 측정 단계 및 양자 상태 확률의 충실도를 산출하고, 양자 상태 확률의 충실도를 기초로 최종 세트의 큐비트를 결정하는 큐비트 결정 단계를 더 포함할 수 있다.

[0017] 예시적인 실시예에 따르면, 양자 회로는 소규모(small-scale) 모듈러 컴퓨팅에 연결할 수 있도록 광섬유 네트워크를 사용하는 비잔틴 콘센서스 알고리즘(Byzantine consensus algorithm)을 이용할 수 있다.

[0018] 예시적인 실시예에 따르면, 양자 회로는 싱글렛-기반 콘센서스 알고리즘(Singlet-based consensus algorithm)을 이용할 수 있다.

[0019] 본 개시의 기술적 사상에 의한 다른 양태에 따르면, 양자 컴퓨팅 시스템을 동작시키기 위한 명령어를 저장하는 비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체로서, 명령어는, 양자 회로를 시뮬레이터에서 실행한 제1 양자 상태 확률을 측정하고, 양자 회로를 양자 컴퓨터에서 실행한 제2 양자 상태 확률을 측정하는 제1 코드 세그먼트; 제1 양자 상태 확률 및 제2 양자 상태 확률을 기초로 측정 에러 확률 행렬을 생성하는 제2 코드 세그먼트; 및 양자 회로를 양자 컴퓨터에서 실행한 제2 양자 상태 확률에 측정 에러 확률 행렬의 역행렬을 곱하여 에러가 완화된 양자 상태 확률을 획득하는 제3 코드 세그먼트를 포함하는 비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체가 개시된다.

[0020] 예시적인 실시예에 따르면, 제1 코드 세그먼트는, 양자 회로를 시뮬레이터에서 바닥 상태 및 여기 상태에서의 큐비트의 양자 확률을 측정하고, 양자 회로를 양자 컴퓨터에서 바닥 상태 및 여기 상태에서의 큐비트의 양자 확률을 측정할 수 있다.

[0021] 예시적인 실시예에 따르면, 명령어는, 양자 회로를 하나 이상의 양자 컴퓨터 및 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대응하는 시뮬레이터에서 실행하여 양자 상태를 측정하는 제4 코드 세그먼트, 양자 상태를 기초로 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대한 충실도를 산출하는 제5 코드 세그먼트, 및 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대한 충실도를 기초로 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터를 선택하는 제6 코드 세그먼트를 더 포함할 수 있다.

[0022] 예시적인 실시예에 따르면, 제4 코드 세그먼트는, 하나 이상의 양자 컴퓨터 및 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대응하는 시뮬레이터에서 단일 큐비트 상태를 실행하고, 하나 이상의 양자 컴퓨터에서 실행한 제1 결과 및 시뮬레이터에서 실행한 제2 결과를 측정하고, 하나 이상의 양자 컴퓨터 및 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대응하는 시뮬레이터에서 중첩 상태의 다중 큐비트를 실행하고, 하나 이상의 양자 컴퓨터에서 실행한 제3 결과 및 시뮬레이터에서 실행한 제4 결과를 측정하며, 제5 코드 세그먼트는, 제1 결과 및 제2 결과 간의 제1 충실도를 산출하고, 제3 결과 및 제4 결과 간의 제2 충실도를 산출하며, 제6 코드 세그먼트는, 제1 충실도 및 제2 충실도를 기초로 하나 이상의 양자 컴퓨터 중에서 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터를 선택할 수 있다.

[0023] 예시적인 실시예에 따르면, 명령어는, 제4 코드 세그먼트 및 제5 코드 세그먼트를 소정의 횟수 이상 실행하여 충실도의 평균을 산출하고, 제6 코드 세그먼트는, 충실도의 평균을 기초로 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터를 선택할 수 있다.

[0024] 예시적인 실시예에 따르면, 명령어는, 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터에서 한 세트의 큐비트로 큐비트 중첩 회로를 구성하고, 큐비트 중첩 회로에 대한 양자 상태 확률을 측정하는 제7 코드 세그먼트, 및 양자 상태 확률의 충실도를 산출하고, 양자 상태 확률의 충실도를 기초로 최종 세트의 큐비트를 결정하는 제8 코드 세그먼트를 더 포함할 수 있다.

[0025] 예시적인 실시예에 따르면, 양자 회로는 소규모(small-scale) 모듈러 컴퓨팅에 연결할 수 있도록 광섬유 네트워크를 사용하는 비잔틴 콘센서스 알고리즘을 이용할 수 있다.

[0026] 예시적인 실시예에 따르면, 양자 회로는 싱글렛-기반 콘센서스 알고리즘을 이용할 수 있다.

발명의 효과

[0027] 본 개시의 기술적 사상에 따른 에러 완화 방법은 NISQ(noisy intermediate scale quantum) 장치에 대한 계산을 개선하고, 양자 계산의 에러 를 저감시킬 수 있다.

[0028] 또한, 본 개시의 기술적 사상에 따른 에러 완화 방법은 소규모 클러스터에서 양자 컴퓨터를 활용할 수 있는 방법을 제공할 수 있다.

[0029] 본 개시의 기술적 사상에 따른 에러 완화 방법이 얻을 수 있는 효과는 이상에서 언급한 효과들로 제한되지 않으

며, 언급하지 않은 또 다른 효과들은 아래의 기재로부터 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

도면의 간단한 설명

[0030] 본 개시에서 인용되는 도면을 보다 충분히 이해하기 위하여 각 도면의 간단한 설명이 제공된다.

도 1은 본 개시의 일 실시예에 따른 에러 완화 방법의 흐름도이다.

도 2는 본 개시의 일 실시예에 따른 하나 이상의 양자 컴퓨터 및 시뮬레이터에서의 충실도를 계산하는 과정을 도시한다.

도 3은 본 개시의 일 실시예에 따른 단일 큐비트의 양자 중첩 생성에서의 하나 이상의 양자 컴퓨터의 충실도를 나타낸다.

도 4는 본 개시의 일 실시예에 따른 2 큐비트 얽힘 생성에서의 하나 이상의 양자 컴퓨터의 충실도를 나타낸다.

도 5는 본 개시의 일 실시예에 따른 양자 얽힘 상태의 양자 상태 충실도를 계산하는 과정을 도시한다.

도 6은 본 개시의 일 실시예에 따른 양자 회로에서의 한 쌍의 큐비트의 충실도를 나타낸다.

도 7은 본 개시의 일 실시예에 따른 측정 에러 확률 행렬을 생성하는 과정을 도시한다.

도 8은 본 개시의 일 실시예에 따른 에러 완화 방법이 적용된 충실도와 에러 완화 방법이 적용되지 않은 충실도를 도시한다.

도 9는 본 개시의 일 실시예에 따른 진폭 감쇠 파라미터에 대한 양자 콘센서스 알고리즘의 순도를 도시한다.

도 10은 본 개시의 일 실시예에 따른 진폭 감쇠 파라미터에 대한 양자 콘센서스 알고리즘의 충실도를 도시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0031] 본 개시의 기술적 사상에 따른 예시적인 실시예들은 당해 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 본 개시의 기술적 사상을 더욱 완전하게 설명하기 위하여 제공되는 것으로, 아래의 실시예들은 여러 가지 다른 형태로 변형될 수 있으며, 본 개시의 기술적 사상의 범위가 아래의 실시예들로 한정되는 것은 아니다. 오히려, 이들 실시예들은 본 개시를 더욱 충실하고 완전하게 하며 당업자에게 본 발명의 기술적 사상을 완전하게 전달하기 위하여 제공되는 것이다.

[0032] 본 개시에서 제1, 제2 등의 용어가 다양한 부재, 영역, 층들, 부위 및/또는 구성 요소들을 설명하기 위하여 사용되지만, 이들 부재, 부품, 영역, 층들, 부위 및/또는 구성 요소들은 이들 용어에 의해 한정되어서는 안 됨은 자명하다. 이들 용어는 특정 순서나 상하, 또는 우열을 의미하지 않으며, 하나의 부재, 영역, 부위, 또는 구성 요소를 다른 부재, 영역, 부위 또는 구성 요소와 구별하기 위하여만 사용된다. 따라서, 이하 상술할 제1 부재, 영역, 부위 또는 구성 요소는 본 개시의 기술적 사상의 가르침으로부터 벗어나지 않고서도 제2 부재, 영역, 부위 또는 구성 요소를 지칭할 수 있다. 예를 들면, 본 개시의 권리 범위로부터 이탈되지 않은 채 제1 구성 요소는 제2 구성 요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성 요소도 제1 구성 요소로 명명될 수 있다.

[0033] 달리 정의되지 않는 한, 여기에 사용되는 모든 용어들은 기술 용어와 과학 용어를 포함하여 본 개시의 개념이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 공통적으로 이해하고 있는 바와 동일한 의미를 지닌다. 또한, 통상적으로 사용되는, 사전에 정의된 바와 같은 용어들은 관련되는 기술의 맥락에서 이들이 의미하는 바와 일관되는 의미를 갖는 것으로 해석되어야 하며, 여기에 명시적으로 정의하지 않는 한 과도하게 형식적인 의미로 해석되어서는 아니 될 것이다.

[0034] 어떤 실시예가 달리 구현 가능한 경우에 특정한 공정 순서는 설명되는 순서와 다르게 수행될 수도 있다. 예를 들면, 연속하여 설명되는 두 공정이 실질적으로 동시에 수행될 수도 있고, 설명되는 순서와 반대의 순서로 수행될 수도 있다.

[0035] 첨부한 도면에 있어서, 예를 들면, 제조 기술 및/또는 공차에 따라, 도시된 형상의 변형들이 예상될 수 있다. 따라서, 본 개시의 기술적 사상에 의한 실시예들은 본 개시에 도시된 영역의 특정 형상에 제한된 것으로 해석되어서는 아니 되며, 예를 들면, 제조 과정에서 초래되는 형상의 변화를 포함하여야 한다. 도면 상의 동일한 구성 요소에 대해서는 동일한 참조부호를 사용하고, 이들에 대한 중복된 설명은 생략한다.

[0036] 여기에서 사용된 '및/또는' 용어는 언급된 부재들의 각각 및 하나 이상의 모든 조합을 포함한다.

[0037] 이하에서는 첨부한 도면들을 참조하여 본 개시의 기술적 사상에 의한 실시예들에 대해 상세히 설명한다.

[0039] 도 1은 본 개시의 일 실시예에 따른 에러 완화 방법의 흐름도이다.

[0040] 본 개시의 일 실시예에 따른 에러 완화 방법은, 양자 회로를 시뮬레이터에서 실행한 제1 양자 상태 확률을 측정하고, 양자 회로를 양자 컴퓨터에서 실행한 제2 양자 상태 확률을 측정하는 확률 측정 단계(S110), 제1 양자 상태 확률 및 제2 양자 상태 확률을 기초로 측정 에러 확률 행렬을 생성하는 행렬 생성 단계(S120), 및 양자 회로를 양자 컴퓨터에서 실행한 제2 양자 상태 확률에 측정 에러 확률 행렬의 역행렬을 곱하여 에러가 완화된 양자 상태 확률을 획득하는 에러 완화 단계(S130)를 포함하는 에러 완화 방법이 개시된다.

[0041] 양자 컴퓨팅은 양자 이론의 한 분야로, 종래의 컴퓨터와 달리 양자 컴퓨터는 0 및 1 상태의 큐비트(양자 비트)를 사용한다. 양자 중첩(superposition)에 해당하는, 여러 상태를 동시에 수행하는 양자 입자의 특징이 양자 컴퓨터의 작동에 중요한 역할을 한다. 값이 0 또는 1를 가지는 비트로 구동되는 종래의 컴퓨터와 달리 양자 컴퓨터는 양자 비트, 즉, 큐비트에서 동작하며, 큐비트는 두 값을 동시에 유지할 수 있다.

[0042] 구체적으로, 큐비트는 양자 중첩 상태인 상태 $|0\rangle$와 상태 $|1\rangle$를 모두 가질 수 있는 상태 $|\psi\rangle$를 나타낸다. 각 큐비트의 두 가지 논리적 상태는 $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ 로 나타낼 수 있으며, 여기서 α 및 β는 확률 진폭이고, 놈 제곱 합(norm square sums up)이 1이 되는 복소수이다.

[0043] 양자 컴퓨터는 큐비트의 특성을 이용하므로 큰 합성 정수 분해, 검색 및 최적화와 같은 복잡한 계산 작업에 유용하다. 특히, 양자 중첩(superposition)과 얽힘(entanglement)은 종래의 컴퓨터와 구별되는 양자의 근본적인 특징으로, 초고밀도 코딩, 양자 키 분배 및 양자 전송과 같은 응용에 중요한 역할을 한다.

[0044] 양자 얽힘은 두 입자가 공간적으로 분리되어 있음에도 불구하고 두 입자의 양자 상태를 독립적으로 설명할 수 없는 양자의 물리적 현상이다. 수학적으로, $|\psi_{12}\rangle \neq |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle$ 과 같이 두 상태의 텐서 곱으로 나타낼 수 없다면 상태가 얽힌 것이다.

[0045] 양자 컴퓨팅 연구에 대한 관심이 높아지며 기업 간의 양자 컴퓨터 개발 경쟁이 치열해지고 있다. 기업에서 공개된 양자 시스템의 예로, IBM 양자 시스템이 있다. 현재 IBM은 22개의 양자 컴퓨팅 시스템을 운영하고 있다. 양자 컴퓨터를 활용하기 위해서는 어떤 양자 시스템이 가장 높은 정밀도를 가지는 양자 회로를 실행하는지 이해해야 한다. 특히, 가장 단순한 회로에 대한 양자 시스템의 성능을 파악할 필요가 있다.

[0046] 본 개시에서는 단일 큐비트의 중첩 상태(superposition state)와 2개의 큐비트 간의 얽힘(entanglement)에 대한 회로를 이용하여 양자 시스템을 평가한다. 대부분의 양자 컴퓨팅 알고리즘을 실행하는 데 필수적인 두 가지의 상태를 활용하므로 다양한 양자 시스템의 성능을 비교하여 파악할 수 있다.

[0047] 양자 회로는 양자 컴퓨터의 동작을 시뮬레이션할 수 있는 양자 컴퓨팅 모델이다. 양자 회로는 여러 양자 논리 게이트(또는 양자 게이트)로 구성되며 양자 알고리즘을 기반으로 동작한다. 양자 게이트는 큐비트에 대한 2차 단일 연산자 행렬을 나타낸다. 양자 회로는 아다마르(Hadamard)와 CNOT 게이트를 포함할 수 있다.

[0048] 본 개시의 충실도(fidelity)는 아래와 같이 2개의 양자 상태 간의 거리를 측정한다.

[0049] $$F(\rho,\sigma) \equiv \mathrm{tr}\sqrt{\sqrt{\rho}\sigma\sqrt{\rho}},$$

[0050] 여기서, ρ 및 σ는 임의의 양자 상태 $|\psi_\rho\rangle$ 및 $|\psi_\sigma\rangle$에 대한 밀도 행렬(density matrix)이며, ρ=σ인 경우 F(ρ,σ)는 1, 즉, $|\psi_\rho\rangle = |\psi_\sigma\rangle$ 이며, $|\psi_\rho\rangle$ 및 $|\psi_\sigma\rangle$이 수직(orthogonal)인 경우 0이다.

[0051] 나아가, 헬링거 거리(Hellinger distance)는 두 카운트의 분포 간의 유사성을 정량화하는 메트릭이다. 불연속

확률 분포 P = (p1, ..., pk) 및 Q = (q1, ..., qk)에 대한 헬링거 거리는 아래와 같다.

[0052] $$H(P,Q) = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\sum_{i=1}^{k}(\sqrt{p_i} - \sqrt{q_i})^2}$$

[0053] $$F(\rho_1, \rho_2) = 1 - H^2(P,Q) = \sum_{i=1}^{k}\sqrt{p_i q_i}.$$

[0054] 도 2는 본 개시의 일 실시예에 따른 하나 이상의 양자 컴퓨터 및 시뮬레이터에서의 충실도를 계산하는 과정을 도시한다.

[0055] 일 실시예에 따르면, 에러 완화 방법은, 양자 회로를 하나 이상의 양자 컴퓨터 및 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대응하는 시뮬레이터에서 실행하여 양자 상태를 측정하는 측정 단계, 양자 상태를 기초로 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대한 충실도를 산출하는 충실도 산출 단계, 및 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대한 충실도를 기초로 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터를 선택하는 양자 컴퓨터 선택 단계를 더 포함할 수 있다.

[0056] 본 개시의 일 실시예에 따르면, 중첩 및 얽힘 상태를 생성하는 회로를 하나 이상의 양자 컴퓨터에서 실행할 수 있다. 예컨대, 중첩 및 얽힘 상태를 생성하는 회로는 ibmq_belem, ibmq_santiago, ibmq_manila 및 ibmq_quito에서 실행할 수 있다.

[0057] 일 실시예에 따르면, 먼저 단일 큐비트 상태를 준비하고 측정 단계에서 하나 이상의 양자 컴퓨터 및 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대응하는 시뮬레이터에서 단일 큐비트 상태를 실행하고, 하나 이상의 양자 컴퓨터에서 실행한 제1 결과 및 시뮬레이터에서 실행한 제2 결과를 측정할 수 있다. 그리고 중첩 상태의 큐비트를 준비하고, 하나 이상의 양자 컴퓨터 및 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대응하는 시뮬레이터에서 중첩 상태의 다중 큐비트를 실행하고, 하나 이상의 양자 컴퓨터에서 실행한 제3 결과 및 시뮬레이터에서 실행한 제4 결과를 측정할 수 있다. 그리고 충실도 산출 단계에서, 제1 결과 및 제2 결과 간의 제1 충실도를 산출하고, 제3 결과 및 제4 결과 간의 제2 충실도를 산출할 수 있다. 이 경우, 양자 컴퓨터 선택 단계에서는, 제1 충실도 및 제2 충실도를 기초로 하나 이상의 양자 컴퓨터 중에서 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터를 선택할 수 있다.

[0058] 일 실시예에 따르면, 본 개시의 에러 완화 방법은, 측정 단계 및 충실도 산출 단계를 소정의 횟수 이상 실행하고, 소정의 횟수로 실행되어 계산된 충실도의 평균을 산출할 수 있다. 이 경우, 양자 컴퓨터 선택 단계에서, 충실도의 평균을 기초로 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터를 선택할 수 있다.

[0059] 본 개시의 에러 완화 방법은, 예컨대, 측정 단계 및 충실도 산출 단계를 최소 100번 반복하여 각 양자 컴퓨터에서의 이상적인 양자 상태에 대한 결과값의 평균 충실도를 산출할 수 있다.

[0060] 도 3은 본 개시의 일 실시예에 따른 단일 큐비트의 양자 중첩 생성에서의 하나 이상의 양자 컴퓨터의 충실도를 나타낸다. 그리고 도 4는 본 개시의 일 실시예에 따른 2 큐비트 얽힘 생성에서의 하나 이상의 양자 컴퓨터의 충실도를 나타낸다.

[0061] 도 3 및 도 4에 도시된 바와 같이, 본 개시의 방법이 실행한 도 3 및 도 4의 양자 시스템은 ibmq_belem(B), ibmq_santiago(S), ibmq_manila(M) 및 ibmq_quito(Q)이며, 그 중, ibmq_santiago는 가장 높은 충실도를 가지고 있다. 이와 달리, ibmq_manila는 도 3 및 도 4의 시나리오에 대해 가장 낮은 충실도를 가진다. 도 3에서 ibmq_santiago의 충실도는 0.9933이다. 이는 중첩 생성기 회로가 실행될 때 ibmq_santiago에 의해 생성된 상태가 이상적인 중첩 상태에 가깝다는 것을 나타낸다. 반면, ibmq_maila는 도 3 및 도 4에 도시된 양자 시스템 중 가장 낮은 충실도(0.9383)를 가진다. 도 3 및 도 4에서 알 수 있듯이 ibmq_quito 및 ibmq_belem은 ibmq_santiago 및 ibmq_maila 사이에 위치한다.

[0062] 도 4에서는 ibmq_santiago의 충실도는 0.9512로 감소하였으나, 여전히 다른 양자 시스템보다 높다. 반면, 0.7369로 상당히 감소된 ibmq_maila는 얽힘 동작을 실행할 때 성능이 저하되었음을 나타낸다.

[0063] 이를 통해 여러 다양한 양자 회로 및 알고리즘을 실행할 때 사용하기 적합한 양자 시스템을 선택할 수 있다.

[0064] 도 5는 본 개시의 일 실시예에 따른 양자 얽힘 상태의 양자 상태 충실도를 계산하는 과정을 도시한다.

[0065] 일 실시예에 따르면, 본 개시의 에러 완화 방법은, 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터에서 한 세트의 큐비트로 큐비트 중첩 회로를 구성하고, 큐비트 중첩 회로에 대한 양자 상태 확률을 측정하는 양자 상태 측정 단계 및 양자 상태 확률의 충실도를 산출하고, 양자 상태 확률의 충실도를 기초로 최종 세트의 큐비트를 결정하는 큐비트 결정 단계를 더 포함할 수 있다.

[0066] 현재 공개되어 있는 양자 시스템은 불완전하며, 준비된 양자 상태는 이상적인 상태와 다르다. 이에 따라 각 양자 컴퓨터는 큐비트 간에 서로 다른 연결성을 가지고 있다. 따라서 임의의 2개의 큐비트 게이트 동작을 실행하기 전에 양자 컴퓨터의 아키텍처를 고려해야 한다. 서로 더 가까운 큐비트에 대해 CNOT를 실행하는 것이 다른 연결 조합에 대해 실행하는 것보다 게이트 오류가 적다.

[0067] NISQ(Noisy Intermediate-Scale Quantum)에서 양자 컴퓨터는 제한된 수의 큐비트를 가지며 최적의 성능을 제한하는 잡음에 직면한다. 잡음의 일반적인 원천으로는 제어 신호, 환경 간섭 및 큐비트 간의 바람직하지 않은 상호작용이 있다. 에러 정정 방법을 사용할 수 있으나, 이는 필요한 게이트와 큐비트 수에 상당한 오버헤드가 발생한다. 따라서 본 개시는 고충실도의 얽힘 상태를 생성하는 양자 컴퓨터의 큐비트 연결성을 제공할 수 있는 방법을 제안한다.

[0068] 본 개시에서, 양자 회로를 구성하고 양자 회로를 양자 컴퓨터의 시뮬레이터를 이용하여 실행한다. 일 예시로, 양자 회로는 하나의 아다마르 게이트

$$\boldsymbol{H} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

[0069]

[0070] 와 하나의 CNOT 게이트

$$\boldsymbol{C}_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

[0071]

[0072] 로 구성될 수 있다.

[0073] 아마다르 게이트를 첫 번째 큐비트에 적용하고, CNOT 게이트를 첫 번째 큐비트에 제어 큐비트로, 두 번째 큐비트를 타깃 큐비트로 적용한다. 이에 따른 양자 상태는

$$|\psi\rangle = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$$

[0074]

[0075] 이다.

[0076] 그리고 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터에서 구성할 수 있는 한 세트의 큐비트의 모든 변형에 대해 양자 상태 확률을 측정하고, 양자 상태 확률의 충실도를 산출할 수 있다. 각 세트의 큐비트의 충실도를 기초로 최적의 성능을 제공하는 큐비트 세트를 결정할 수 있다.

[0077] 일 실시예에서, 각 회로에 대해서 소정의 횟수 이상 실행하고, 예컨대, 각 회로에 대해 최소 10번 이상 실행하고(540), 이상적인 양자 상태와 비교하여 헬링거 충실도 값을 평균화할 수 있다.

[0078] 도 6은 본 개시의 일 실시예에 따른 양자 회로에서의 한 쌍의 큐비트의 충실도를 나타낸다. 도 6에 도시된 바와 같이 5개의 큐비트가 있을 때, 한 쌍의 큐비트로 구성할 수 있는 모든 조합에 대해 본 개시의 방법을 실행하여 헬링거 충실도 값을 산출할 수 있다. 도 6을 참조하면, 큐비트 3과 큐비트 4를 사용할 때 가장 높은 충실도를 얻었으며, 큐비트 0과 큐비트 1을 사용할 때 가장 낮은 충실도를 얻었다. 즉, 큐비트 0과 큐비트 1로 구성된 경우에는 헬링거 충실도 값이 0.84로, 다른 세트의 큐비트의 범위 0.94~0.95보다 낮다. 도 6에 도시된 모든 충실

도의 평균은 0.9342이다.

[0079] 양자 정보 어플리케이션을 위해서는 취적의 큐비트를 선택하는 것이 중요하다. 본 개시의 방법을 따르면, 양자 컴퓨터에서 가능한 모든 조합의 큐비트의 각 세트에 대해 얽힘 상태의 충실도를 평가하고 해당 양자 컴퓨터에서의 최적의 세트의 큐비트를 탐색할 수 있으므로, 우수한 양자 성능을 확보할 수 있다.

[0080] 도 7은 본 개시의 일 실시예에 따른 측정 에러 확률 행렬을 생성하는 과정을 도시한다.

[0081] 본 개시의 에러 완화 방법은, 양자 회로를 시뮬레이터에서 실행한 제1 양자 상태 확률을 측정하고, 양자 회로를 양자 컴퓨터에서 실행한 제2 양자 상태 확률을 측정할 수 있다. 그리고 제1 양자 상태 확률 및 제2 양자 상태 확률을 기초로 측정 에러 확률 행렬을 생성할 수 있다. 그 후, 양자 회로를 양자 컴퓨터에서 실행한 제2 양자 상태 확률에 측정 에러 확률 행렬의 역행렬을 곱하여 에러가 완화된 양자 상태 확률을 획득할 수 있다.

[0082] 일 실시예에 따르면, 확률 측정 단계는, 양자 회로를 시뮬레이터에서 바닥 상태 및 여기 상태에서의 큐비트의 양자 확률을 측정하고, 양자 회로를 양자 컴퓨터에서 바닥 상태 및 여기 상태에서의 큐비트의 양자 확률을 측정하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0083] 양자 컴퓨터의 온전한 성능은 잡음(noise)을 격리하고 에러를 제거해야 달성될 수 있다. 양자 컴퓨터에서의 잡음(noise)로 인해 양자 에러 완화 및 양자 에러 정정을 통해 내결함성 양자 컴퓨팅의 목표를 달성하고자 한다. 에러 정정 중 하나는 양자 에러 정정 코드가 있으며, 이는 디코히어런스(decoherence) 또는 다른 형태의 잡음과 같은 에러로부터 양자 정보를 보호할 수 있으나, 추가 큐비트를 필요로 한다. 다른 방법으로는 원하는 결과를 얻기 위해 시스템을 조작하는 양자 제어가 있다. 이 두 가지 방법은 모두 복잡하고 자원 집약적이다. 이 외에도, 양자 컴퓨터에서 얻은 결과에 대해 간단한 오류 완화를 수행하여 추가 리소스를 사용하지 않고 이를 개선할 수 있다. 본 개시에서는 에러 확률 행렬을 이용하는 측정 에러 완화 기법을 제시한다. 이는 후처리를 통해 에러를 완화하고 충실도를 향상시킬 수 있다.

[0084] 양자 하드웨어에서 잡음과 에러로는, 하나 이상의 큐비트를 가지는 시스템의 경우 큐티트 간의 여러 크로스토크, 예컨대, 잔류 큐비트 간 결합(residual inter-qubit coupling)으로 인해 발생할 수 있다. 이는 양자 컴퓨터의 성능 저하로 이어진다. 디코히어런스도 이러한 성능 손실을 유발하는 또 다른 현상이다. 완벽하게 격리된 양자 시스템을 구성하기 어렵기 때문에 외부 환경과 큐비트 간의 불가피한 결합으로 인해 디코히어런스가 발생할 수 있다.

[0085] 이러한 에러를 완화하기 위해, 본 개시의 방법에서는 임의의 하나 이상의 큐비트의 준비된 상태와 측정된 상태 간의 에러를 측정할 수 있다. 구체적으로, 양자 회로를 시뮬레이터에서 실행한 제1 양자 상태 확률을 측정하고, 양자 회로를 양자 컴퓨터에서 실행한 제2 양자 상태 확률을 측정할 수 있다. 일 예시로, 단일 큐비트인 경우, 먼저 큐비트를 바닥 상태 |0>로 준비하고 측정할 수 있다. 이는 출력에서 0과 1의 확률을 제공한다. 이와 유사하게, X 게이트를 적용하여 큐비트를 여기 상태 |1로 만들어 측정할 수 있다. 이와 같은 방식으로 적용하여 준비된 상태와 측정된 상태의 확률을 Pi,j로 나타낼 수 있다. 여기서 i는 준비된 상태를 나타내며, j는 측정된 상태를 나타낸다. 이러한 확률을 이용하여 측정 에러 확률 행렬을 아래와 같이 구성할 수 있다.

[0086]
$$M = \begin{bmatrix} P_{0,0} & P_{0,1} \\ P_{1,0} & P_{1,1} \end{bmatrix}$$

[0087] 일반적으로, 2n 개의 가능 상태 준비 및 상태 측정 결과가 있을 것이며, 이를 이용하여 $2^n \times 2^n$ 의 측정 에러 확률 행렬 M을 아래와 같이 도출해낼 수 있다. 여기서 n은 큐비트의 개수이다.

$$M = \begin{bmatrix} P_{0,0} & P_{0,1} & \cdots & P_{0,2^n-1} \\ P_{1,0} & P_{1,1} & \cdots & P_{1,2^n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{2^n-1,0} & P_{2^n-1,1} & \cdots & P_{2^n-1,2^n-1} \end{bmatrix}$$

[0088]

[0089] 측정 잡음이 존재할 때 상태 $|\psi\rangle_{\text{noisy}}$ 는 아래와 같이 측정 에러 확률 행렬을 적용하여 얻을 수 있다.

$$|\psi\rangle_{\text{noisy}} = M\,|\psi\rangle_{\text{ideal}}$$

[0090]

[0091] 측정 에러 확률 행렬 M의 역행렬과 곱셈을 이용하여 아래와 같이 $|\psi\rangle_{\text{noisy}}$ 상태를 $|\psi\rangle$이상적 상태에 가깝게 변환할 수 있다.

$$|\psi\rangle_{\text{ideal}} = M^{-1}\,|\psi\rangle_{\text{noisy}}$$

[0092]

[0093] 따라서 양자 계산의 출력에 측정 에러 확률 행렬 M의 역행렬을 곱하여 측정 에러 완화를 수행하고 양자 계산의 결과를 개선할 수 있다.

[0094] 도 8은 본 개시의 일 실시예에 따른 에러 완화 방법이 적용된 충실도와 에러 완화 방법이 적용되지 않은 충실도를 도시한다. 본 개시의 에러 완화 기법의 효율성을 확인하기 위해 4개의 회로를 생성하고 아래와 같은 상태를 준비한다.

i. 2-qubit Bell state: $|\psi\rangle_2 = (|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$
ii. 3-qubit GHZ state: $|\psi\rangle_3 = (|000\rangle + |111\rangle)/\sqrt{2}$
iii. 4-qubit GHZ state: $|\psi\rangle_4 = (|0000\rangle + |1111\rangle)/\sqrt{2}$
iv. 5-qubit GHZ state: $|\psi\rangle_5 = (|00000\rangle + |11111\rangle)/\sqrt{2}$

[0095]

[0096] 먼저, 이 회로는 시뮬레이터에서 실행되어 잡음 없는 이상적인 결과를 얻는다. 이 결과는 본 개시의 에러 완화 방법의 성능을 비교하는 기준이 될 수 있다. 그 다음 위의 4개의 회로를 양자 컴퓨터 상에서 실행한다. 예컨대, 7개의 큐비르 장치인 IBM ibmq_jakarta 양자 컴퓨터를 이용할 수 있다. 실제 하드웨어로부터의 결과는 에러를 가지고 있으며, 시뮬레이터에서 본 결과와는 다르다. 측정 오류를 완화하기 위해, 에러 확률 행렬을 구성할 수 있다. 2-큐비트 에러 완화의 경우, 모든 가능한 기본 상태, $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$ 및 $|11\rangle$를 만들기 위해 4개의 서로 다른 양자 회로를 구성할 수 있다. 이러한 회로는 식별(identity) 게이트와 X 게이트를 이용하여 구성될 수 있다. 이 회로는 양자 컴퓨터에서 실행 되고, 준비된 상태와 측정된 상태 확률이 계산되어 측정 에러 확률 행렬 M을 구성할 수 있으며, 이 때 행렬은 2-큐비트 회로의 경우 차원 4x4이다. 동일한 과정이 3-큐비트, 4-큐비트 및 5-큐비트에 대해 각각 8차, 16차, 및 32차인 기본 상태를 생성하는 회로를 구성하고 실행할 수 있다.

[0097] 본 개시의 에러 완화 방법을 적용한 후, 상태의 충실도를 계산할 수 있다. 일 예시로, 두 양자 상태가 얼마나 가까운지를 보여주는 헬링거 충실도를 에러 완화 성능을 판단하기 위한 기준으로 사용할 수 있다. 충실도가 1에 가까울수록 준비된 상태에 가깝다는 것이다. 도 8에 도시된 바와 같이, 본 개시의 에러 완화 방법을 이용하면 결과가 개선되고 상태의 충실도가 향상된 것을 알 수 있다. 따라서, 본 개시의 에러 완화 법은 후처리 기법을 이용하여 잡음이 있는 양자 장치의 결과를 개선할 수 있다.

[0098] 도 9 및 도 10은 본 개시의 일 실시예에 따른 진폭 감쇠 파라미터에 대한 양자 콘센서스 알고리즘의 순도 및 충실도를 도시한다. 일 실시예에 따르면, 양자 회로는 소규모(small-scale) 모듈러 컴퓨팅에 연결할 수 있도록 광섬유 네트워크를 사용하는 비잔틴 콘센서스 알고리즘(Byzantine consensus algorithm)을 이용할 수 있다. 일 실시예에 따르면, 양자 회로는 싱글렛-기반 콘센서스 알고리즘(Singlet-based consensus algorithm)을 이용할 수

있다.

[0099] 동기화, 조정 작업, 암호 프로토콜(secret sharing)과 같은 콘센서스 알고리즘은 분산 컴퓨팅 및 통신 시스템의 중추를 형성한다. 이는 분산 노드가 특정 값 또는 결정에 동의하기 위한 것이다. 일 실시예에서, 비잔틴 어그리먼트(Byzantine agreement, BA)는 네트워크에서 악의적 노드를 견딜 수 있는 콘센서스 알고리즘을 형성한다. BA에서, 네트워크의 무결한 당사자 간의 콘센서스는 최대 1/3의 악의적인 당사자를 견딜 수 있다. BA를 달성하기 위해 당사자들은 비공개 상관 목록(private correlated list)을 공유한 후 네트워크 전체 브로드캐스팅에 사용된다. BA는 공유된 목록이 비공개이고 상관 관계가 있으며(correlated) 올바른 경우에만 달성할 수 있다. 따라서 네트워크에서 개인 목록을 공유하는 문제는 BA 합의의 핵심이다.

[0100] 얽힘 및 코히어런스(coherence)와 같은 양자 자원은 최근 BA 합의에 사용되어 내결함성 측면에서 종래의 컴퓨터를 능가한다. 본 개시에서는 큐비트 기반 BA의 다중 큐비트 버전과 분산된 싱글렛 상태를 이용한다. 본 개시에서는 광섬유 노이즈가 이러한 기법의 성능에 미치는 영향을 평가한다. 구체적으로, 채널을 통한 진폭 감쇠 잡음에서 이러한 양자 상태의 순도 및 충실도 손실을 고려한다. 본 개시의 방법을 이용하면 싱글렛 기반 기법이 단일 노이즈 광섬유 세그먼트에 대한 다중 큐비트 알고리즘보다 성능이 우수함을 알 수 있다.

[0101] 구체적으로, 큐디트(qudit) 기반 BA 기법은 단일 K 차원 큐디트를 활용한다.

[0102] $$|\xi\rangle = \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{k=0}^{K-1} |k\rangle$$

[0103] 여기서 차원의 수는 이 기법에 관련된 당사자의 수에 대응한다. 송신자는큐디트를 준비한 다음 각 참여 노드로 송신한다. 각 노드는 큐디트에 로컬 인코딩을 적용한다. 마지막 당사자는 프라이빗 선택을 인코딩한 후 큐디트를 측정한다. 그런 다음 네트워크 노드는 종래의 통신을 활용하여 프라이빗 선택이 상관되는지 확인한다. 이 기법의 다중 큐비트 버전은 노드에서 잡음이 많은 중간 규모 양자(NISQ) 프로세서가 있는 양자 네트워크에 더 실용적이다.

[0104] 양자 프로세서를 연결하는 광섬유 채널 상의 양자 잡음과 관련하여, 양자 입자는 양자 콘센서스 기법 모두에 대해 광섬유 링크를 통해 송신되므로, 디코히어런스(decoherence)의 대상이 된다. 광섬유에 대한 진폭 감쇠 잡음은 바닥 상태 |0를 변경하지 않으면서 여기 상태 |1의 진폭을 감소시킨다. 진폭 감쇠 잡음에 대한 Karus 연산자는 아래와 같다.

[0105] $$A_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \sqrt{1-\eta} \end{pmatrix}, \qquad A_1 = \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{\eta} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

[0106] 도 9 및 도 10은 채널에 단일 진폭 감쇠 광섬유 세그먼트가 있는 경우 공유 양자 상태의 순도와 충실도 저하를 나타낸다. 각 큐비트가 잡음이 많은 광섬유 부분을 통과하는 반면 공유 싱글렛의 하나의 큐비트만 잡음의 영향을 받기 때문에 다중 큐비트의 경우 결과가 더 두드러진다. 그러나 싱글렛은 일반적으로 다중 큐비트의 경우보다 입자 손실에 더 취약하다.

[0107] 일반적으로 두 양자 콘센서스 알고리즘 모두 노이즈가 증가함에 따라 순도와 충실도가 저하되나, 싱글렛 기반 콘센서스 알고리즘은 하나의 큐비트만 단일 광섬유 세그먼트를 통과하기 때문에 더 나은 견고성을 제공한다. 나아가, 본 개시에서, 광섬유의 길이를 제어할 수 있고 그에 따른 성능 저하를 제어할 수 있는 가까운 범위의 소규모 모듈식 컴퓨팅 장치에서 양자 콘센서스 기법을 사용할 수 있다.

[0108] 다른 양태로, 본 개시는 양자 컴퓨팅 시스템을 동작시키기 위한 명령어를 저장하는 비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체를 제공할 수 있다. 여기서 명령어는, 양자 회로를 시뮬레이터에서 실행한 제1 양자 상태 확률을 측정하고, 양자 회로를 양자 컴퓨터에서 실행한 제2 양자 상태 확률을 측정하는 제1 코드 세그먼트, 제1 양자 상태 확률 및 제2 양자 상태 확률을 기초로 측정 에러 확률 행렬을 생성하는 제2 코드 세그먼트, 및 양자 회로를 양자 컴퓨터에서 실행한 제2 양자 상태 확률에 측정 에러 확률 행렬의 역행렬을 곱하여 에러가 완화된 양자 상태 확률을 획득하는 제3 코드 세그먼트를 포함할 수 있다.

[0109] 본 개시에서 에러 확률 행렬을 이용하는 측정 에러 완화 기법은 후처리를 통해 에러를 완화하고 충실도를 향상시킬 수 있다.

[0110] 일 실시예에 따르면, 제1 코드 세그먼트는, 양자 회로를 시뮬레이터에서 바닥 상태 및 여기 상태에서의 큐비트의 양자 확률을 측정하고, 양자 회로를 양자 컴퓨터에서 바닥 상태 및 여기 상태에서의 큐비트의 양자 확률을 측정할 수 있다.

[0111] 일 실시예에 따르면, 명령어는, 양자 회로를 하나 이상의 양자 컴퓨터 및 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대응하는 시뮬레이터에서 실행하여 양자 상태를 측정하는 제4 코드 세그먼트, 양자 상태를 기초로 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대한 충실도를 산출하는 제5 코드 세그먼트, 및 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대한 충실도를 기초로 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터를 선택하는 제6 코드 세그먼트를 더 포함할 수 있다. 이를 통해 여러 다양한 양자 회로 및 알고리즘을 실행할 때 사용하기 적합한 양자 시스템을 선택할 수 있다.

[0112] 일 실시예에 따르면, 제4 코드 세그먼트는, 하나 이상의 양자 컴퓨터 및 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대응하는 시뮬레이터에서 단일 큐비트 상태를 실행하고, 하나 이상의 양자 컴퓨터에서 실행한 제1 결과 및 시뮬레이터에서 실행한 제2 결과를 측정하고, 하나 이상의 양자 컴퓨터 및 하나 이상의 양자 컴퓨터에 대응하는 시뮬레이터에서 중첩 상태의 다중 큐비트를 실행하고, 하나 이상의 양자 컴퓨터에서 실행한 제3 결과 및 시뮬레이터에서 실행한 제4 결과를 측정하며, 제5 코드 세그먼트는, 제1 결과 및 제2 결과 간의 제1 충실도를 산출하고, 제3 결과 및 제4 결과 간의 제2 충실도를 산출하며, 제6 코드 세그먼트는, 제1 충실도 및 제2 충실도를 기초로 하나 이상의 양자 컴퓨터 중에서 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터를 선택할 수 있다.

[0113] 일 실시예에 따르면, 명령어는, 제4 코드 세그먼트 및 제5 코드 세그먼트를 소정의 횟수 이상 실행하여 충실도의 평균을 산출하고, 제6 코드 세그먼트는, 충실도의 평균을 기초로 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터를 선택할 수 있다.

[0114] 일 실시예에 따르면, 명령어는, 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터에서 한 세트의 큐비트로 큐비트 중첩 회로를 구성하고, 큐비트 중첩 회로에 대한 양자 상태 확률을 측정하는 제7 코드 세그먼트, 및 양자 상태 확률의 충실도를 산출하고, 양자 상태 확률의 충실도를 기초로 최종 세트의 큐비트를 결정하는 제8 코드 세그먼트를 더 포함할 수 있다. 다시 말해, 양자 회로를 실행할 양자 컴퓨터에서 구성할 수 있는 한 세트의 큐비트의 모든 변형에 대해 양자 상태 확률을 측정하고, 양자 상태 확률의 충실도를 산출할 수 있다. 각 세트의 큐비트의 충실도를 기초로 최적의 성능을 제공하는 큐비트 세트를 결정할 수 있다.

[0115] 양자 정보 어플리케이션을 위해서는 취적의 큐비트를 선택하는 것이 중요하다. 본 개시의 비일시적 컴퓨터 판독 가능 매체에 따르면, 양자 컴퓨터에서 가능한 모든 조합의 큐비트의 각 세트에 대해 얽힘 상태의 충실도를 평가하고 해당 양자 컴퓨터에서의 최적의 세트의 큐비트를 탐색할 수 있으므로, 우수한 양자 성능을 확보할 수 있다.

[0116] 일 실시예에 따르면, 양자 회로는 소규모 모듈러 컴퓨팅에 연결할 수 있도록 광섬유 네트워크를 사용하는 비잔틴 콘센서스 알고리즘을 이용할 수 있다.

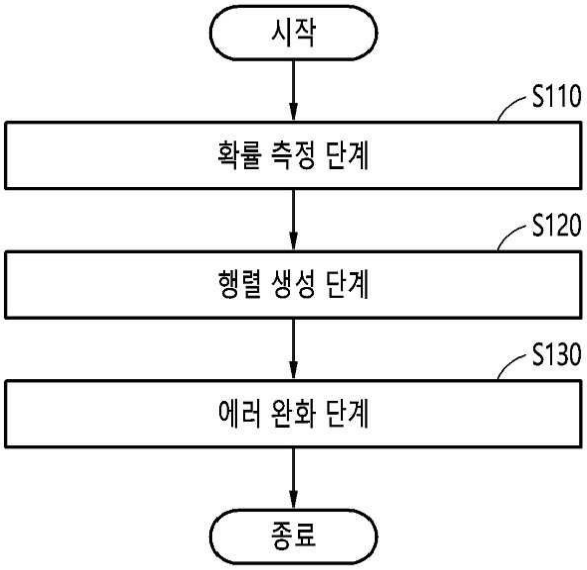
[0117] 일 실시예에 따르면, 양자 회로는 싱글렛-기반 콘센서스 알고리즘을 이용할 수 있다.

[0119] 상기한 실시예들의 설명은 본 개시의 더욱 철저한 이해를 위하여 도면을 참조로 예를 든 것들에 불과하므로, 본 개시의 기술적 사상을 한정하는 의미로 해석되어서는 안될 것이다.

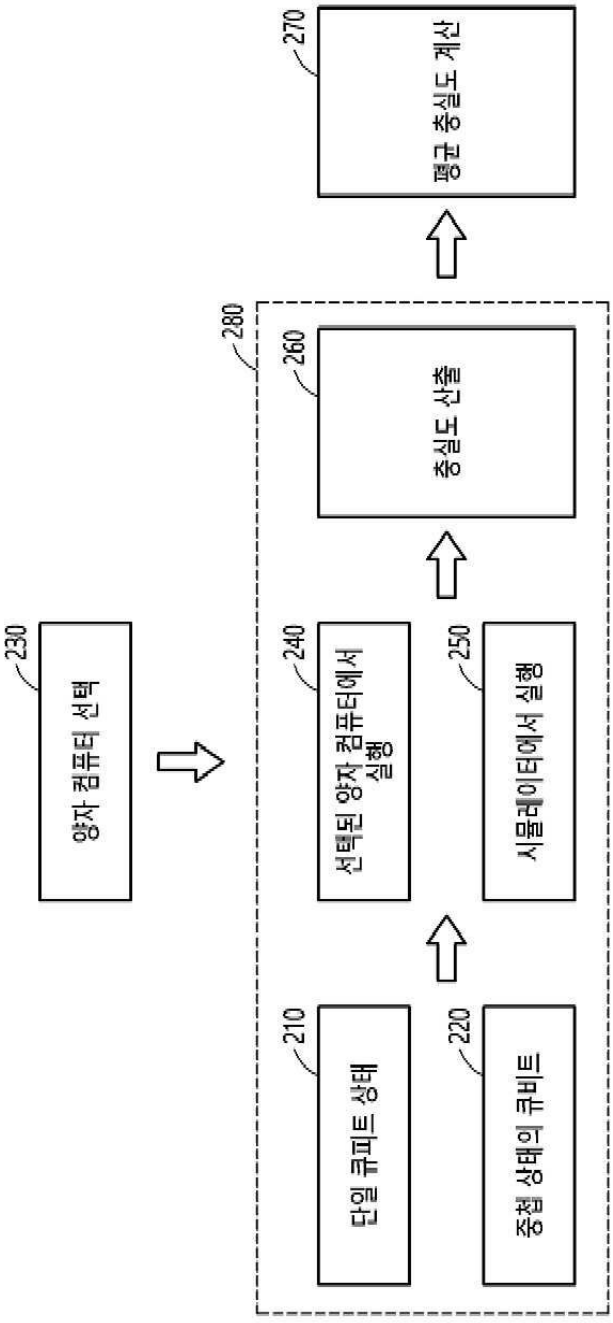
[0120] 또한, 본 개시가 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 있어 본 개시의 기본적 원리를 벗어나지 않는 범위 내에서 다양한 변화와 변경이 가능함은 명백하다 할 것이다.

도면

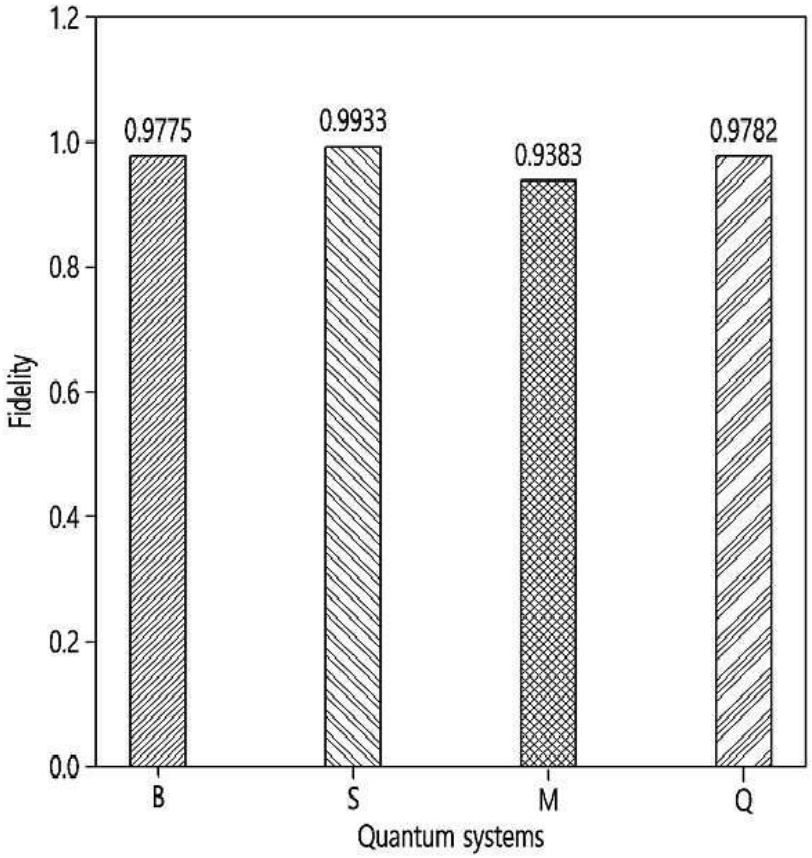
도면1



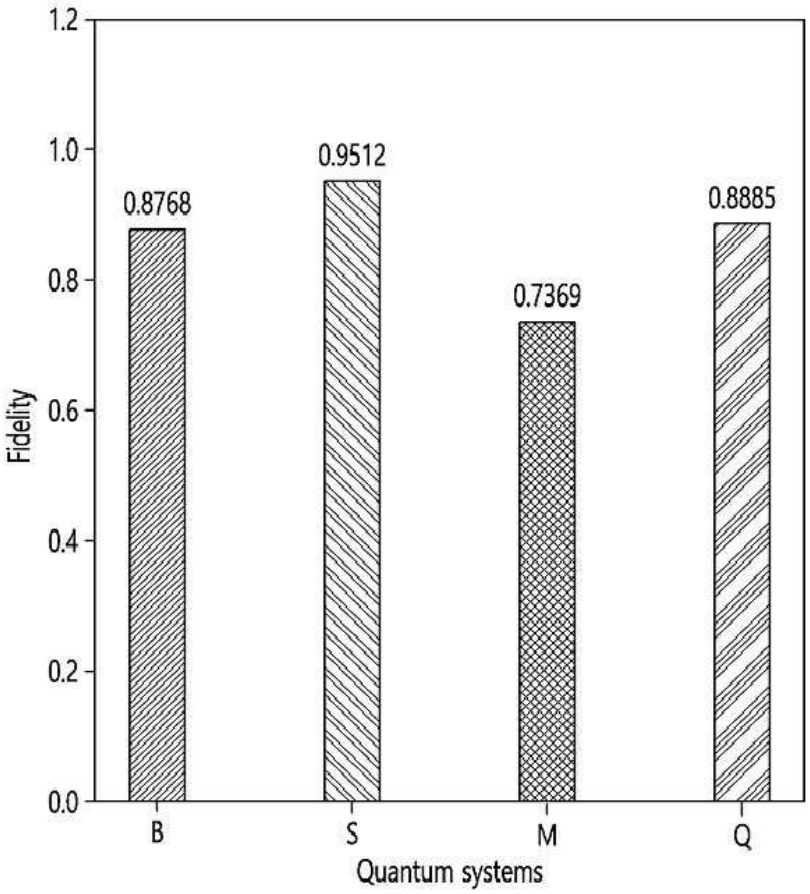
도면2


270
평균 충실도 계산
280
260
충실도 산출
230
양자 컴퓨터 선택
240
선택된 양자 컴퓨터에서 실행
250
시뮬레이터에서 실행
210
단일 큐피트 상태
220
중첩 상태의 큐비트

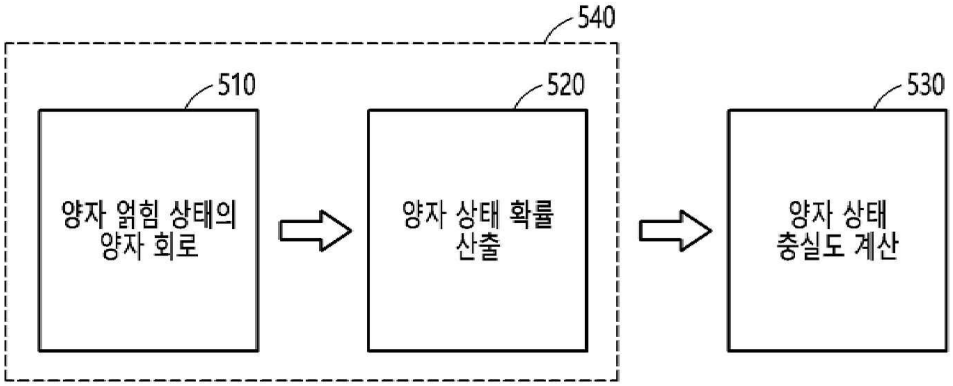
도면3


1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
Fidelity
0.9775
0.9933
0.9383
0.9782
B
S
M
Q
Quantum systems

도면4


1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
Fidelity
0.8768
0.9512
0.7369
0.8885
B
S
M
Q
Quantum systems

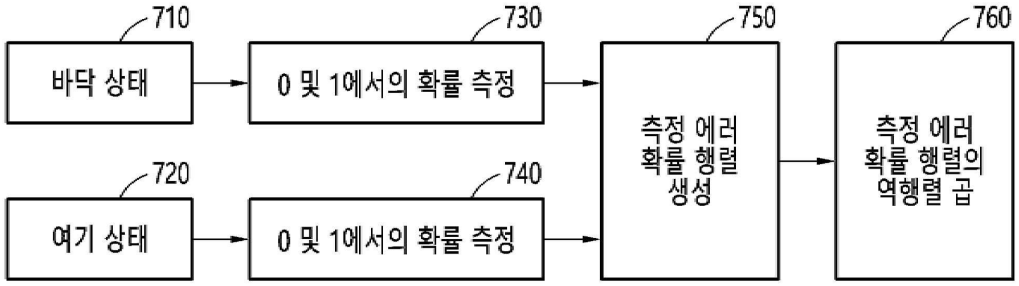
도면5


540
510
520
530
양자 얽힘 상태의 양자 회로
양자 상태 확률 산출
양자 상태 충실도 계산

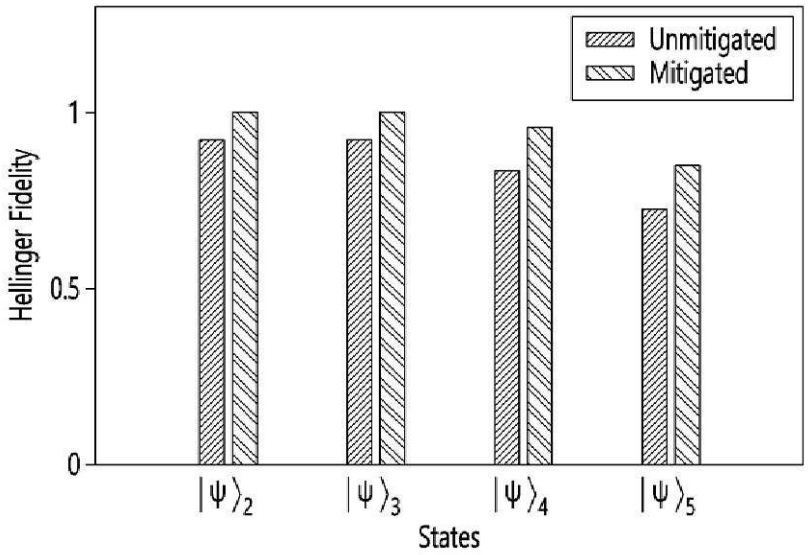
도면6

No.	Qubit Pairs		Hellinger Fidelity
1	0	1	0.8389
2	0	2	0.9463
3	0	3	0.9433
4	0	4	0.9397
5	1	2	0.9431
6	1	3	0.9480
7	1	4	0.9422
8	2	3	0.9455
9	2	4	0.9441
10	3	4	0.9510

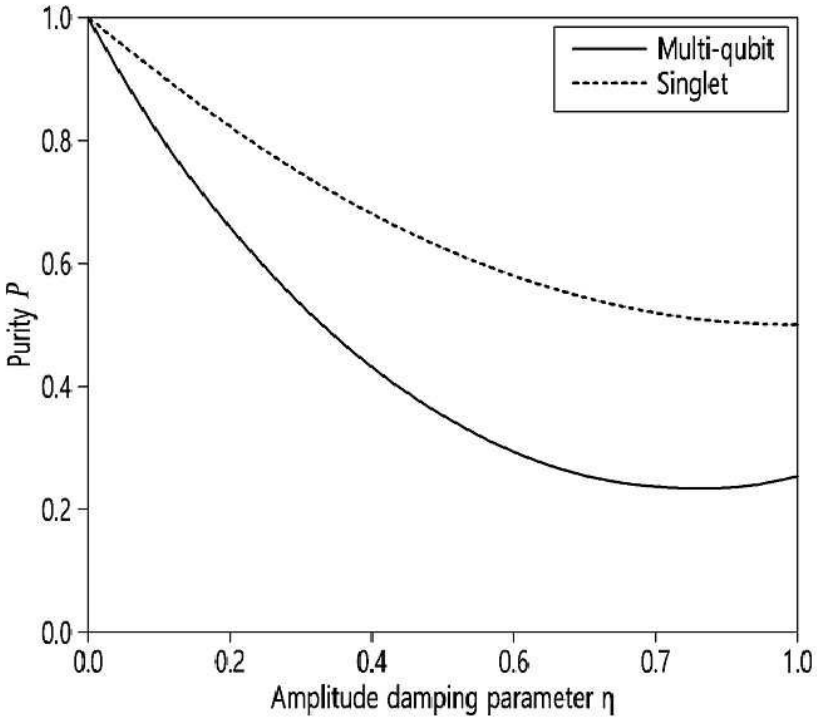
도면7



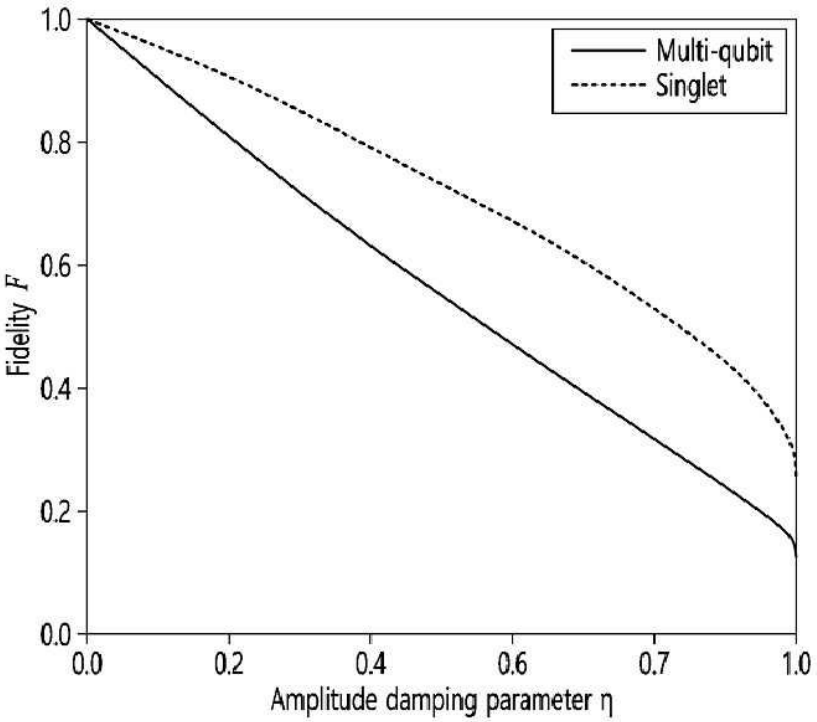
도면8



도면9


Multi-qubit
Singlet
Purity P
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0.0
0.2
0.4
0.6
0.7
1.0
Amplitude damping parameter η

도면10


Multi-qubit
Singlet
Fidelity F
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0.0
0.2
0.4
0.6
0.7
1.0
Amplitude damping parameter η