



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0072003
(43) 공개일자 2025년05월23일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06N 10/70 (2022.01) G06N 10/20 (2022.01)
B82Y 10/00 (2017.01)
(52) CPC특허분류
G06N 10/70 (2025.05)
G06N 10/20 (2025.05)
(21) 출원번호 10-2023-0158507
(22) 출원일자 2023년11월15일
심사청구일자 2023년11월15일

(71) 출원인
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(72) 발명자
신현동
경기도 수원시 영통구 청명로 132, 323동 501호(영통동, 벽산삼익아파트)
시에드 무함마드 아부자르 리즈비
경기 수원시 영통구 청명북로15번길 13
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
김연권

전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치 및 방법

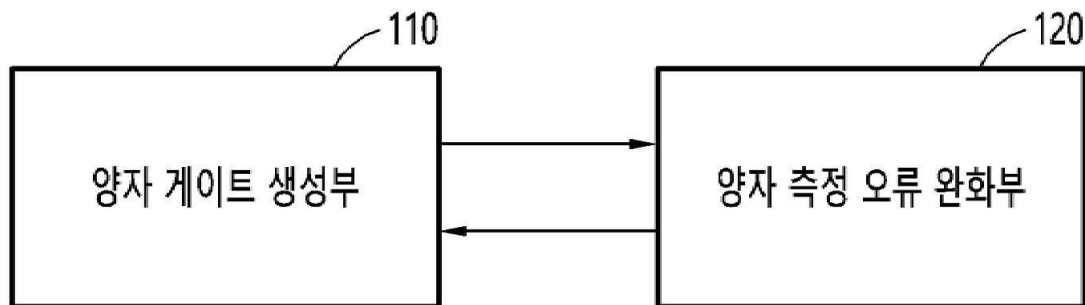
(57) 요약

본 발명은 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치 및 방법에 관한 것으로, 본 발명의 일실시예에 따른 양자 컴퓨팅 플랫폼의 양자 컴퓨터에서 오류 감소된 양자 푸리에 변환(Quantum Fourier Transform, QFT)을 구현하는 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치에 있어서, 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치는 양자 최적 제어(quantum optimal

(뒷면에 계속)

대표도 - 도1

100



control)에 기반하여 양자 푸리에 변환의 구현에 사용되고, 해밀턴(Hamiltonian) 제어에 따른 오류 관련 잡음에 강인한 적어도 하나의 양자 게이트를 구현하기 위한 펄스 세트를 획득하고, 상기 획득된 펄스 세트에 기반하여 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트를 생성하는 양자 게이트 생성부 및 상기 적어도 하나의 잡음 강인한 양자 게이트를 이용하여 적어도 하나의 양자 비트(qubit)를 구현하고, 상기 적어도 하나의 양자 비트에 양자 푸리에 변환을 적용한 후 역 양자 푸리에 변환을 적용하여 초기 양자 상태를 반환하며, 상기 초기 양자 상태의 위상 추정에서 측정 오류 완화를 구현하여 양자 푸리에 변환의 오류를 완화하는 양자 측정 오류 완화부를 포함할 수 있다.

(52) CPC특허분류

B82Y 10/00 (2013.01)

(72) 발명자

파델 하리츠 줄피카르

경기도 수원시 영통구 청명남로60번길 20, B04호
(영통동)

무하마드 서히불 울름

경기 수원시 영통구 청명로43번길 18 B02호

노재욱

경기도 광명시 안재로14번길 17

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711187873
과제번호	2019R1A2C2007037
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	(유형1-2)중견연구
연구과제명	[중견연구 유형1-2] 양자네트워크 핵심기술 연구(5/5)
기 여 율	40/100
과제수행기관명	경희대학교 산학협력단
연구기간	2019.03.01 ~ 2024.02.29

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711185531
과제번호	2022R1A4A3033401
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	(혁신법)기초연구실_개척형
연구과제명	[기초연구실_개척형] 무선-양자통신융합 기초연구실(2/3)
기 여 율	40/100
과제수행기관명	경희대학교 산학협력단
연구기간	2022.06.01 ~ 2025.02.28

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711193314
과제번호	2021-0-02046-003
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	정보통신기획평가원
연구사업명	(혁신법)정보통신방송혁신인재양성_2023
연구과제명	[정부] 2023 ITRC 6H 차세대 이동통신 기술 개발 (2단계 1차년도)(3/8)
기 여 율	20/100
과제수행기관명	경희대학교 산학협력단
연구기간	2021.07.01 ~ 2028.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

양자 컴퓨팅 플랫폼의 양자 컴퓨터에서 오류 감소된 양자 푸리에 변환(Quantum Fourier Transform, QFT)을 구현하는 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치에 있어서,

양자 최적 제어(quantum optimal control)에 기반하여 양자 푸리에 변환의 구현에 사용되고, 해밀턴(Hamiltonian) 제어에 따른 오류 관련 잡음에 강인한 적어도 하나의 양자 게이트를 구현하기 위한 펄스 세트를 획득하고, 상기 획득된 펄스 세트에 기반하여 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트를 생성하는 양자 게이트 생성부; 및

상기 적어도 하나의 잡음 강인한 양자 게이트를 이용하여 적어도 하나의 양자 비트(qubit)를 구현하고, 상기 적어도 하나의 양자 비트에 양자 푸리에 변환을 적용한 후 역 양자 푸리에 변환을 적용하여 초기 양자 상태를 반환하며, 상기 초기 양자 상태의 위상 추정에서 측정 오류 완화를 구현하여 양자 푸리에 변환의 오류를 완화하는 양자 측정 오류 완화부를 포함하는 것을 특징으로 하는

양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 양자 게이트 생성부는 상기 양자 컴퓨터의 차원에 기반하여 상기 양자 최적 제어에 의해 실현된 유니타리(unitary)와 상기 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트와 관련된 목표 유니타리 게이트의 트레이스 함수 값을 고려하여 상기 양자 컴퓨터의 충실도(fidelity) 및 부충실도(infidelity)와 관련된 충실도 차이를 고려하여 상기 획득된 펄스 세트를 최적화하기 위한 비용 함수(cost function)를 제어하는 것을 특징으로 하는

양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 양자 게이트 생성부는 상기 양자 컴퓨터와 관련하여 고정된 드리프트 해밀턴, 변수 제어 해밀턴 및 시간에 따른 진폭 함수를 정의하여 상기 해밀턴(Hamiltonian) 제어를 구현하고, 슈뢰딩거 방정식에 따라 상기 구현된 해밀턴 제어를 진화(evolution)하며, 상기 진화된 해밀턴 제어와 단일 펄스의 지속 시간을 고려하여 적어도 하나의 시간 슬롯에서 적어도 하나의 유니타리를 연산하고, 상기 연산된 적어도 하나의 유니타리에 기반하여 초기 유니타리와 목표 유니타리를 정의하고, 상기 정의된 목표 유니타리에 기반하여 상기 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트 중 어느 하나의 게이트를 생성하는 것을 특징으로 하는

양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 양자 게이트 생성부는 시간 슬롯과 상기 해밀턴 제어의 진화를 위한 허용 시간 중 적어도 하나와 관련된 초기 파라미터를 정의하고, 상기 정의된 초기 파라미터에 기반하여 상기 펄스 세트를 획득하는 것을 특징으로 하는

양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 양자 측정 오류 완화부는 잡음이 없는 경우에서 획득되는 제1 확률 백터와 상기 잡음이 존재하는 경우에서 획득되는 제2 확률 백터의 관계를 정의하는 오차 측정 행렬을 생성하고, 상기 오차 측정 행렬의 역행렬과 상기 제2 확률 백터를 곱하여 상기 측정 오류 완화를 구현하는 것을 특징으로 하는

양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 양자 측정 오류 완화부는 상기 초기 양자 상태의 위상 추정에서 측정 오류 완화를 구현을 위해 POVM(Positive-Operator Valued Measure)을 사용하여 측정 결과를 제어하는 것을 특징으로 하는

양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치.

청구항 7

양자 컴퓨팅 플랫폼의 양자 컴퓨터에서 오류 감소된 양자 푸리에 변환(Quantum Fourier Transform, QFT)을 구현하는 양자 푸리에 변환의 오류 완화 방법에 있어서,

양자 게이트 생성부에서, 양자 최적 제어(quantum optimal control)에 기반하여 양자 푸리에 변환의 구현에 사용되고, 해밀턴(Hamiltonian) 제어에 따른 오류 관련 잡음에 강인한 적어도 하나의 양자 게이트를 구현하기 위한 펄스 세트를 획득하고, 상기 획득된 펄스 세트에 기반하여 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트를 생성하는 단계; 및

양자 측정 오류 완화부에서, 상기 적어도 하나의 잡음 강인한 양자 게이트를 이용하여 적어도 하나의 양자 비트(qubit)를 구현하고, 상기 적어도 하나의 양자 비트에 양자 푸리에 변환을 적용한 후 역 양자 푸리에 변환을 적용하여 초기 양자 상태를 반환하며, 상기 초기 양자 상태의 위상 추정에서 측정 오류 완화를 구현하여 양자 푸리에 변환의 오류를 완화하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는

양자 푸리에 변환의 오류 완화 방법.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트를 생성하는 단계는,

상기 양자 컴퓨터의 차원에 기반하여 상기 양자 최적 제어에 의해 실현된 유니터리(unitary)와 상기 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트와 관련된 목표 유니터리 게이트의 트레이스 함수 값을 고려하여 상기 양자 컴퓨터의 충실도(fidelity) 및 부충실도(infidelity)와 관련된 충실도 차이를 고려하여 상기 획득된 펄스 세트를 최적화하기 위한 비용 함수(cost function)를 제어하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는

양자 푸리에 변환의 오류 완화 방법.

청구항 9

제7항에 있어서,

상기 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트를 생성하는 단계는,

상기 양자 컴퓨터와 관련하여 고정된 드리프트 해밀턴, 변수 제어 해밀턴 및 시간에 따른 진폭 함수를 정의하여 상기 해밀턴(Hamiltonian) 제어를 구현하고, 슈뢰딩거 방정식에 따라 상기 구현된 해밀턴 제어를 진화(evolution)하며, 상기 진화된 해밀턴 제어와 단일 펄스의 지속 시간을 고려하여 적어도 하나의 시간 슬롯에서 적어도 하나의 유니타리를 연산하고, 상기 연산된 적어도 하나의 유니타리에 기반하여 초기 유니타리와 목표 유니타리를 정의하고, 상기 정의된 목표 유니타리에 기반하여 상기 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트 중 어느 하나의 게이트를 생성하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는

양자 푸리에 변환의 오류 완화 방법.

청구항 10

제7항에 있어서,

상기 초기 양자 상태의 위상 추정에서 측정 오류 완화를 구현하여 양자 푸리에 변환의 오류를 완화하는 단계는, 잡음이 없는 경우에서 획득되는 제1 확률 벡터와 상기 잡음이 존재하는 경우에서 획득되는 제2 확률 벡터의 관계를 정의하는 오차 측정 행렬을 생성하고, 상기 오차 측정 행렬의 역행렬과 상기 제2 확률 벡터를 결합하여 상기 측정 오류 완화를 구현하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는

양자 푸리에 변환의 오류 완화 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치 및 방법에 관한 것으로, 보다 구체적으로, 잡음 강인한 양자 게이트를 이용하고, 위상 추정에서 측정 오류 완화를 사용하여 양자 컴퓨터에서 오류 감소된 양자 푸리에 변환을 구현하는 기술적 사상에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 양자 컴퓨터는 기존 컴퓨터보다 기하급수적으로 빠르게 작업을 수행할 수 있고, 양자 컴퓨터는 정보 처리에 있어 근본적으로 새로운 패러다임을 제시한다.

[0003] 간단히 말해서, 양자 비트 또는 큐비트(qubit)는 비트의 양자 대응물이고, 이는 양자 중첩이라고 불리는 정규 직교 기저 상태의 선형 조합으로 분해될 수 있는 2차원 상태 벡터이다.

[0004] 쇼어의(Shor's) 소인수분해 알고리즘은 양자 컴퓨터의 기능을 보여주는 가장 잘 알려진 알고리즘들 중 하나의 알고리즘이다.

[0005] 전통적인 컴퓨팅 환경에서 이 계산 문제를 해결하는 데는 수십억 년이 걸리지만, 이론적으로 양자 컴퓨터는 몇 시간 안에 이 작업을 수행할 수 있다.

[0006] 또 다른 중요한 발견은 정렬되지 않은 데이터베이스를 검색하는 기존 알고리즘에 비해 Grover 양자 검색 알고리즘의 2차 속도 향상이다.

[0007] 양자 푸리에 변환(Quantum Fourier Transform, QFT)은 두 알고리즘 모두에서 사용되는 중요한 요소이다.

[0008] 고전 데이터의 푸리에 변환을 계산하는 고전 작업은 양자 역학적 진폭에 양자 푸리에 변환을 적용해도 속도가 빨라지지 않는다.

[0009] 그러나 이것이 가능하게 하는 중요한 작업 중 하나는 위상 추정이고, 이는 특정 조건에서 유니타리 연산자(unitary operator)의 고유값(eigenvalues)을 근사화하고 인수분해 문제 및 양자 검색 알고리즘과 같은 다른 문제를 해결할 수 있게 해준다. 그러나, 양자 처리를 위한 작동 장치는 여전히 몇 가지 과제에 직면해 있다.

[0010] 양자 컴퓨팅에서, 위상 추정은 유니타리 연산자의 고유값을 근사적으로 계산하는 기법이다.

[0011] 쇼어의 소인수분해 알고리즘과 HHL 알고리즘과 같은 알고리즘에서 중요한 역할을 한다.

[0012] 하지만 현재의 양자 컴퓨터인 소음 중간규모 양자(noisy intermediate-scale quantum, NISQ) 장치는 양자 비트 수가 제한되어 있고, 성능에 영향을 줄 수 있는 오류를 자주 일으킨다.

[0013] IBM, Google, Intel 및 Xanadu와 같은 많은 회사는 NISQ 장치에 속하는 소수의 큐비트를 갖춘 몇 가지 소규모 양자 컴퓨터를 개발하였다.

[0014] 이러한 양자 컴퓨터는 결맞음(coherence), 누화(crosstalk) 및 기타 양자 잡음으로 인해 발생하는 오류로 인해 불완전하다.

[0015] 따라서, 여기에 구현된 모든 회로에는 오류가 있으므로 그로부터 유익한 결과를 추출하기가 어렵다.

[0016] 양자 컴퓨터의 오류를 줄이는 한가지 방법은 양자 오류 정정(error correction)이지만, 이 방법은 복잡하고 추

가 양자 비트가 필요하다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0017] (특허문헌 0001) 한국공개특허 제10-2023-0038966호, "양자 시스템의 잡음 선형성을 위한 방법 및 이를 수행하는 양자 시스템"
- (특허문헌 0002) 한국공개특허 제10-2022-0047128호, "양자회로 에러 보정 방법 및 그 장치"
- (특허문헌 0003) 미국공개특허 제2021/0398007호, "QUANTUM PROCESSING SYSTEM"
- (특허문헌 0004) 한국공개특허 제10-2021-0136986호, "멀티-큐비트 게이트를 기반으로 하는 양자 컴퓨터 아키텍처"

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0018] 본 발명은 잡음 강인한 양자 게이트를 이용하고, 위상 추정에서 측정 오류 완화를 사용하여 양자 컴퓨터에서 오류 감소된 양자 푸리에 변환을 구현하는 것을 목적으로 한다.
- [0019] 본 발명은 실제 하드웨어인 양자 컴퓨팅 플랫폼의 양자 컴퓨터 중 하나인 소음 중간규모 양자(noisy intermediate-scale quantum, NISQ) 장치의 양자 비트수가 제한되어 발생하는 오류를 대비하여 양자 최적 제어 및 측정 오류 완화를 구현하여 양자 푸리에 변환의 오류를 완화하는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

- [0020] 본 발명의 일실시예에 따른 양자 컴퓨팅 플랫폼의 양자 컴퓨터에서 오류 감소된 양자 푸리에 변환(Quantum Fourier Transform, QFT)을 구현하는 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치에 있어서, 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치는 양자 최적 제어(quantum optimal control)에 기반하여 양자 푸리에 변환의 구현에 사용되고, 해밀턴(Hamiltonian) 제어에 따른 오류 관련 잡음에 강인한 적어도 하나의 양자 게이트를 구현하기 위한 펄스 세트를 획득하고, 상기 획득된 펄스 세트에 기반하여 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트를 생성하는 양자 게이트 생성부 및 상기 적어도 하나의 잡음 강인한 양자 게이트를 이용하여 적어도 하나의 양자 비트(qubit)를 구현하고, 상기 적어도 하나의 양자 비트에 양자 푸리에 변환을 적용한 후 역 양자 푸리에 변환을 적용하여 초기 양자 상태를 반환하며, 상기 초기 양자 상태의 위상 추정에서 측정 오류 완화를 구현하여 양자 푸리에 변환의 오류를 완화하는 양자 측정 오류 완화부를 포함할 수 있다.
- [0021] 상기 양자 게이트 생성부는 상기 양자 컴퓨터의 차원에 기반하여 상기 양자 최적 제어에 의해 실현된 유니타리(unitary)와 상기 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트와 관련된 목표 유니타리 게이트의 트레이스 함수 값을 고려하여 상기 양자 컴퓨터의 충실도(fidelity) 및 부충실도(infidelity)와 관련된 충실도 차이를 고려하여 상기 획득된 펄스 세트를 최적화하기 위한 비용 함수(cost function)를 제어할 수 있다.
- [0022] 상기 양자 게이트 생성부는 상기 양자 컴퓨터와 관련하여 고정된 드리프트 해밀턴, 변수 제어 해밀턴 및 시간에 따른 진폭 함수를 정의하여 상기 해밀턴(Hamiltonian) 제어를 구현하고, 슈뢰딩거 방정식에 따라 상기 구현된 해밀턴 제어를 진화(evolution)하며, 상기 진화된 해밀턴 제어와 단일 펄스의 지속 시간을 고려하여 적어도 하나의 시간 슬롯에서 적어도 하나의 유니타리를 연산하고, 상기 연산된 적어도 하나의 유니타리에 기반하여 초기 유니타리와 목표 유니타리를 정의하고, 상기 정의된 목표 유니타리에 기반하여 상기 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트 중 어느 하나의 게이트를 생성할 수 있다.
- [0023] 상기 양자 게이트 생성부는 시간 슬롯과 상기 해밀턴 제어의 진화를 위한 허용 시간 중 적어도 하나와 관련된 초기 파라미터를 정의하고, 상기 정의된 초기 파라미터에 기반하여 상기 펄스 세트를 획득할 수 있다.
- [0024] 상기 양자 측정 오류 완화부는 잡음이 없는 경우에서 획득되는 제1 확률 벡터와 상기 잡음이 존재하는 경우에서 획득되는 제2 확률 벡터의 관계를 정의하는 오차 측정 행렬을 생성하고, 상기 오차 측정 행렬의 역행렬과 상기 제2 확률 벡터를 결합하여 상기 측정 오류 완화를 구현할 수 있다.

- [0025] 상기 양자 측정 오류 완화부는 상기 초기 양자 상태의 위상 추정에서 측정 오류 완화를 구현을 위해 POVM(Positive-Operator Valued Measure)을 사용하여 측정 결과를 제어할 수 있다.
- [0026] 본 발명의 일실시예에 따른 양자 컴퓨팅 플랫폼의 양자 컴퓨터에서 오류 감소된 양자 푸리에 변환(Quantum Fourier Transform, QFT)을 구현하는 양자 푸리에 변환의 오류 완화 방법은 양자 게이트 생성부에서, 양자 최적 제어(quantum optimal control)에 기반하여 양자 푸리에 변환의 구현에 사용되고, 해밀턴(Hamiltonian) 제어에 따른 오류 관련 잡음에 강인한 적어도 하나의 양자 게이트를 구현하기 위한 펄스 세트를 획득하고, 상기 획득된 펄스 세트에 기반하여 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트를 생성하는 단계 및 양자 측정 오류 완화부에서, 상기 적어도 하나의 잡음 강인한 양자 게이트를 이용하여 적어도 하나의 양자 비트(qubit)를 구현하고, 상기 적어도 하나의 양자 비트에 양자 푸리에 변환을 적용한 후 역 양자 푸리에 변환을 적용하여 초기 양자 상태를 반환하며, 상기 초기 양자 상태의 위상 추정에서 측정 오류 완화를 구현하여 양자 푸리에 변환의 오류를 완화하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0027] 상기 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트를 생성하는 단계는, 상기 양자 컴퓨터의 차원에 기반하여 상기 양자 최적 제어에 의해 실현된 유니터리(unitary)와 상기 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트와 관련된 목표 유니터리 게이트의 트레이스 함수 값을 고려하여 상기 양자 컴퓨터의 충실도(fidelity) 및 부충실도(infidelity)와 관련된 충실도 차이를 고려하여 상기 획득된 펄스 세트를 최적화하기 위한 비용 함수(cost function)를 제어하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0028] 상기 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트를 생성하는 단계는, 상기 양자 컴퓨터와 관련하여 고정된 드리프트 해밀턴, 변수 제어 해밀턴 및 시간에 따른 진폭 함수를 정의하여 상기 해밀턴(Hamiltonian) 제어를 구현하고, 슈뢰딩거 방정식에 따라 상기 구현된 해밀턴 제어를 진화(evolution)하며, 상기 진화된 해밀턴 제어와 단일 펄스의 지속 시간을 고려하여 적어도 하나의 시간 슬롯에서 적어도 하나의 유니타리를 연산하고, 상기 연산된 적어도 하나의 유니타리에 기반하여 초기 유니타리와 목표 유니타리를 정의하고, 상기 정의된 목표 유니타리에 기반하여 상기 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트 중 어느 하나의 게이트를 생성하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0029] 상기 초기 양자 상태의 위상 추정에서 측정 오류 완화를 구현하여 양자 푸리에 변환의 오류를 완화하는 단계는, 잡음이 없는 경우에서 획득되는 제1 확률 벡터와 상기 잡음이 존재하는 경우에서 획득되는 제2 확률 벡터의 관계를 정의하는 오차 측정 행렬을 생성하고, 상기 오차 측정 행렬의 역행렬과 상기 제2 확률 벡터를 결합하여 상기 측정 오류 완화를 구현하는 단계를 포함할 수 있다.

발명의 효과

- [0030] 본 발명은 잡음 강인한 양자 게이트를 이용하고, 위상 추정에서 측정 오류 완화를 사용하여 양자 컴퓨터에서 오류 감소된 양자 푸리에 변환을 구현할 수 있다.
- [0031] 본 발명은 실제 하드웨어인 양자 컴퓨팅 플랫폼의 양자 컴퓨터 중 하나인 소음 중간규모 양자(noisy intermediate-scale quantum, NISQ) 장치의 양자 비트수가 제한되어 발생하는 오류를 대비하여 양자 최적 제어 및 측정 오류 완화를 구현하여 양자 푸리에 변환의 오류를 완화할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0032] 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치를 설명하는 도면이다.
- 도 2는 본 발명의 일실시예에 따른 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치에서 측정 오류 완화를 구현하는 결과를 설명하는 도면이다.
- 도 3a 및 도 3b는 본 발명의 일실시예에 따른 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치에서 오류 관련 잡음에 강인한 적어도 하나의 양자 게이트를 이용함에 따른 제어 펄스를 설명하는 도면이다.
- 도 4는 본 발명의 일실시예에 따른 양자 푸리에 변환의 오류 완화 방법을 설명하는 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0033] 이하, 본 문서의 다양한 실시 예들이 첨부된 도면을 참조하여 기재된다.
- [0034] 실시 예 및 이에 사용된 용어들은 본 문서에 기재된 기술을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며,

해당 실시 예의 다양한 변경, 균등물, 및/또는 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.

- [0035] 하기에서 다양한 실시 예들을 설명에 있어 관련된 공지 기능 또는 구성에 대한 구체적인 설명이 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명을 생략할 것이다.
- [0036] 그리고 후술되는 용어들은 다양한 실시 예들에서의 기능을 고려하여 정의된 용어들로서 이는 사용자, 운용자의 의도 또는 관례 등에 따라 달라질 수 있다. 그러므로 그 정의는 본 명세서 전반에 걸친 내용을 토대로 내려져야 할 것이다.
- [0037] 도면의 설명과 관련하여, 유사한 구성요소에 대해서는 유사한 참조 부호가 사용될 수 있다.
- [0038] 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함할 수 있다.
- [0039] 본 문서에서, "A 또는 B" 또는 "A 및/또는 B 중 적어도 하나" 등의 표현은 함께 나열된 항목들의 모든 가능한 조합을 포함할 수 있다.
- [0040] "제1," "제2," "첫째," 또는 "둘째," 등의 표현들은 해당 구성요소들을, 순서 또는 중요도에 상관없이 수식할 수 있고, 한 구성요소를 다른 구성요소와 구분하기 위해 사용될 뿐 해당 구성요소들을 한정하지 않는다.
- [0041] 어떤(예: 제1) 구성요소가 다른(예: 제2) 구성요소에 "(기능적으로 또는 통신적으로) 연결되어" 있다거나 "접속되어" 있다고 언급된 때에는, 상기 어떤 구성요소가 상기 다른 구성요소에 직접적으로 연결되거나, 다른 구성요소(예: 제3 구성요소)를 통하여 연결될 수 있다.
- [0042] 본 명세서에서, "~하도록 구성된(또는 설정된)(configured to)"은 상황에 따라, 예를 들면, 하드웨어적 또는 소프트웨어적으로 "~에 적합한," "~하는 능력을 가지는," "~하도록 변경된," "~하도록 만들어진," "~를 할 수 있는," 또는 "~하도록 설계된"과 상호 호환적으로(interchangeably) 사용될 수 있다.
- [0043] 어떤 상황에서는, "~하도록 구성된 장치"라는 표현은, 그 장치가 다른 장치 또는 부품들과 함께 "~할 수 있는" 것을 의미할 수 있다.
- [0044] 예를 들면, 문구 "A, B, 및 C를 수행하도록 구성된(또는 설정된) 프로세서"는 해당 동작을 수행하기 위한 전용 프로세서(예: 임베디드 프로세서), 또는 메모리 장치에 저장된 하나 이상의 소프트웨어 프로그램들을 실행함으로써, 해당 동작들을 수행할 수 있는 범용 프로세서(예: CPU 또는 application processor)를 의미할 수 있다.
- [0045] 또한, '또는' 이라는 용어는 배타적 논리합 'exclusive or' 이기보다는 포함적인 논리합 'inclusive or' 를 의미한다.
- [0046] 즉, 달리 언급되지 않는 한 또는 문맥으로부터 명확하지 않는 한, 'x가 a 또는 b를 이용한다' 라는 표현은 포함적인 자연 순열들(natural inclusive permutations) 중 어느 하나를 의미한다.
- [0047] 이하 사용되는 '..부', '..기' 등의 용어는 적어도 하나의 기능이나 동작을 처리하는 단위를 의미하며, 이는 하드웨어나 소프트웨어, 또는, 하드웨어 및 소프트웨어의 결합으로 구현될 수 있다.
- [0049] 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치를 설명하는 도면이다.
- [0050] 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치의 구성 요소를 예시한다.
- [0051] 도 1을 참고하면, 본 발명의 일실시예에 따른 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치(100)는 양자 게이트 생성부(110) 및 양자 측정 오류 완화부(120)를 포함한다.
- [0052] 일례로, 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치(100)는 양자 컴퓨팅 플랫폼의 양자 컴퓨터에서 오류 감소된 양자 푸리에 변환(Quantum Fourier Transform, QFT)을 구현하는 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치일 수 있다.
- [0053] 예를 들어, 양자 컴퓨터는 소음 중간규모 양자(noisy intermediate-scale quantum, NISQ) 장치를 포함한다.
- [0054] 본 발명의 일실시예에 따른 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치(100)는 양자 컴퓨터의 프로세서(processor) 또는 제어부에 해당하는 구성일 수 있다.
- [0055] 본 발명의 일실시예에 따르면 양자 게이트 생성부(110)는 양자 최적 제어(quantum optimal control)에 기반하여 양자 푸리에 변환의 구현에 사용되고, 해밀턴(Hamiltonian) 제어에 따른 오류 관련 잡음에 강인한 적어도 하나의 양자 게이트를 구현하기 위한 펄스 세트를 획득한다.

[0056] 또한, 양자 게이트 생성부(110)는 획득된 펄스 세트에 기반하여 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트를 생성할 수 있다.

[0057] 본 발명의 일실시예에 따르면 양자 측정 오류 완화부(120)는 적어도 하나의 잡음 강인한 양자 게이트를 이용하여 적어도 하나의 양자 비트(qubit)를 구현한다.

[0058] 또한, 양자 측정 오류 완화부(120)는 적어도 하나의 양자 비트에 양자 푸리에 변환을 적용한 후 역 양자 푸리에 변환을 적용하여 초기 양자 상태를 반환한다.

[0059] 또한, 양자 측정 오류 완화부(120)는 초기 양자 상태의 위상 추정에서 측정 오류 완화를 구현하여 양자 푸리에 변환의 오류를 완화할 수 있다.

[0060] 일례로, 양자 게이트 생성부(110)는 상기 양자 컴퓨터의 차원에 기반하여 양자 최적 제어에 의해 실현된 유니터리(unitary)와 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트와 관련된 목표 유니터리 게이트의 트레이스 함수 값을 고려하여 양자 컴퓨터의 충실도(fidelity) 및 부충실도(infidelity)와 관련된 충실도 차이를 고려하여 상기 획득된 펄스 세트를 최적화하기 위한 비용 함수(cost function)를 제어할 수 있다.

[0061] 양자 게이트 생성부(110)는 하기 수학식 1을 이용하여 비용 함수를 제어할 수 있다.

[0063] [수학식 1]

$$J = 1 - F = 1 - \frac{1}{d} \left| \text{tr}(U_t^\dagger U_0) \right|^2$$

[0064]

[0066] 수학식 1에서, J는 부충실도(infidelity)를 나타낼 수 있고, F는 충실도(fidelity)를 나타낼 수 있으며, d는 나타낼 수 있고, tr은 트레이스 함수를 나타낼 수 있으며, U_0 는 양자 최적 제어에 의해 실현된 유니터리를 나타낼 수 있고, U_t 는 목표 유니터리 게이트를 나타낼 수 있다.

[0067] 예를 들어, 충실도는 큐비트가 얼마나 정확하게 양자 연산을 수행하고 얼마나 오래 양자 상태를 유지할 수 있는지를 나타내는 지표이다.

[0068] 충실도가 높을수록 큐비트는 의도한대로 정확하게 동작하여 그 상태를 오래 유지할 수 있다.

[0069] 예를 들어, 충실도가 높을수록, 부충실도가 낮을수록 더 많은 양자 연산과 더 복잡한 양자 알고리즘을 수행할 수 있다.

[0070] 예를 들어, 충실도는 정확도로 지칭될 수 있고, 부충실도는 부정확도로 지칭될 수 있다.

[0071] 양자 컴퓨터의 성능을 판단하고자 할 때 가장 대표적인 요소가 바로 "큐비트의 수"가 얼마나 되는지 이다.

[0072] 일반적으로 사용하는 클래식 컴퓨터에서는 비트의 수가 늘어나면 그에 따라 처리 능력도 선형적으로 증가한다.

[0073] 사용되는 몇 가지 기술로는 GRAPE(Gradient Ascent Pulse Engineering), Krotov, CRAB(Chopped Random Basis Optimization) 및 GOAT(gradient optimization of analytic controls)가 있다.

[0074] LBFGS-B라고 불리는 GRAPE의 수정된 버전도 메모리를 덜 사용하고 수렴 속도가 더 빠르기 때문에 널리 사용된다.

[0075] 본 발명의 일실시예에 따르면 양자 게이트 생성부(110)는 양자 컴퓨터와 관련하여 고정된 드리프트 해밀턴, 변수 제어 해밀턴 및 시간에 따른 진폭 함수를 정의하여 상기 해밀턴(Hamiltonian) 제어를 구현한다.

[0076] 또한, 양자 게이트 생성부(110)는 슈뢰딩거 방정식에 따라 상기 구현된 해밀턴 제어를 진화(evolution)하며, 진화된 해밀턴 제어와 단일 펄스의 지속 시간을 고려하여 적어도 하나의 시간 슬롯에서 적어도 하나의 유니타리를 연산한다.

[0077] 양자 게이트 생성부(110)는 연산된 적어도 하나의 유니타리에 기반하여 초기 유니타리와 목표 유니타리를 정의하고, 상기 정의된 목표 유니타리에 기반하여 상기 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트 중

어느 하나의 게이트를 생성할 수 있다.

[0078] 예를 들어, 생성되는 양자 게이트는 Hadamard, CNOT, Controlled Rotation, Swap와 같은 양자 게이트에서 잡음에 강인하도록 개선된 게이트일 수 있다.

[0079] 양자 컴퓨팅 플랫폼은 IBM에서 제시하는 Qiskit 환경을 포함할 수 있다.

[0080] 양자 시스템의 시스템 요소 간의 상호 작용 또는 드리프트 해밀턴이라고 불리는 j-커플링과 같은 제어할 수 없는 역학을 갖는다.

[0081] 한편, 제어 해밀턴이라고 하는 시변 진폭 상호 작용 레이저 빔과 같이 조작할 수 있는 외부에서 제어 가능한 다른 필드도 존재한다.

[0082] 제어 해밀턴은 펄스 세트를 이용해 조작될 수 있어, 원하는 방식으로 양자 시스템의 진화(evolution)를 돕게 할 수 있다.

[0083] 양자 게이트 생성부(110)는 하기 수학식 2와 같이 정의되는 해밀턴 제어를 이용한다.

[0085] [수학식 2]

$$H(t) = H_0 + \sum_{j=1} u_j(t) * H_j$$

[0086]

[0088] 수학식 2에서, $H_{(t)}$ 는 특정 제어에 따른 해밀턴 제어에 따라 양자 시스템의 결합된 해밀턴을 나타낼 수 있고, H_0 는 드리프트 해밀턴을 나타낼 수 있으며, $u_j(t)$ 는 특정 제어에 대한 시간에 따른 진폭 함수 또는 펄스를 나타낼 수 있고, H_j 는 변수 제어 해밀턴을 나타낼 수 있다.

[0089] 양자 시스템에서 슈뢰딩거 방정식에 따라 진화하는 것은 하기 수학식 3과 같이 표현할 수 있다.

[0091] [수학식 3]

$$\frac{d|\psi\rangle}{dt} = -iH(t)|\psi\rangle$$

[0092]

[0094] 수학식 3에서, 수학식 2의 제어 계수 또는 펄스를 조각별 상수 근사로 가정하면 수학식 3의 해를 획득할 수 있다.

[0095] 이에 따라서 시간 전개 연산자는 하기 수학식 4와 같이 정리할 수 있다.

[0097] [수학식 4]

$$U_k = e^{-iH(t_k)\Delta t_k}$$

[0098]

[0100] 수학식 4에서, U 는 특정 시간 슬롯에서의 유니타리를 나타낼 수 있고, Δt_k 는 단일 펄스의 지속 시간을 나타낼 수 있고, k 는 시간 슬롯을 나타낼 수 있다.

[0101] 시스템이 진화하는 데 필요한 시간이 M 개의 시간 슬롯으로 분할되면 전체 진화는 수학식 5에 의해 주어진 $k = M$ 을 취하여 계산할 수 있다.

[0103] [수학식 5]

[0104]
$$U(t_k) = U_k U_{k-1} \dots U_1 U_0.$$

[0106] 수학식 5에서, U 는 유니타리를 나타내고, k 시간에서의 유니타리에 대한 연산 결과를 나타낸다.

[0107] 양자 게이트 생성부(110)는 시간 슬롯과 상기 해밀턴 제어의 진화를 위한 허용 시간 중 적어도 하나와 관련된 초기 파라미터를 정의하고, 정의된 초기 파라미터에 기반하여 펄스 세트를 획득할 수 있다.

[0108] 양자 게이트 생성부(110)는 양자 최적 제어에 기반하여 잡음 환경에서도 충실도가 높도록 동작하는 양자 게이트를 생성할 수 있다.

[0109] 본 발명의 일실시예에 따르면 양자 측정 오류 완화부(120)는 잡음이 없는 경우에서 획득되는 제1 확률 벡터와 상기 잡음이 존재하는 경우에서 획득되는 제2 확률 벡터의 관계를 정의하는 오차 측정 행렬을 생성하고, 오차 측정 행렬의 역행렬과 제2 확률 벡터를 결합하여 측정 오류 완화를 구현할 수 있다.

[0110] 일례로, 양자 측정 오류 완화부(120)는 상기 초기 양자 상태의 위상 추정에서 측정 오류 완화를 구현을 위해 POVM(Positive-Operator Valued Measure)을 사용하여 측정 결과를 제어할 수 있다.

[0111] 예를 들어, 양자 측정 오류 완화부(120)는 수학식 6에 기반하여 POVM 연산을 수행할 수 있다.

[0113] [수학식 6]

[0114]
$$\forall i \quad M_i^{exp} = \sum_j p(i|j) M_j^{ideal}$$

[0116] 수학식 6에서, M_{ideal} 과 M_{exp} 의 관계를 정의하고, M_{ideal} 은 이상적인 장치에서의 결과를 나타내고, M_{exp} 은 잡음 존재 장치에서의 결과를 나타내며, Λ 의 왼쪽 확률론적 속성은 $P_i P \Lambda_{i,j} = i p(i|j) = 1$ 임을 나타낸다.

[0117] 완벽한 장치에서 획득되었을 이상적인 확률 벡터를 p_{ideal} 이라 하고, 잡음이 있는 장치를 이용한 실험에서 얻은 확률 p_{exp} 벡터는 수학식 7과 같이 정의할 수 있고, 오차 측정 행렬은 Λ 일 수 있다.

[0119] [수학식 7]

[0120]
$$p_{exp} = \Lambda p_{ideal}$$

[0122] 이에 따르면 이상적인 양자 컴퓨터에 대한 실험에서 얻은 통계를 얻기 위해 p_{exp} 에 역함수를 왼쪽으로 곱하여 하기 수학식 8과 같이 나타낼 수 있다.

[0124] [수학식 8]

[0125]
$$p_{ideal} = \Lambda^{-1} p_{exp}$$

[0126]

- [0127] 예를 들어, 제1 확률 벡터는 이상적인 확률 벡터를 p_{ideal} 일 수 있고, 잡음이 있는 장치를 이용한 실험에서 얻은 확률 p_{exp} 벡터는 제2 확률 벡터로 기재할 수 있다.
- [0128] 예를 들어, 양자 최적 제어는 양자 상태가 잡음 오류에 의해서 충실도와 부충실도 사이의 차이가 크지 않고, 충실도가 감소하지 않도록 양자 상태 관련 잡음을 처리하는 제어일 수 있다.
- [0129] 이를 통해 양자 측정 오류 완화부(120)는 실험적 잡음을 클래식 후처리를 통해 완화할 수 있다.
- [0130] 정리하면, 본 발명은 실제 하드웨어인 양자 컴퓨팅 플랫폼의 양자 컴퓨터 중 하나인 소음 중간규모 양자(noisy intermediate-scale quantum, NISQ) 장치의 양자 비트수가 제한되어 발생하는 오류를 대비하여 양자 최적 제어 및 측정 오류 완화를 구현하여 양자 푸리에 변환의 오류를 완화할 수 있다.
- [0132] 도 2는 본 발명의 일실시예에 따른 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치에서 측정 오류 완화를 구현하는 결과를 설명하는 도면이다.
- [0133] 도 2는 본 발명의 일실시예에 따른 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치에서 측정 오류 완화를 구현하는 결과를 예시한다.
- [0134] 도 2를 참고하면, 그래프(200)는 5큐비트의 이진 정수 함수로 나타난 확률 분포에 관한 것으로 오류 완화 방법이 양자 푸리에 변환을 구현한 경우에 양자 컴퓨터의 오류를 수정하고 원하는 결과를 제공함을 보여준다.
- [0135] 예를 들어, 양자 컴퓨터는 NISQ 장치로서, NISQ 장치에서 양자 회로를 실행할 시, 오류를 줄이기 위한 측정 오류 완화 기술이 구현됨을 그래프(200)에서는 확인시켜준다.
- [0136] 또한, IBM 양자 컴퓨터에서 오류를 완화하는 방법을 보여주기 위해 QFT 알고리즘을 예로 사용하고 일부 상황에서 기존 후처리가 NISQ 시대 장치의 오류를 줄이는 데 어떻게 도움이 될 수 있는지 보여준다.
- [0137] 그래프(200)는 두 가지 유형의 게이트로 구성된 5큐비트 QFT 회로를 만들었다. 아다마르(Hadamard)와 제어된 회전 CROTk 게이트를 사용한 결과를 예시하고, 하기 수식식과 같이 정의 된다.

[0139] [수학식9]

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad CP(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{i\theta} \end{bmatrix}$$

- [0142] 수식식9에서, H는 아다마르 게이트를 사용한 결과를 나타내고, CP는 CROTk 게이트를 사용한 결과를 나타내며, θ 는 $\phi/2^{k-1}$ 일 수 있다.
- [0143] 각 게이트를 이용한 결과는 이진수로 정의되고, 초기 양자 상태를 반환하기 위해서 QFT와 역 QFT가 적용된다.
- [0144] 오류 완화 방법의 효율성을 평가하기 위한 벤치마크 역할을 할 이상적인 결과를 제공하기 위해 이 회로를 먼저 키스킷 Aer 시뮬레이터에 구현할 수 도 있다.
- [0145] 그 후, ibmq quito 잡음 모델을 사용하여 시뮬레이터에서 결과를 평균화할 수 있다.
- [0146] 노이즈 모델이 있거나 없는 시뮬레이터에 구현된 회로의 각 실행에서 1024개의 샷을 사용할 수 있다.
- [0147] 각 실행에 대해 측정 오류 완화를 사용하여 완화되지 않은 효과와 완화된 효과를 비교할 수 있다.
- [0148] 그래프(200)에서 이 경우 실제 하드웨어의 결과에는 오류가 있으며 노이즈가 없는 시뮬레이터에서 보는 결과와 다르다는 것을 알 수 있다. 반면, 측정오류 완화를 적용한 결과는 올바른 결과를 보인다.

- [0150] 도 3a 및 도 3b는 본 발명의 일실시예에 따른 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치에서 오류 관련 잡음에 강인한 적어도 하나의 양자 게이트를 이용함에 따른 제어 펄스를 설명하는 도면이다.
- [0151] 도 3a 및 도 3b는 본 발명의 일실시예에 따른 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치에서 오류 관련 잡음에 강인한 적어도 하나의 양자 게이트를 이용함에 따른 제어 펄스의 구현 결과를 예시한다.
- [0152] 도 3a의 그래프(300)는 제어 펄스의 구현 이전에 초기 펄스를 나타내고, 도 3b의 그래프(310)는 오류 관련 잡음에 강인한 적어도 하나의 양자 게이트를 이용함에 따른 제어 펄스의 구현을 나타낸다.
- [0153] 그래프(310)에서는 높은 충실도로 원하는 양자 상태를 제공할 수 있는 양자 게이트를 만들기 위해 시스템의 해밀턴 제어를 위한 최적의 펄스를 설계 결과를 예시한다.
- [0154] 그래프(300)와 그래프(310)를 함께 살펴보면, 이 펄스(제어 진폭(control amplitude))를 사용하여 지정된 오류 내에서 타겟 게이트 진화를 생성할 수 있다.
- [0155] 따라서 우리는 U_0 및 U_t 에서 구동하여 양자 시스템의 정의된 역학을 고려하여 $R_x(\pi/2)$ 게이트를 효과적으로 구현할 수 있다.
- [0157] 도 4는 본 발명의 일실시예에 따른 양자 푸리에 변환의 오류 완화 방법을 설명하는 도면이다.
- [0158] 도 4는 본 발명의 일실시예에 따른 양자 푸리에 변환의 오류 완화 방법이 측정 오류 완화와 양자 최적 제어를 사용하여 양자 장치에서 오류 완화 양자 푸리에 변환(Quantum Fourier Transform, QFT)를 구현하는 절차를 예시한다.
- [0159] 도 4를 참고하면, 단계(S401)에서 본 발명의 일실시예에 따른 양자 푸리에 변환의 오류 완화 방법은 양자 최적 제어에 기반하여 잡음 강인한 양자 게이트를 생성한다.
- [0160] 즉, 본 발명의 일실시예에 따른 양자 푸리에 변환의 오류 완화 방법은 양자 최적 제어(quantum optimal control)에 기반하여 양자 푸리에 변환의 구현에 사용되고, 해밀턴(Hamiltonian) 제어에 따른 오류 관련 잡음에 강인한 적어도 하나의 양자 게이트를 구현하기 위한 펄스 세트를 획득하고, 획득된 펄스 세트에 기반하여 적어도 하나의 잡음 강인한(noise-robust) 양자 게이트를 생성할 수 있다.
- [0161] 단계(S402)에서 본 발명의 일실시예에 따른 양자 푸리에 변환의 오류 완화 방법은 양자 게이트를 이용하여 반환된 양자 상태에 대하여 측정 오류 완화를 구현하여 양자 푸리에 변환의 오류를 완화한다.
- [0162] 즉, 본 발명의 일실시예에 따른 양자 푸리에 변환의 오류 완화 방법은 적어도 하나의 잡음 강인한 양자 게이트를 이용하여 적어도 하나의 양자 비트(qubit)를 구현하고, 적어도 하나의 양자 비트에 양자 푸리에 변환을 적용한 후 역 양자 푸리에 변환을 적용하여 초기 양자 상태를 반환하며, 초기 양자 상태의 위상 추정에서 측정 오류 완화를 구현하여 양자 푸리에 변환의 오류를 완화할 수 있다.
- [0163] 따라서, 본 발명은 잡음 강인한 양자 게이트를 이용하고, 위상 추정에서 측정 오류 완화를 사용하여 양자 컴퓨터에서 오류 감소된 양자 푸리에 변환을 구현할 수 있다.
- [0165] 이상에서 설명된 장치는 하드웨어 구성요소, 소프트웨어 구성요소, 및/또는 하드웨어 구성요소 및 소프트웨어 구성요소의 조합으로 구현될 수 있다. 예를 들어, 실시예들에서 설명된 장치 및 구성요소는, 예를 들어, 프로세서, 콘트롤러, ALU(arithmetic logic unit), 디지털 신호 프로세서(digital signal processor), 마이크로컴퓨터, FPA(field programmable array), PLU(programmable logic unit), 마이크로프로세서, 또는 명령(instruction)을 실행하고 응답할 수 있는 다른 어떠한 장치와 같이, 하나 이상의 범용 컴퓨터 또는 특수 목적 컴퓨터를 이용하여 구현될 수 있다. 처리 장치는 운영 체제(OS) 및 상기 운영 체제 상에서 수행되는 하나 이상의 소프트웨어 애플리케이션을 수행할 수 있다. 또한, 처리 장치는 소프트웨어의 실행에 응답하여, 데이터를 접근, 저장, 조작, 처리 및 생성할 수도 있다. 이해의 편의를 위하여, 처리 장치는 하나가 사용되는 것으로 설명된 경우도 있지만, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자는, 처리 장치가 복수 개의 처리 요소(processing element) 및/또는 복수 유형의 처리 요소를 포함할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 처리 장치는 복수 개의 프로세서 또는 하나의 프로세서 및 하나의 콘트롤러를 포함할 수 있다. 또한, 병렬 프로세서(parallel processor)와 같은, 다른 처리 구성(processing configuration)도 가능하다.

[0166] 소프트웨어는 컴퓨터 프로그램(computer program), 코드(code), 명령(instruction), 또는 이들 중 하나 이상의 조합을 포함할 수 있으며, 원하는 대로 동작하도록 처리 장치를 구성하거나 독립적으로 또는 결합적으로(collectively) 처리 장치를 명령할 수 있다. 소프트웨어 및/또는 데이터는, 처리 장치에 의하여 해석되거나 처리 장치에 명령 또는 데이터를 제공하기 위하여, 어떤 유형의 기계, 구성요소(component), 물리적 장치, 가상장치(virtual equipment), 컴퓨터 저장 매체 또는 장치, 또는 전송되는 신호 파(signal wave)에 영구적으로, 또는 일시적으로 구체화(embody)될 수 있다. 소프트웨어는 네트워크로 연결된 컴퓨터 시스템 상에 분산되어서, 분산된 방법으로 저장되거나 실행될 수도 있다. 소프트웨어 및 데이터는 하나 이상의 컴퓨터 판독 가능 기록 매체에 저장될 수 있다.

[0167] 이상과 같이 실시예들이 비록 한정된 도면에 의해 설명되었으나, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 상기의 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 시스템, 구조, 장치, 회로 등의 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다.

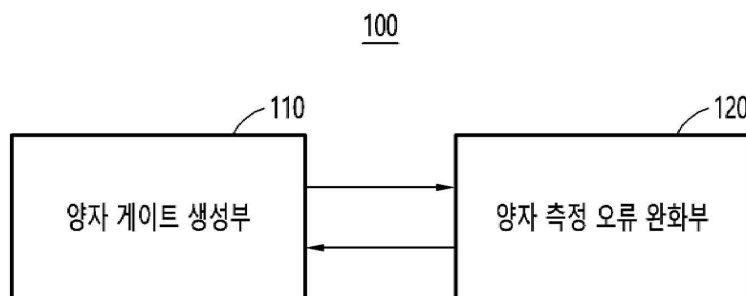
[0168] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 특허청구범위의 범위에 속한다.

부호의 설명

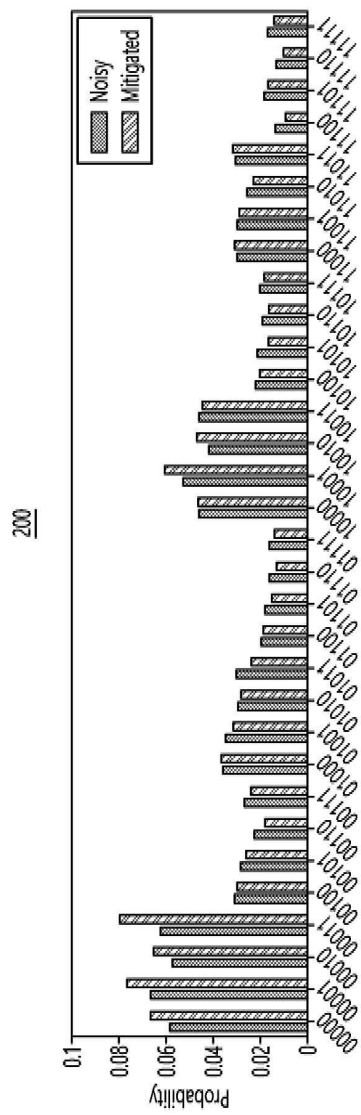
[0169] 100: 양자 푸리에 변환의 오류 완화 장치
110: 양자 게이트 생성부 120: 양자 측정 오류 완화부

도면

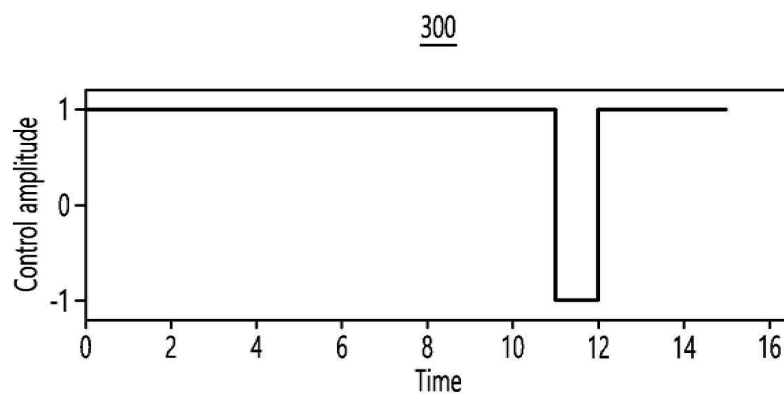
도면1



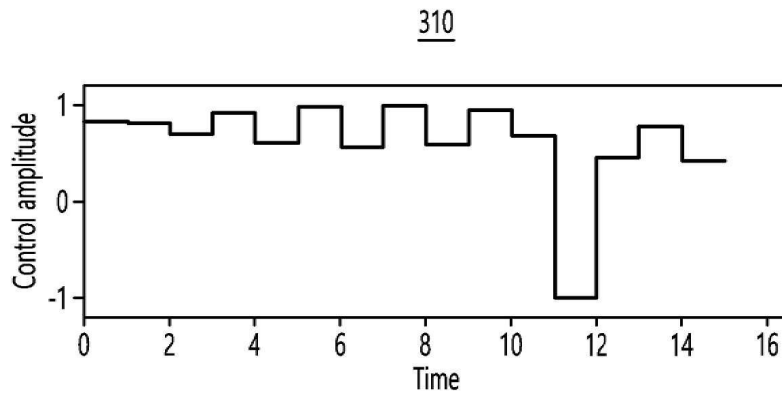
도면2



도면3a



도면3b



도면4

