(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0018909
(43) 공개일자 2024년02월14일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06N 10/60 (2022.01) *G06N 20/10* (2019.01)
G06N 3/08 (2023.01) *B82Y 10/00* (2017.01)
(52) CPC특허분류
G06N 10/60 (2022.01)
G06N 20/10 (2021.08)
(21) 출원번호 10-2022-0096831
(22) 출원일자 2022년08월03일
심사청구일자 2022년08월03일

(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 무하마드 아부자르 리즈브
경기 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교국제캠퍼스) 전자 공학 559
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
김연권

전체 청구항 수 : 총 12 항

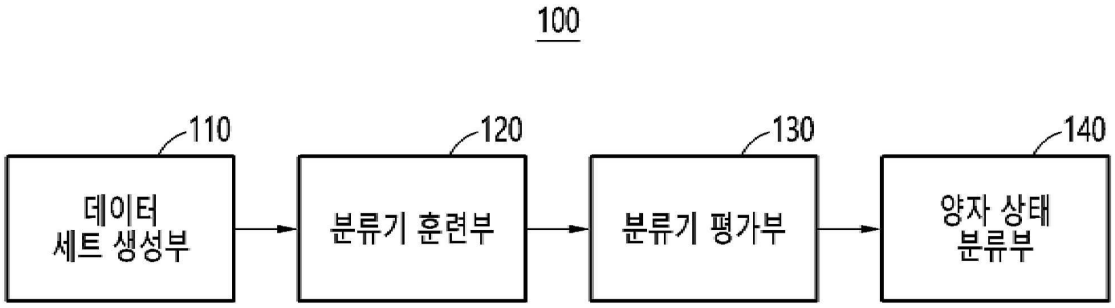
(54) 발명의 명칭 **양자 정보 통합 처리시스템에서의 양자 상태 분류 장치 및 방법**

(57) 요 약

본 발명은 양자 정보 통합 처리시스템에서의 양자 상태 분류 장치 및 방법에 관한 것으로, 기계 학습 기반 분류기 모델을 훈련하고, 훈련된 분류기 모델을 테스트하여 펄스 레벨에서 큐비트 상태를 분류하는 기술에 관한 것으로, 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 분류 장치는 큐비트(Qubit) 상태와 관련된 훈련 데이터 세트 및 평가

(뒷면에 계속)

대 표 도 - 도1



데이터 세트를 생성하는 데이터 세트 생성부, 상기 생성된 훈련 데이터 세트를 이용하여 복수의 분류기를 훈련하는 분류기 훈련부, 상기 생성된 평가 데이터 세트에 기반하여 상기 훈련된 복수의 분류기에 대한 분류 정확도의 중위수(median) 및 사분위수 범위(interquartile range)를 계산하고, 상기 계산된 분류 정확도에 기반하여 상기 복수의 분류기를 평가하는 분류기 평가부 및 상기 계산된 분류 정확도에 기반하여 상기 복수의 분류기 중 어느 하나의 분류기를 이용하여 큐비트 상태를 얽힘 상태(entangled state) 및 분리 가능한 상태(separatable state)로 분류하는 양자 상태 분류부를 포함할 수 있다.

(52) CPC특허분류
G06N 3/08 (2023.01)
B82Y 10/00 (2013.01)

(72) 발명자
아시프 네마
경기 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교국제캠퍼스) 전자 공학 559
우만 칼리드
경기도 수원시 영통구 청명남로60번길 24, B04호
울라 무하마드 아사드
경기도 수원시 영통구 청명로59번길 51, B03호 (영통동)
칸 아와이스
경기 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교국제캠퍼스) 전자 공학 559

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 ~ 2040.02.29
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
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

명 세 서

청구범위

청구항 1

큐비트(Qubit) 상태와 관련된 훈련 데이터 세트 및 평가 데이터 세트를 생성하는 데이터 세트 생성부;

상기 생성된 훈련 데이터 세트를 이용하여 복수의 분류기를 훈련하는 분류기 훈련부;

상기 생성된 평가 데이터 세트에 기반하여 상기 훈련된 복수의 분류기에 대한 분류 정확도의 중위수(median) 및 사분위수 범위(interquartile range)를 계산하고, 상기 계산된 분류 정확도에 기반하여 상기 복수의 분류기를 평가하는 분류기 평가부; 및

상기 계산된 분류 정확도에 기반하여 상기 복수의 분류기 중 어느 하나의 분류기를 이용하여 큐비트 상태를 얽힘 상태(entangled state) 및 분리 가능한 상태(separatable state)로 분류하는 양자 상태 분류부를 포함하는 것을 특징으로 하는

양자 상태 분류 장치.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 데이터 세트 생성부는 펄스 레벨 제어(pulse level control)에 기반하여 상기 큐비트(Qubit) 상태에 대하여 그라운드 상태(ground state), 여기 상태(excited state) 및 혼합 상태를 추정하고, 상기 추정된 그라운드 상태(ground state), 여기 상태(excited state) 및 혼합 상태를 무작위로 혼합(shuffle)하여 일 대일 비율로 상기 훈련 데이터 세트 및 상기 평가 데이터 세트를 생성하는 것을 특징으로 하는

양자 상태 분류 장치.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 복수의 분류기는, LDA(linear discriminant analysis) 기반 분류기, SVM(support vector machine) 기반 분류기, KNN(k-nearest neighbor) 기반 분류기, NNet(neural network) 기반 분류기 및 ANN(artificial neural network) 기반 분류기를 포함하는 것을 특징으로 하는

양자 상태 분류 장치.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 분류기 훈련부는 벨(Bell) 또는 CHSH(Clauser-Horne-Shimony-Holt) 부등식(inequality) 값을 상기 생성된 훈련 데이터 세트의 특징 벡터로 사용하여 상기 ANN(artificial neural network) 기반 분류기를 훈련하는 것을 특징으로 하는

양자 상태 분류 장치.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 특징 벡터는 큐비트의 부분 정보로서 인공 신경망(artificial neural network)에 의해 가중치로 연산되고, 벨 연산자 또는 CHSH 연산자의 얽힘 상태(entangled state) 탐지의 범위를 임의의 상태로 일반화하는 것을 특징으로 하는

양자 상태 분류 장치.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 인공 신경망은 선형 최적화 및 비선형 최적화 중 어느 하나로 구축되고, 상기 비선형 최적화로 구축되는 경우에 은닉층의 뉴런 수가 증가함에 따라 분류 정확도가 증가하는 것을 특징으로 하는

양자 상태 분류 장치.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 분류기 평가부는 상기 복수의 분류기 각각에 대하여 펄스 수준에서 큐비트 읽기 데이터를 분류하는 상기 분류 정확도와 관련하여 상기 중위수 및 상기 사분위수 범위를 계산하여 분류기의 성능들을 결정하고, 상기 결정된 분류기의 성능들을 상호 비교하여 상기 복수의 분류기를 평가하는 것을 특징으로 하는

양자 상태 분류 장치.

청구항 8

데이터 세트 생성부에서, 큐비트(Qubit) 상태와 관련된 훈련 데이터 세트 및 평가 데이터 세트를 생성하는 단계;

분류기 훈련부에서, 상기 생성된 훈련 데이터 세트를 이용하여 복수의 분류기를 훈련하는 단계;

분류기 평가부에서, 상기 생성된 평가 데이터 세트에 기반하여 상기 훈련된 복수의 분류기에 대한 분류 정확도의 중위수(median) 및 사분위수 범위(interquartile range)를 계산하고, 상기 계산된 분류 정확도에 기반하여 상기 복수의 분류기를 평가하는 단계; 및

양자 상태 분류부에서, 상기 계산된 분류 정확도에 기반하여 상기 복수의 분류기 중 어느 하나의 분류기를 이용하여 큐비트 상태를 얽힘 상태(entangled state) 및 분리 가능한 상태(separatable state)로 분류하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는

양자 상태 분류 방법.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 큐비트(Qubit) 상태와 관련된 훈련 데이터 세트 및 평가 데이터 세트를 생성하는 단계는,

펄스 레벨 제어(pulse level control)에 기반하여 상기 큐비트(Qubit) 상태에 대하여 그라운드 상태(ground state), 여기 상태(excited state) 및 혼합 상태를 추정하고, 상기 추정된 그라운드 상태(ground state), 여기 상태(excited state) 및 혼합 상태를 무작위로 혼합(shuffle)하여 일 대 일 비율로 상기 훈련 데이터 세트 및 상기 평가 데이터 세트를 생성하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는

양자 상태 분류 방법.

청구항 10

제8항에 있어서,

상기 복수의 분류기는, LDA(linear discriminant analysis) 기반 분류기, SVM(support vector machine) 기반 분류기, KNN(k-nearest neighbor) 기반 분류기, NNet(neural network) 기반 분류기 및 ANN(artificial neural network) 기반 분류기를 포함하는 것을 특징으로 하는

양자 상태 분류 방법.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 생성된 훈련 데이터 세트를 이용하여 복수의 분류기를 훈련하는 단계는,

벨(Bell) 또는 CHSH(Clauser-Horne-Shimony-Holt) 부등식(inequality) 값을 상기 생성된 훈련 데이터 세트의 특징 벡터로 사용하여 상기 ANN(artificial neural network) 기반 분류기를 훈련하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는

양자 상태 분류 방법.

청구항 12

제8항에 있어서,

상기 생성된 평가 데이터 세트에 기반하여 상기 훈련된 복수의 분류기에 대한 분류 정확도의 중위수(median) 및 사분위수 범위(interquartile range)를 계산하고, 상기 계산된 분류 정확도에 기반하여 상기 복수의 분류기를 평가하는 단계는,

상기 복수의 분류기 각각에 대하여 펄스 수준에서 큐비트 읽기 데이터를 분류하는 상기 분류 정확도와 관련하여 상기 중위수 및 상기 사분위수 범위를 계산하여 분류기의 성능들을 결정하고, 상기 결정된 분류기의 성능들을 상호 비교하여 상기 복수의 분류기를 평가하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는

양자 상태 분류 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 양자 정보 통합 처리시스템에서의 양자 상태 분류 장치 및 방법에 관한 것으로, 기계 학습 기반 분류기 모델을 훈련하고, 훈련된 분류기 모델을 테스트하여 펄스 레벨에서 큐비트 상태를 분류하는 기술에 관한 것이다. 양자 상태 분류 장치 및 방법은 양자정보기술 통합 시스템에서 양자 관측 및 분석 플랫폼의 양자 상태 측정 처리부에 적용될 수 있다.

배 경 기 술

[0002] 양자 컴퓨팅은 기존 컴퓨터로는 너무 복잡한 문제를 해결하기 위해 전례 없는 자원을 활용하는 기술로서, 빠르게 부상하고 있는 기술이다.

[0003] 양자 컴퓨터는 양자 물리학의 속성을 사용하여 데이터를 저장하고 계산을 수행한다.

[0004] 양자 중첩 및 얽힘 현상을 사용하여 양자 컴퓨터는 많은 수의 복잡한 문제를 해결할 수 있다.

[0005] 다른 가능한 입력 조합을 동시에 사용할 수 있으며 이것이 고전적인 컴퓨터에 비해 이점을 가질 수 있는 부분이다.

[0006] 양자 컴퓨터는 큐비트로 구성되며 가장 인기 있는 큐비트 방식은 IBM, Google, Regetti 및 Intel에서 개발 중인 초전도 큐비트와 관련된다.

[0007] IBM은 양자 분야의 선두 기업 중 하나로 간주되고, IBM 양자 컴퓨터는 클라우드 액세스를 통해 연구원에게 제공한다.

[0008] 최근 IBM은 펄스로 양자 컴퓨터와 상호 작용하는 방법인 Qiskit Pulse의 도움으로 소수의 양자 컴퓨터에 최고 수준의 제어에 대한 액세스를 제공했다.

[0009] 양자 회로 또는 알고리즘 실행과 같은 모든 양자 프로세스에는 (i) 상태 준비 및 초기화, (ii) 상태 진화, (iii) 상태 추정 및 측정의 세 단계가 포함한다.

[0010] 모든 양자 회로의 출력은 확률적이며 이를 결정하는 프로세스를 상태 추정 및 측정이라고 한다.

[0011] 하드웨어 수준의 IBM의 경우 기계 학습 기반 분류자가 큐비트의 상태를 결정한다.

[0012] 큐비트(qubit)는 고전 컴퓨터에는 0 또는 1이 될 수 있는 비트가 있는 반면 양자 컴퓨터에는 $|\psi\rangle$ 상태로 표시되는 큐비트가 있으며 흥미로운 점은 0과 1의 중첩에 있을 수 있다는 것이고, 큐비트는 $|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$로 표기한다.

[0013] 여기서 α와 β는 확률 진폭이고 제곱합은 1인데, 큐비트를 읽을 때 양자 상태는 확률 ||α||2의 기저 상태 |0> 및 확률 ||β||2의 여기 상태 |1>으로 붕괴된다.

[0014] 모든 양자 계산이 끝나면 이러한 확률 진폭이 결정되며 이 프로세스를 큐비트 상태 추정이라고 한다.

[0015] IBM의 초전도 양자 컴퓨터는 특정 유형의 초전도 큐비트를 이용하고, 에너지 스펙트럼에서 바닥 에너지 준위를 |0>이고, 들뜬 에너지 준위를 |1>로 표기한다.

[0016] Qiskit Pulse는 고전 프로그램과 마찬가지로 양자 프로그램은 고급 프로그래밍에서 어셈블리 언어에 이르는 컴파일 과정을 거친다.

[0017] 그러나 고전과 달리 양자 하드웨어는 아날로그 펄스로 제어되고, 양자 컴파일러의 4단계는 (i) 프로그래밍 언어, (ii) 어셈블리 언어, (iii) 게이트, (iv) 펄스 일정으로 나타낼 수 있다.

[0018] 양자 컴퓨터에서 최상의 성능을 추출하려면 표준 회로 모델로는 할 수 없는 펄스 수준 제어가 필요하고, 파이썬 키트인 Qiskit Pulse는 양자 프로그램을 시간에 따라 예약된 펄스의 시퀀스로 설명할 수 있는 이러한 목적을 위해 정밀하게 개발되었다.

[0019] 펄스 코딩은 잡음을 줄이고 동적 디커플링을 적용하며 양자 컴퓨터에서 최적의 제어를 수행하는 다양한 방법을 탐색하는 데 도움이 될 수 있다.

[0020] 예를 들어 특정 진폭과 지속 시간의 가우시안 펄스를 보내 큐비트를 기저 상태 |0>에서 여기 상태 |1>으로 또는 그 반대로 이동할 수 있다.

[0021] 얽힘은 양자 정보 처리 작업에서 양자 이점을 나타내는 필수 리소스임에 따라 양자 상태에서 얽힘을 안정적으로 감지하는 것은 중요하다.

[0022] 양자 상태 측정 처리 뿐만 아니라, 관련된 기술의 구현 및 연구를 지원하기 위한 다양한 양자 정보 처리를 지원할 수 있는 양자 정보 통합 시스템이 필요하다.

선행기술문헌

특허문헌

[0023] (특허문헌 0001) 한국공개특허 제10-2022-0047128호, "양자회로 에러 보정 방법 및 그 장치"

(특허문헌 0002) 한국공개특허 제10-2022-0040460호, "양자 컴퓨팅 디바이스를 위한 파이프라인형 하드웨어 디코더"

(특허문헌 0003) 미국공개특허 제2021/0398007호, "QUANTUM PROCESSING SYSTEM"

(특허문헌 0004) 한국공개특허 제10-2021-0084222호, "양자화된 수렴 방향 기반의 광선 분류 장치 및 방법"

발명의 내용

해결하려는 과제

[0024] 본 발명은 기계 학습 기반 분류기 모델을 훈련하고, 훈련된 분류기 모델을 테스트하여 펄스 레벨에서 큐비트 상태를 분류하는 양자 상태 분류 장치 및 방법 제공하는 것을 목적으로 한다.

[0025] 본 발명은 큐비트 상태 추정을 위한 하드웨어의 다양한 기계 학습 기반의 분류기(classifier)의 성능을 평가하여 우수한 성능의 분류기를 선별하여 양자 상태 분류의 성능을 향상시키는 것을 목적으로 한다.

[0026] 본 발명은 IBM 양자 컴퓨터에서 시연된 큐비트 판독을 위한 다양한 기계 학습 기본 분류기를 계산, 플롯 및 비교하기 위한 파이썬 기반 플랫폼 설계를 제공하는 것을 목적으로 한다.

[0027] 본 발명은 벨(Bell) 또는 CHSH(Clauser-Horne-Shimony-Holt) 부등식(inequality)과 같은 전통적인 얽힘을 감지하는 방법에 기반하여 임의의 이분 상태에 대한 얽힘 분리가능한 ANN(artificial neural network) 기반 분류기로 제공하는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0028] 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 분류 장치는 큐비트(Qubit) 상태와 관련된 훈련 데이터 세트 및 평가 데이터 세트를 생성하는 데이터 세트 생성부, 상기 생성된 훈련 데이터 세트를 이용하여 복수의 분류기를 훈련하는 분류기 훈련부, 상기 생성된 평가 데이터 세트에 기반하여 상기 훈련된 복수의 분류기에 대한 분류 정확도의 중위수(median) 및 사분위수 범위(interquartile range)를 계산하고, 상기 계산된 분류 정확도에 기반하여 상기 복수의 분류기를 평가하는 분류기 평가부 및 상기 계산된 분류 정확도에 기반하여 상기 복수의 분류기 중 어느 하나의 분류기를 이용하여 큐비트 상태를 얽힘 상태(entangled state) 및 분리 가능한 상태(separatable state)로 분류하는 양자 상태 분류부를 포함할 수 있다.

[0029] 상기 데이터 세트 생성부는 펄스 레벨 제어(pulse level control)에 기반하여 상기 큐비트(Qubit) 상태에 대하여 그라운드 상태(ground state), 여기 상태(excited state) 및 혼합 상태를 추정하고, 상기 추정된 그라운드 상태(ground state), 여기 상태(excited state) 및 혼합 상태를 무작위로 혼합(shuffle)하여 일 대일 비율로 상기 훈련 데이터 세트 및 상기 평가 데이터 세트를 생성할 수 있다.

[0030] 상기 복수의 분류기는, LDA(linear discriminant analysis) 기반 분류기, SVM(support vector machine) 기반 분류기, KNN(k-nearest neighbor) 기반 분류기, NNet(neural network) 기반 분류기 및 ANN(artificial neural network) 기반 분류기를 포함할 수 있다.

[0031] 상기 분류기 훈련부는 벨(Bell) 또는 CHSH(Clauser-Horne-Shimony-Holt) 부등식(inequality) 값을 상기 생성된 훈련 데이터 세트의 특징 벡터로 사용하여 상기 ANN(artificial neural network) 기반 분류기를 훈련할 수 있다.

[0032] 상기 특징 벡터는 큐비트의 부분 정보로서 인공 신경망(artificial neural network)에 의해 가중치로 연산되고, 벨 연산자 또는 CHSH 연산자의 얽힘 상태(entangled state) 탐지의 범위를 임의의 상태로 일반화할 수 있다.

[0033] 상기 인공 신경망은 선형 최적화 및 비선형 최적화 중 어느 하나로 구축되고, 상기 비선형 최적화로 구축되는 경우에 은닉층의 뉴런 수가 증가함에 따라 분류 정확도가 증가할 수 있다.

[0034] 상기 분류기 평가부는 상기 복수의 분류기 각각에 대하여 펄스 수준에서 큐비트 읽기 데이터를 분류하는 상기 분류 정확도와 관련하여 상기 중위수 및 상기 사분위수 범위를 계산하여 분류기의 성능들을 결정하고, 상기 결정된 분류기의 성능들을 상호 비교하여 상기 복수의 분류기를 평가할 수 있다.

[0035] 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 분류 방법은 데이터 세트 생성부에서, 큐비트(Qubit) 상태와 관련된 훈련 데이터 세트 및 평가 데이터 세트를 생성하는 단계, 분류기 훈련부에서, 상기 생성된 훈련 데이터 세트를 이용하여 복수의 분류기를 훈련하는 단계, 분류기 평가부에서, 상기 생성된 평가 데이터 세트에 기반하여 상기 훈련된 복수의 분류기에 대한 분류 정확도의 중위수(median) 및 사분위수 범위(interquartile range)를 계산하고, 상기 계산된 분류 정확도에 기반하여 상기 복수의 분류기를 평가하는 단계 및 양자 상태 분류부에서, 상기 계산된 분류 정확도에 기반하여 상기 복수의 분류기 중 어느 하나의 분류기를 이용하여 큐비트 상태를 얽힘 상태(entangled state) 및 분리 가능한 상태(separatable state)로 분류하는 단계를 포함할 수 있다.

[0036] 상기 큐비트(Qubit) 상태와 관련된 훈련 데이터 세트 및 평가 데이터 세트를 생성하는 단계는, 펄스 레벨 제어(pulse level control)에 기반하여 상기 큐비트(Qubit) 상태에 대하여 그라운드 상태(ground state), 여기 상태(excited state) 및 혼합 상태를 추정하고, 상기 추정된 그라운드 상태(ground state), 여기 상태(excited state) 및 혼합 상태를 무작위로 혼합(shuffle)하여 일 대일 비율로 상기 훈련 데이터 세트 및 상기 평가 데이터 세트를 생성하는 단계를 포함할 수 있다.

[0037] 상기 복수의 분류기는, LDA(linear discriminant analysis) 기반 분류기, SVM(support vector machine) 기반 분류기, KNN(k-nearest neighbor) 기반 분류기, NNet(neural network) 기반 분류기 및 ANN(artificial neural network) 기반 분류기를 포함할 수 있다.

[0038] 상기 생성된 훈련 데이터 세트를 이용하여 복수의 분류기를 훈련하는 단계는, 벨(Bell) 또는 CHSH(Clauser-Horne-Shimony-Holt) 부등식(inequality) 값을 상기 생성된 훈련 데이터 세트의 특징 벡터로 사용하여 상기 ANN(artificial neural network) 기반 분류기를 훈련하는 단계를 포함할 수 있다.

[0039] 상기 생성된 평가 데이터 세트에 기반하여 상기 훈련된 복수의 분류기에 대한 분류 정확도의 중위수(median) 및

사분위수 범위(interquartile range)를 계산하고, 상기 계산된 분류 정확도에 기반하여 상기 복수의 분류기를 평가하는 단계는, 상기 복수의 분류기 각각에 대하여 펄스 수준에서 큐비트 읽기 데이터를 분류하는 상기 분류 정확도와 관련하여 상기 중위수 및 상기 사분위수 범위를 계산하여 분류기의 성능들을 결정하고, 상기 결정된 분류기의 성능들을 상호 비교하여 상기 복수의 분류기를 평가하는 단계를 포함할 수 있다.

발명의 효과

[0040] 본 발명은 본 발명은 기계 학습 기반 분류기 모델을 훈련하고, 훈련된 분류기 모델을 테스트하여 펄스 레벨에서 큐비트 상태를 분류하는 양자 상태 분류 장치 및 방법 제공할 수 있다.

[0041] 본 발명은 큐비트 상태 추정을 위한 하드웨어의 다양한 기계 학습 기반의 분류기(classifier)의 성능을 평가하여 우수한 성능의 분류기를 선별하여 양자 상태 분류의 성능을 향상시킬 수 있다.

[0042] 본 발명은 IBM 양자 컴퓨터에서 시연된 큐비트 판독을 위한 다양한 기계 학습 기본 분류기를 계산, 플롯 및 비교하기 위한 파이썬 기반 플랫폼 설계를 제공할 수 있다.

[0043] 본 발명은 벨(Bell) 또는 CHSH(Clauser-Horne-Shimony-Holt) 부등식(inequality)과 같은 전통적인 얽힘을 감지하는 방법에 기반하여 임의의 이분 상태에 대한 얽힘 분리가능한 ANN(artificial neural network) 기반 분류기로 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0044] 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 분류 장치를 설명하는 도면이다.

도 2는 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 분류 장치에서 데이터 세트를 생성하기 위한 상태에 대한 IQ 플롯(plot)을 설명하는 도면이다.

도 3은 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 분류 장치에서 분류기 평가부에 의한 정확도 평가 결과를 설명하는 도면이다.

도 4a 및 도 4b는 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 분류 장치에서 분류기 훈련부에 의해 훈련된 ANN(artificial neural network) 모델을 설명하는 도면이다.

도 4c는 본 발명의 일실시예에 따른 ANN 모델에 대한 정확도 평가 결과를 설명하는 도면이다.

도 5는 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 분류 방법을 설명하는 도면이다.

도 6은 본 발명의 실시예에 따른 반사실적 얽힘 분배(Counterfactual Entanglement Distribution) 모델을 설명하기 위한 도면이다.

도 7은 본 발명의 실시예에 따른 제어된 양자 순간이동의 개념을 나타내는 도면이다.

도 8은 본 발명의 실시예에 따른 제어된 반사실적 양자 순간이동 지원 장치의 동작을 나타내는 흐름도이다.

도 9는 큐비트 전송에서 QST를 수행하기 위한 메커니즘을 설명하는 도면이다.

도 10은 순수 상태들 (a)과 혼합 상태들 (b)에 대한 재구성 상태와 실제 상태 의 Log 부정확도(infidelity)를 나타낸다.

도 11은 본 발명의 일실시예에 따른 단층 촬영 장치의 블록도이다.

도 12는 본 발명의 실시예에 따른 양자정보기술 통합 시스템을 나타내는 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0045] 이하, 본 문서의 다양한 실시 예들이 첨부된 도면을 참조하여 기재된다.

[0046] 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.

[0047] 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.

[0048] 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.

[0049] 도면의 설명과 관련하여, 유사한 구성요소에 대해서는 유사한 참조 부호가 사용될 수 있다.

[0050] 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함할 수 있다.

[0051] 본 문서에서, "A 또는 B" 또는 "A 및/또는 B 중 적어도 하나" 등의 표현은 함께 나열된 항목들의 모든 가능한 조합을 포함할 수 있다.

[0052] "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.

[0053] 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.

[0054] 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.

[0055] 어떤 상황에서는, "~하도록 구성된 장치"라는 표현은, 그 장치가 다른 장치 또는 부품들과 함께 "~할 수 있는" 것을 의미할 수 있다.

[0056] 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.

[0057] 또한, '또는' 이라는 용어는 배타적 논리합 'exclusive or' 이기보다는 포함적인 논리합 'inclusive or' 를 의미한다.

[0058] 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.

[0059] 이하 사용되는 '..부', '..기' 등의 용어는 적어도 하나의 기능이나 동작을 처리하는 단위를 의미하며, 이는 하드웨어나 소프트웨어, 또는, 하드웨어 및 소프트웨어의 결합으로 구현될 수 있다.

[0061] 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 분류 장치를 설명하는 도면이다.

[0062] 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 분류 장치의 구성 요소를 예시한다.

[0063] 도 1을 참고하면, 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 분류 장치(100)는 데이터 세트 생성부(110), 분류기 훈련부(120), 분류기 평가부(130) 및 양자 상태 분류부(140)를 포함한다.

[0064] 일례로, 데이터 세트 생성부(110)는 큐비트 상태와 관련된 훈련 데이터 세트 및 평가 데이터 세트를 생성한다.

[0065] 본 발명의 일실시예에 따르면 데이터 세트 생성부(110)는 레이블이 지정된 데이터 세트와 관련하여 그라운드 상태 및 여기 상태에서 큐비트의 원시 동위상 및 직교 출력 값을 측정하여 훈련 데이터 세트 및 평가 데이터 세트를 생성할 수 있다.

[0066] 일례로, 데이터 세트 생성부(110)는 펄스 레벨 제어(pulse level control)에 기반하여 큐비트(Qubit) 상태에 대하여 그라운드 상태(ground state), 여기 상태(excited state) 및 혼합 상태를 추정한다.

[0067] 또한, 데이터 세트 생성부(110)는 추정된 그라운드 상태(ground state), 여기 상태(excited state) 및 혼합 상태를 무작위로 혼합(shuffle)하여 일 대일 비율로 훈련 데이터 세트 및 평가 데이터 세트를 생성할 수 있다.

[0068] 본 발명의 일실시예에 따르면 데이터 세트 생성부(110)는 큐비트를 그라운드 상태(ground state)에서 준비하고, 다른 작업을 수행하지 않고 Qiskit Pulse를 사용하여 펄스 레벨(레벨 1 측정)을 사용하여 큐비트를 측정한다.

[0069] 다음으로, 데이터 세트 생성부(110)는 측정된 큐비트에 기반하여 형상 데이터 집합의 역할을 하는 출력파(outputwave)의 동상(in-phase) 및 직교(quadrature) 성분(component) 을 확보한다.

[0070] 이후, 데이터 세트 생성부(110)는 큐비트를 여기 상태로 만든 후, 측정된 큐비트에 기반하여 형상 데이터 집합의 역할을 하는 출력파(outputwave)의 동상(in-phase) 및 직교(quadrature) 성분(component) 을 확보한다.

[0071] 이에 따라, 데이터 세트 생성부(110)는 그라운드 상태 및 여기 상태 각각에 대하여 1024회 샷을 확보하여 총 2048회 샷을 확보하고, 랜덤 셔플 이후에 50%는 훈련 데이터 세트로, 50%는 테스트 데이터 세트로 생성한다.

[0072] 본 발명의 일실시예에 따르면 분류기 훈련부(120)는 데이터 세트 생성부(110)에 의해 생성된 훈련 데이터 세트를 이용하여 복수의 분류기를 훈련한다.

[0073] 예를 들어, 복수의 분류기는 LDA(linear discriminant analysis) 기반 분류기, SVM(support vector machine) 기반 분류기, KNN(k-nearest neighbor) 기반 분류기, NNet(neural network) 기반 분류기 및 ANN(artificial neural network) 기반 분류기를 포함할 수 있다.

[0074] 일례로, 분류기 훈련부(120)는 벨(Bell) 또는 CHSH(Clauser-Horne-Shimony-Holt) 부등식(inequality) 값을 훈련 데이터 세트의 특징 벡터로 사용하여 ANN 기반 분류기를 훈련할 수 있다.

[0075] 예를 들어, 특징 벡터는 큐비트의 부분 정보로서 인공 신경망(artificial neural network)에 의해 가중치로 연산 되고, 벨 연산자 또는 CHSH 연산자의 얽힘 상태(entangled state) 탐지의 범위를 임의의 상태로 일반화할 수 있다.

[0076] 예를 들어, 인공 신경망은 선형 최적화 및 비선형 최적화 중 어느 하나로 구축되고, 상기 비선형 최적화로 구축되는 경우에 은닉층의 뉴런 수가 증가함에 따라 분류 정확도가 증가할 수 있다.

[0077] 본 발명의 일실시예에 따르면 분류기 평가부(130)는 데이터 세트에 기반하여 훈련된 복수의 분류기에 대한 분류 정확도의 중위수(median) 및 사분위수 범위(interquartile range)를 계산하고, 계산된 분류 정확도에 기반하여 복수의 분류기를 평가할 수 있다.

[0078] 일례로, 분류기 평가부(130)는 분류기가 훈련되면, 정확도를 측정 기준으로 사용하여 기계 학습 방법의 성능을 평가한다.

[0079] 분류기 평가부(130)는 복수의 분류기 각각에 대하여 펄스 수준에서 큐비트 읽기 데이터를 정확하게 분류하는 능력에 대한 근사치를 얻기 위해 중위수와 사분위 간 정확도 범위를 계산한다.

[0080] 일례로, 분류기 평가부(130)는 가장 높은 중위수 값과 가장 작은 사분위수 범위를 갖는 분류기에 대하여 가장 높은 정확도 점수로 계산한다.

[0081] 중위수 값은 평균 성능을 나타내고, 사분위수 범위는 최고의 정확도와 최저의 정확도의 범위와 관련됨에 따라 중위수와 사분위수 범위의 조합은 분류기의 성능 판단에 활용될 수 있다.

[0082] 본 발명의 일실시예에 따르면 분류기 평가부(130)는 복수의 분류기 각각에 대하여 펄스 수준에서 큐비트 읽기 데이터를 분류하는 분류 정확도와 관련하여 중위수 및 사분위수 범위를 계산하여 분류기의 성능들을 결정하고, 결정된 분류기의 성능들을 상호 비교하여 복수의 분류기를 평가할 수 있다.

[0083] 본 발명의 일실시예에 따르면 양자 상태 분류부(140)는 분류기 평가부(130)에서 계산된 분류 정확도에 기반하여 복수의 분류기 중 어느 하나의 분류기를 이용하여 큐비트 상태를 얽힘 상태(entangled state) 및 분리 가능한 상태(separatable state)로 분류할 수 있다.

[0084] 즉, 양자 상태 분류부(140)는 복수의 기계 학습 모델 기반 분류기 중에 대하여 평가를 진행한 후, 평가 결과에 기반하여 상대적으로 우수한 성능을 갖는 분류기를 선택하고, 선택된 분류기에 기반하여 양자 상태를 분류함에 따라 기존 양자 상태의 분류와 관련된 부정확도 관련된 단점을 개선한다.

[0085] 따라서, 본 발명은 본 발명은 기계 학습 기반 분류기 모델을 훈련하고, 훈련된 분류기 모델을 테스트하여 펄스 레벨에서 큐비트 상태를 분류하는 양자 상태 분류 장치 및 방법 제공할 수 있다.

[0087] 도 2는 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 분류 장치에서 데이터 세트를 생성하기 위한 상태에 대한 IQ 플롯(plot)을 설명하는 도면이다.

[0088] 도 2를 참고하면, 그래프(200)는 가로축에서 Q 그리고, 세로축에서 I를 나타내며, 이는 측정 레벨 1을 사용하여 그라운드(ground) 상태 |0> 및 여기(excited) 상태 |1>을 측정하는 1024개의 트레일에 대한 IQ 플롯일 수 있다.

[0089] 이것은 Qiskit Pulse를 사용하는 IBM 양자 컴퓨터에서 수행되고, 큐비트는 IBM 양자 컴퓨터의 기본 상태이기도 한 기본 상태인 기본 상태 |0>에서 먼저 준비되며 다른 작업을 수행하지 않고 측정 레벨 1 설정을 사용하여 상태를 측정한다.

[0090] Qiskit Pulse에서 복잡한 값을 얻습니다. 이는 각 큐비트 상태에 대한 기능을 제공한다.

[0091] 이것은 그라운드 상태 |0> 데이터 세트를 생성하기 위해 1024개의 트레일에 대해 수행되고, 그라운드 상태 |0>에서 여기 상태 |1>까지 큐비트를 취한 다음 레벨 1 측정 설정을 사용하여 큐비트 상태를 다시 측정하는 가우시안 펄스가 적용된다.

[0092] 이것은 1024개의 트레일에 대해서도 반복되어 여기 상태 |1> 데이터 세트를 생성하고, 전체 데이터 세트에서 두 개의 알고 있는 상태는 실제 레이블이 되고 동위상 및 구적 구성 요소는 기능이 된다.

[0093] IBM 양자 컴퓨터에서 Qiskit Pulse를 사용하면 원시 형식의 양자 계산 출력에 액세스할 수 있다.

[0094] 양자 알고리즘의 실행이 완료되면 판독 채널에 판독 펄스가 전송되고 큐비트의 에너지 상태를 측정하는 해당 신호가 획득 채널에 기록된다.

[0095] 전체 획득 기간 동안 기록된 신호가 합산되고 동위상 및 직교(IQ) 구성요소로 구성된 단일 복소수 값이 반환되며 이는 그래프(200)와 같다.

[0096] 그래프(200)의 결과는 Qiskit Pulse의 측정 레벨 1을 사용하여 수행되고, 출력이 확률적이므로 양호하고 신뢰할 수 있는 확률 분포를 얻으려면 단일 실험에 여러 샷이 필요하다.

[0097] IBM이 허용하는 최대 샷 수는 8192개인데, 이러한 다중 IQ 값을 사용하여 큐비트의 상태를 결정할 수 있다.

[0098] 큐비트의 상태 추정은 기본적으로 확률 진폭 값을 결정한다.

[0099] 기계 학습 기반 분류기는 IQ 평면에서 결정 경계를 만드는 데 사용되며 큐비트가 그라운드 상태 |0>, 여기 상태 |1> 또는 중첩 상태 |ψ>에 있는지 여부를 결정하는 데 도움이 된다.

[0100] Qiskit Pulse 및 Python 프로그래밍 언어를 사용하여 고급 및 더 나은 분류기를 기존 컴퓨터에서 설계하고 양자 컴퓨터에서 사용할 수 있다.

[0101] 따라서, 본 발명은 큐비트 상태 추정을 위한 하드웨어의 다양한 기계 학습 기반의 분류기(classifier)의 성능을 평가하여 우수한 성능의 분류기를 선별하여 양자 상태 분류의 성능을 향상시킬 수 있다.

[0102] 또한, 본 발명은 IBM 양자 컴퓨터에서 시연된 큐비트 판독을 위한 다양한 기계 학습 기본 분류기를 계산, 플롯 및 비교하기 위한 파이썬 기반 플랫폼 설계를 제공할 수 있다.

[0104] 도 3은 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 분류 장치에서 분류기 평가부에 의한 정확도 평가 결과를 설명하는 도면이다.

[0105] 도 3을 참고하면, 그래프(300)는 양자 상태 분류 장치에서 분류기 평가부에 의한 정확도 평가 결과를 기계 학습 종류에 따라 예시한다.

[0106] 그래프(300)에서는 LDA, SVM, KNN 및 NNet 기반 분류기의 정확도를 예시한다.

[0107] 정확도, 재현율, 정밀도, F1 점수 등과 같은 분류기의 성능을 판단하는 방법에는 여러 가지가 있으며 여기서는 정확도를 사용했다.

[0108] 테스트 데이터를 사용하여 모든 분류기의 정확도가 계산된다.

[0109] 분류기 성능에 대한 더 나은 근사치를 얻기 위해 훈련 및 테스트 프로세스가 각각 새로운 데이터 세트로 10회 반복된다.

[0110] 사용된 값에는 정확도의 중위수와 정확도의 사분위수 범위(interquartile range, IQR)(75번째 백분위수 - 25번째 백분위수)가 포함된다.

[0111] 분류기의 정확도는 하기 표 1과 같이 정리할 수 있다.

표 1

[0113]

분류기	중위수(Median)	사분위수 범위
LDA	0.9594	0.0090
SVM	0.9594	0.0056
KNN	0.9541	0.0065
NNet	0.9580	0.0068

[0114] LDA 및 SVM과 같은 간단한 수학적 모델을 사용하는 분류기는 중간 정확도와 거의 선형에 가까운 결정 경계로 우수한 성능을 제공한다.

[0115] KNN의 경우 훈련 데이터 외부의 데이터 세트 예측에서 뒤처져 상대적으로 나쁜 성능을 제공하는 과적합된 비선형 결정 경계를 만들었다.

[0116] NNet의 경우 학습할 때마다 무작위로 가중치를 초기화하면 기능 세트가 신경망이 잠재력을 최대한 탐색하기에 너무 복잡하지 않다는 사실과 함께 혼합된 성능을 제공한다.

[0117] 정확도의 IQR 측면에서 성능을 보면 SVM은 SVM이 이 특정 유형의 동위상 및 구적 기능 데이터 세트에서 여러 훈련 및 테스트 추적에서 성능을 유지한다는 것을 보여주는 더 작은 전체 확산으로 더 나은 결과를 제공한다.

[0118] 이는 IBM 양자 컴퓨터가 분류기와 함께 매일 보정되기 때문에 중요함에 따라 큐비트 상태 추정을 위한 분류기로 SVM을 사용하면 작은 개선으로도 상당한 도움이 될 수 있는 이미 잡음이 많은 양자 컴퓨터에서 더 나은 결과를 얻는 데 도움이 될 수 있다.

[0120] 도 4a 및 도 4b는 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 분류 장치에서 분류기 훈련부에 의해 훈련된 ANN(artificial neural network) 모델을 설명하는 도면이다.

[0121] 도 4a는 ANN 모델의 선형 최적화를 예시하고, 도 4b는 ANN 모델의 비선형 최적화를 예시한다.

[0122] ANN 모델(400)에서 x_0는 편향 뉴런을 나타내고, x_1 내지 x_4는 입력 뉴런을 나타내고, y_1은 출력 뉴런을 나타낸다.

[0123] ANN 모델(410)에서 x_0는 편향 뉴런을 나타내고, x_1 내지 x_4는 입력 뉴런을 나타내고, h_1 내지 h_i는 은닉 뉴런을 나타내며, y_1은 출력 뉴런을 나타낸다.

[0124] ANN 모델(400)은 은닉층이 없는 가중치의 선형 최적화이고, ANN 모델(410)은 은닉층이 도입된 가중치의 비선형 최적화이다.

[0125] 벨(Bell) 또는 CHSH(Clauser-Horne-Shimony-Holt) 부등식(inequality)을 양자 상태 분류기인 ANN 모델 기반 분류기로 훈련하기 위해서 양자 상태를 하기 수학식 1과 같이 분리할 수 있다.

[0127] [수학식 1]

[0128]
$$\rho_{\text{sep}} = \sum_i p_i \rho_i^1 \otimes \rho_i^2 \otimes \rho_i^3 \otimes \ldots \otimes \rho_i^n$$

[0130] 수학식 1에서, p_{sep}는 분리된 양자 상태를 나타낼 수 있는데, p_i는 0보다 크거나 같고, 1보다 작거나 같고, 수학식 1에서 p_i는 1에 수렴한다. 그렇지 않으면 양자 상태가 얽힌다.

[0131] 부분 정보에서의 얽힘 감지와 관련하여 벨 부등식을 하기 수학식 2로 일반화하는 것을 고려할 수 있다.

[0133] [수학식 2]

[0134] $$\langle ab\rangle - \langle ab'\rangle + \langle a'b\rangle + \langle a'b'\rangle \geq 2$$

[0136] 수학식 2에서, <.>는 기대치를 나타내고 {a, a'} 및 {b, b'}는 A(Alice)와 B(Bob)이라는 두 관련 당사자의 감지기 설정일 수 있다.

[0137] 얽힌 상태와 분리 가능한 상태의 경우에 벨의 부등식 값을 부분 정보로 사용할 수 있다.

[0138] 이 부등식은 다음과 같은 문제로 인해 얽힘 감지를 위한 신뢰할 수 있는 도구로 직접 활용될 수 없다.

[0139] 부등식을 위반하지 않는 순수한 얽힌 상태를 수학식 3과 같이 정의할 수 있다.

[0141] [수학식 3]

[0142] $$|\psi_-\rangle = (|00\rangle - |11\rangle)/\sqrt{2}$$

[0144] 수학식 3에서 Ψ는 양자 상태를 나타낼 수 있고, 다음으로, 수학식 4와 같이 얽혀 있지만 부등식을 위반하지 않는 순수 얽힌 상태와 측정 각도에 따라 다른 양자 상태가 고려된다.

[0146] [수학식 4]

[0147] $$|\psi_{\theta,\phi}\rangle = \cos(\theta/2)\,|00\rangle + e^{\iota\phi}\sin(\theta/2)\,|11\rangle$$

[0149] 수학식 4에서, Ψ는 양자 상태를 나타낼 수 있고, (Θ, Φ)의 임의 값에 대해 앞서 언급한 얽힌 상태는 더 이상 고정된 측정 기준에서 부등식을 위반하지 않는다.

[0150] 더욱이 이 기준은 혼합 상태 얽힘 감지에 대한 효율성을 제한하는 노이즈에서 강력하지 않다.

[0151] 요약하자면, 원래 CHSH 부등식은 이분법 얽힘의 탐지를 위한 신뢰할 수 있는 도구로 활용될 수 없습니다.

[0152] 앞서 언급한 한계를 극복하기 위해 우리는 지도 머신 러닝 기술, 즉 인공 신경망을 사용할 것입니다.

[0153] 원래 CHSH 연산자는 수학식 5로 정의할 수 있다.

[0155] [수학식 5]

[0156] $$\prod_{\text{CHSH}} = a_0b_0 - a_0b_0' + a_0'b_0 + a_0'b_0' - 2.$$

[0158] 수학식 5에서의 변수를 파울리 연산자(Pauli operator)로 변환할 수 있는데, a_0는 σ_z이고, a'_0는 σ_x이며, b_0는 σ_z를 σ_x에서 제외한 값을 $\sqrt{2}$로 나눈 값이며, b'_0는 σ_x와 σ_z를 합한 값을 $\sqrt{2}$로 나눈 값일 수 있다.

[0159] 이 연산자는 벡터(1,-1, 1, 1, -2)를 고정 가중치 벡터로 포함할 수 있고, 머신 러닝 모델의 학습에 사용할 특징 벡터로 활용될 수 있다.

[0160] 수학식 5에 대하여 가중치를 적용하면 하기 수학식 6과 같이 표현할 수 있다.

[0162] [수학식 6]

[0163] $$\prod_{\mathrm{ML}} = w_1 a_0 b_0 + w_2 a_0 b_0' + w_3 a_0' b_0 + w_4 a_0' b_0' + w_0$$

[0165] 기대값{<a_0b_0>, <$a_0b'_0$>, <a'_0b_0>, <$a'_0b'_0$>}은 입력 특성으로 사용되고, 가중치는 무작위로 초기화되고 학습 프로세스 전반에 걸쳐 훈련될 수 있다.

[0166] 데이터의 레이블링은 긍정적인 부분 전치(positive partial transpose, PPT) 기준에 의해 결정되고, 마지막으로 CHSH 얽힘 감지 범위를 임의의 상태로 일반화하는 인공 신경망에 의해 최적화된 가중치를 얻을 수 있다.

[0167] 분류기의 정확도를 은닉층의 뉴런 수의 함수로 묘사하고, 양자 상태 제품군에 대한 훈련 데이터를 하기 수학식 7과 같이 도출할 수 있다.

[0169] [수학식 7]

[0170] $$\rho_{\theta,\phi} = p\,|\psi_{\theta,\phi}\rangle\langle\psi_{\theta,\phi}| + (1-p)\pi_2$$

[0172] 수학식 7에서 p는 가산 잡음을 나타낼 수 있고, $|\Psi_{\theta,\Phi}\rangle$는 상기 수학식 4를 통해서 정의된다.

[0173] 도 4c는 본 발명의 일실시예에 따른 ANN 모델에 대한 정확도 평가 결과를 설명하는 도면이다.

[0174] 도 4c를 참고하면, 그래프(420)는 도 4b의 은닉층의 수에 따른 ANN 모델 기반의 분류기의 정확도를 예시한다.

[0175] 그래프(420)는 은닉층의 뉴런 수가 증가함에 따라 정확도가 증가하는 것을 나타낸다.

[0176] 특정 숫자 이후에는 정확도가 향상되지 않음에 따라 은닉층은 20 개의 뉴런이 있는 모델을 고려하면 약 91%의 정확도가 확보될 수 있다.

[0177] 따라서, 본 발명은 벨(Bell) 또는 CHSH(Clauser-Horne-Shimony-Holt) 부등식(inequality)과 같은 전통적인 얽힘을 감지하는 방법에 기반하여 임의의 이분 상태에 대한 얽힘 분리가능한 ANN(artificial neural network) 기반 분류기로 제공할 수 있다.

[0178] 클래스 추정이 필요한 큐비트의 부분정보 추출을 수행하고, 큐비트의 양자 상태를 알려주는 레이블을 출력하는 훈련된 ANN 기반 분류기에 제공될 수 있다.

[0179] 본 발명은 큐비트 읽기 오류(qubit readout errors)를 줄이고, 양자 알고리즘에 대한 상태의 효율적인 분류 및 양자 컴퓨팅, 양자 오류 수정 및 양자 기계 학습의 적용을 위한 큐비트의 얽힘을 감지하는 양자 기술을 제공할 수 있다.

[0180] 본 발명은 전체 밀도 행렬 대신 양자 상태의 부분 정보를 활용하고, 양자 상태 분류를 위한 얽힘을 쉽게 감지할 수 있도록 ANN 모델을 사용한 분류기 설계가 가능하다.

[0182] 도 5는 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 분류 방법을 설명하는 도면이다.

[0183] 도 5는 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 분류 방법이 기계 학습 기반 분류기 모델을 훈련하고, 훈련된 분류기 모델을 테스트하여 펄스 레벨에서 큐비트 상태를 분류하는 실시예를 예시한다.

[0184] 도 5를 참고하면, 단계(501)에서 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 분류 방법은 큐비트 상태와 관련된 훈련 및 평가 데이터 세트를 생성한다.

[0185] 즉, 양자 상태 분류 방법은 펄스 레벨 제어(pulse level control)에 기반하여 큐비트(Qubit) 상태에 대하여 그라운드 상태(ground state), 여기 상태(excited state) 및 혼합 상태를 추정하고, 추정된 그라운드 상태(ground state), 여기 상태(excited state) 및 혼합 상태를 무작위로 혼합(shuffle)하여 일 대일 비율로 훈련 데이터 세트 및 평가 데이터 세트를 생성할 수 있다.

[0186] 단계(502)에서 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 분류 방법은 훈련 데이터 세트를 이용하여 복수의 분류기를 훈련한다.

[0187] 즉, 양자 상태 분류 방법은 훈련 데이터 세트를 이용하여 LDA(linear discriminant analysis) 기반 분류기, SVM(support vector machine) 기반 분류기, KNN(k-nearest neighbor) 기반 분류기, NNet(neural network) 기반 분류기 및 ANN(artificial neural network) 기반 분류기를 포함하는 복수의 분류기를 학습한다.

[0188] 단계(503)에서 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 분류 방법은 평가 데이터 세트를 이용하여 복수의 분류기를 평가한다.

[0189] 즉, 양자 상태 분류 방법은 복수의 분류기 각각에 대하여 펄스 수준에서 큐비트 읽기 데이터를 분류하는 분류 정확도와 관련하여 중위수 및 사분위수 범위를 계산하여 분류기의 성능들을 결정하고, 결정된 분류기의 성능들을 상호 비교하여 복수의 분류기를 평가할 수 있다.

[0190] 단계(504)에서 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 분류 방법은 평가에 기반하여 선택된 분류기를 이용하여 큐비트 상태를 얽힌 상태 및 분리 가능한 상태로 분류한다.

[0191] 즉, 양자 상태 분류 방법은 단계(503)에서 계산된 분류 정확도에 기반하여 복수의 분류기 중 어느 하나의 분류기를 선택하고, 선택된 분류기를 이용하여 큐비트 상태를 얽힘 상태(entangled state) 또는 분리 가능한 상태(separatable state)로 분류할 수 있다.

[0193] 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 반사실적 얽힘 분배(Counterfactual Entanglement Distribution) 모델을 설명하기 위한 도면이다.

[0194] 도 6을 참조하면, 제1 단말(Alice)(610), 제2 단말(Bob)(620) 및 제3 단말(Charlie)(630) 각각은 모두 송신 단말, 수신 단말 및 제어 단말로 동작할 수 있다. 예를 들어, Alice(610)가 Bob(620)에게 양자 정보를 보내는 경우 Charlie(630)는 제어 단말의 역할을 수행하고, 반대로 Bob(620)이 Alice(630)에게 양자 정보를 보내는 경우도 가능하다. 이와 같이, 본 발명의 실시예에 따른 제어된 양자 순간 이동 프로토콜은 3자 양자네트워크를 가정한다.

[0195] 한편, 도 6에서 참조부호 640 'SW'는 전환 가능 미러(Switchable Mirror)의 및 전환 가능 회전자 등을 포함하는 양자 채널을 의미하고, QAO는 quantum absorptive object의 약칭이고, V-CQZ는 수직(Vertical) CQZ 게이트를 포함함을 나타내고, H-CQZ는 수평(Horizontal) CQZ 게이트를 포함하고 있음을 나타낸다.

[0196] 도 6에 도시된 제1 단말(Alice)(610), 제2 단말(Bob)(620) 및 제3 단말(Charlie)(630) 중 적어도 어느 하나는 도 12의 반사실 양자 통신 처리부(2013)에 적용될 수 있다.

[0198] [제1 단계]

[0199] 제1 단계에서 각 단말은 2N 개의 GHZ 상태를 반사실적으로 생성한다.

[0200] 제어된 반사실적 양자 순간이동을 안전하게 수행하기 위하여, Alice, Bob 및 Charlie는 CQZ (Counterfactual quantum Zeno) gate를 사용하여 2N GHZ 상태를 반사실적으로 생성한다. 여기서, N은 자연수를 나타내고, 각 단말은 2N GHZ 상태의 큐빗을 하나씩 갖는 2N 삼각(tripartie) GHZ 상태를 생성한다.

[0201] 송신 단말로 가정한 Alice는 얽힘을 반사실적으로 분배하기 위하여, GHZ 상태 생성의 각 라운드에서 자신의 큐빗이 양자 흡수 객체(quantum absorptive object, QAO)로 동작하는 $|\psi\rangle_A = (|0\rangle_A + |1\rangle_A)/2$ 상태에서 큐빗을 준비한다. 이때, Bob과 Charlie는 각각 $|0\rangle_B$ 및 $|1\rangle_C$인 상태에서 큐빗을 준비한다.

[0202] Bob과 Charlie는 도 6에 도시된 바와 같이, GHZ 상태 생성의 각 라운드에서 CQZ 게이트를 사용하여 양자 채널을

통해 Alice와 교대로 연결한다.

[0203] 각 라운드가 종료되는 시점에 Alice, Bob 및 Charlie의 초기 상태는 수학식 8과 같이 변환된다.

[0204] [수학식 8]

[0205] $$|\theta\rangle_{A_iB_iC_i} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|000\rangle_{A_iB_iC_i} + |111\rangle_{A_iB_iC_i}\right),$$

[0206] $$i \in \{1, 2, ..., 2N\}.$$

[0207] 여기서, A, B, C는 각각 Alice, Bob 및 Charlie를 나타내는 인덱스이고, i는 GHZ 상태 생성의 i번째 라운드를 나타내는 인덱스를 의미한다.

[0209] [제2 단계]

[0210] 제2 단계에서 Alice, Bob 및 Charlie는 큐빗 측정 및 결과발표를 수행한다.

[0211] 먼저, Alice는 보안 검사를 위하여, 2N개의 GHZ 상태들 중 N개의 GHZ 상태의 임의의 서브세트를 선택하고, 선택된 서브세트의 위치를 통지(announce) 한다.

[0212] Bob 및 Charlie는 {x, y} 세트로부터 측정 기저(basis)을 랜덤하게 선택하여 각 큐빗에서 측정을 수행하고 측정 결과와 선택한 기저(basis) 세트를 통지한다.

[0213] Alice는 [표 2]과 같은 Bob 및 Charlie의 측정 후 측정 결과 테이블을 참조하여 Bob 및 Charlie의 측정 결과를 비교하거나 매칭한다. 이를 통해 측정 결과의 일관성 여부를 확인할 수 있다.

[0214] [표 2]

Bob

Charlie	+x	-x	+y	-y
+x	$\|0\rangle + \|1\rangle$	$\|0\rangle - \|1\rangle$	$\|0\rangle - i\|1\rangle$	$\|0\rangle + i\|1\rangle$
-x	$\|0\rangle - \|1\rangle$	$\|0\rangle + \|1\rangle$	$\|0\rangle + i\|1\rangle$	$\|0\rangle - i\|1\rangle$
+y	$\|0\rangle - i\|1\rangle$	$\|0\rangle + i\|1\rangle$	$\|0\rangle - \|1\rangle$	$\|0\rangle + \|1\rangle$
-y	$\|0\rangle + i\|1\rangle$	$\|0\rangle - i\|1\rangle$	$\|0\rangle + \|1\rangle$	$\|0\rangle - \|1\rangle$

Alice's measurement result

[0215]

[0216] 측정 결과의 일관성이 기 설정된 허용 가능한 임계 값까지 신뢰 가능한 경우, Alice, Bob 및 Charlie는 다음 단계를 수행할 수 있다. 즉, Alice, Bob 및 Charlie는 다음 단계에서 선택된 서브 세트 이외의 N개의 GHZ 상태를 사용하여 임의의 알려지지 않은 큐빗을 삼각 양자 네트워크(tripartite quantum network)에서 전송할 수 있다.

[0217] 한편, 각 당사자는 송신 단말, 수신 단말 및 제어 단말로 동작할 수 있음을 고려하여, 이후의 명세서 상의 기재에서 GHZ 상태의 첨자는 s, r, c로 표현하기로 한다. 여기서, s, r, c는 각각 송신 단말, 수신 단말 및 제어 단말에 구비된(혹은 해당 단말이 소유한) 큐빗을 나타낸다.

[0219] [제3 단계]

[0220] 제3 단계에서 송신 단말은 자신이 소유한 큐빗에 대해 벨 기반 측정을 수행함으로써, 미지의 양자상태를 순간이동 시킨다. 보다 구체적으로, 수학식 9와 같이 정의되는 미지의 양자 상태 $|\phi\rangle_q$를 송신 단말이 전송하는 경우를 가정한다.

[0221] [수학식 9]

[0222] $$|\phi\rangle_q = \alpha|0\rangle_q + \beta|1\rangle_q,$$

[0223] $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$.

[0224] 미지의 양자 상태 및 GHZ 상태의 조합 상태는 수학식 10과 같이 표현될 수 있다.

[0225] [수학식 10]

[0226]
$$
\begin{aligned}
|\eta_j\rangle &= |\phi\rangle_{\mathrm{q}} \otimes |\theta\rangle_{\mathrm{s}_j\mathrm{r}_j\mathrm{c}_j} \\
&= \frac{1}{2}\Big[\left|\Phi^+\right\rangle_{\mathrm{qs}_j} \otimes \left(\alpha\,|00\rangle_{\mathrm{r}_j\mathrm{c}_j} + \beta\,|11\rangle_{\mathrm{r}_j\mathrm{c}_j}\right) \\
&\quad + \left|\Phi^-\right\rangle_{\mathrm{qs}_j} \otimes \left(\alpha\,|00\rangle_{\mathrm{r}_j\mathrm{c}_j} - \beta\,|11\rangle_{\mathrm{r}_j\mathrm{c}_j}\right) \\
&\quad + \left|\Psi^+\right\rangle_{\mathrm{qs}_j} \otimes \left(\alpha\,|11\rangle_{\mathrm{r}_j\mathrm{c}_j} + \beta\,|00\rangle_{\mathrm{r}_j\mathrm{c}_j}\right) \\
&\quad + \left|\Psi^-\right\rangle_{\mathrm{qs}_j} \otimes \left(\alpha\,|11\rangle_{\mathrm{r}_j\mathrm{c}_j} - \beta\,|00\rangle_{\mathrm{r}_j\mathrm{c}_j}\right)\Big],
\end{aligned}
$$

[0227] $j \in \{1, 2, ..., N\}$.

[0228] 여기서, $|\Phi^{\pm}\rangle$ 및 $|\Psi^{\pm}\rangle$는 벨 상태를 나타내고, j는 제어된 양자 순간 이동의 j번째 라운드를 나타낸다.

[0229] 제3 단계에서 송신 단말은 큐빗 q 및 s_j에 대한 벨 기저 측정을 수행하고, 측정 결과를 기록 및 유지한다.

[0231] [제4 단계]

[0232] 제4 단계에서 제어 단말은 Hadamard 기저로 큐빗을 측정하고 미지의 양자 상태를 재구성하도록 수신단말에게 측정 결과를 통지한다.

[0233] 보다 구체적으로, 제어 단말은 큐빗 c_j에서 Hadamard gate H를 수행하고 계산 기저로 큐빗을 측정한다. 제어 단말은 제어된 반사실적 양자 순간이동을 승인하기 위해 고전적 정보인 m의 1비트를 통해 측정 결과를 통지한다.

[0234] 제어 단말이 송신 단말과 수신 단말 간의 통신을 승인하면, 송신 단말은 벨 상태 $\{|\Phi^+\rangle, |\Phi^-\rangle, |\Psi^+\rangle, |\Psi^-\rangle\}$에 대응하는 $\{00, 01, 10, 11\}$ 세트로부터 고전적 정보인 m1m2 2비트를 통해 측정 결과를 제어 단말 및 수신 단말에게 통지한다.

[0236] 도 7은 본 발명의 실시예에 따른 제어된 양자 순간이동의 개념을 나타내는 도면이다.

[0237] 도 7을 참조하면, 제어 단말의 승인하에 송신 단말은 벨 측정 결과를 통지함으로써, 제어된 양자 순간이동을 수행함을 알 수 있다.

[0239] [제5 단계]

[0240] 제5 단계에서 수신 단말은 양자 상태를 재구성한다.

[0241] 보다 구체적으로, 수신 단말은 양자 상태를 재구성하기 위해 송신 단말 및 제어 단말의 측정 결과에 기초하여 큐빗 r_j에서 수학식 11과 같이 정의되는 유니터리 오퍼레이션(unitary operation)을 수행한다.

[0242] [수학식 11]

[0243] $$U = X^{m_1} Z^{m_2+m}$$

[0244] 여기서, X 및 Z는 각각 Pauli x 및 z 연산자를 의미한다.

[0245] 제1 단계 내지 제5단계를 통해 설명된 방법은 제어를 수행하는 제어 단말의 승인하에 미지의 양자 상태 시퀀스

를 재구성할 수 있다. 따라서, 다양한 공격 전략에 대해 보다 안전하고 다자간 통신 시스템에 활용이 가능하다.

[0246] 만일, 도청을 시도하는 단말이 얽힘 분배 과정에 참여하려고 시도하는 경우, 얽힘 관계에 있을 수 있지만 제2 단계의 보안 검사 과정에서 도청을 시도하는 단말이 탐지될 수 있다.

[0247] 또한, 도청을 시도하는 단말이 Alice의 미지 양자 상태를 훔치기 위해 보이지 않는 광자를 추가하는 경우, 보이지 않는 광자로 인해 보안 검사 단계에서 더 많은 오류가 발생할 수 있다.

[0249] 도 8은 본 발명의 실시예에 따른 제어된 반사실적 양자 순간이동 지원 장치의 동작을 나타내는 흐름도이다.

[0250] 여기서, 제어된 반사실적 양자 순간이동 지원 장치는 송신 단말, 수신 단말 및 제어 단말 중 어느 하나의 단말일 수 있고, 도 8은 제어된 반사실적 양자 순간이동 지원 장치가 송신 단말인 경우에 해당한다.

[0251] 도 8을 참조하면, 송신 단말은 810 단계에서 2N 개의 GHZ(Greenberger-Horne-Zeilinger)상태를 반사실적으로 생성한다.

[0252] 820 단계에서 송신 단말은 N개의 GHZ 상태의 임의의 서브세트를 선택하고, 선택된 서브세트의 위치를 통지한다.

[0253] 830 단계에서 송신 단말은 측정 결과의 일관성 여부를 확인한다.

[0254] 측정 결과의 일관성이 기 설정된 허용 가능한 임계 값까지 신뢰 가능한 경우, 송신 단말은 840 단계에서 소유한 큐빗에 대해 벨 기반 측정을 수행한다.

[0255] 이후, 제어 단말로부터 통신이 승인되면, 850 단계에서 송신 단말은 벨 상태에 대응하는 고전적인 2비트를 사용하여 측정 결과 통지한다.

[0257] 이하, 본 발명의 양자정보기술 통합 시스템에서 양자 실험 플랫폼에 적용될 수 있는 양자상태 단층 촬영 처리부를 설명한다.

[0258] 양자 상태 단층 촬영(Quantum State Tomography, QST)은 미지의 양자 상태를 결정하기 위한 양자 정보 처리 작업이다. 이 작업은 동일하게 준비된 양자 시스템(identically prepared quantum system)의 앙상블(ensemble)을 측정하고, 그 상태를 다양한 추정 방법으로 추론함으로써 수행된다. 양자 상태가 측정 전, 명확한 인과 순서(고전적 궤적)가 입력된 최대 잡음 탈분극 채널을 통과할 때 양자 상태가 최대 혼합 상태로 전환되어, QST 수행이 불가능하다.

[0259] 고전적 궤적을 통해 양자 상태를 전달하는 대신, 본 명세서의 제안 방법은 채널을 무한한 인과 순서(Indefinite Causal Order, ICO)로 설정한다. 본 명세서에서는 ICO에서 탈분극 채널을 설정하면 채널이 최대 잡음 상태에 있더라도(maximally noisy) QST를 수행할 수 있음을 보여준다. 그리고/또는, 본 명세서에서는 채널이 최대 잡음이 없을 때 선형 회귀 추정을 통해 QST에 대한 ICO의 영향을 살펴본다. 그리고/또는, 본 명세서에서는 ICO 배열에서 채널을 설정하는 것은 채널이 최대 잡음이 있을 때 유리하다는 것을 보여준다.

[0260] 본 발명의 실시예에 따른 양자상태 단층 촬영 처리부는 추정될 양자 상태를 양자 스위치로 전송하고, 상기 양자 스위치에서 출력되는 상태에서 양자 상태 단층 촬영을 수행하고, 상기 양자 상태 단층 촬영의 출력 및 대수학에 기반하여 초기 상태를 추정할 수 있다.

[0262] 미지의 시스템의 상태를 판별하는 양자 작업은 양자 상태 단층 촬영(QST, Quantum State Tomography)라 칭할 수 있다. QST는 두 단계로 구성될 수 있다.

[0263] 먼저, 동일하게 준비된 양자 상태 사본에 대한 측정이 수행된다.

[0264] 다음, 고전적인 통계 추정 방법을 사용해 양자 상태가 재구성된다. 양자 상태를 구성하는 방법은 선형 반전(methods to construct a quantum states are linear inversion, MLE), 최대 가능도 추정(maximum likelihood estimation), 베이지안 추정 방법(bayesian estimation method) 및 선형 회귀(linear regression) 등이 있을 수 있다.

[0265] 선형 반전(Linear inversion)은 이상적인 환경을 가정하여 수행될 수 있다. 따라서, 큐비트 측정 중에 오류가 발생한 경우, 복구된 상태는 물리적 상태가 아닐 수 있다. MLE는 수치 최적화에 의해 결정된 측정 데이터 세트를 생성할 가장 높은 확률을 제공하는 밀도 행렬을 찾는다. 베이지안 방법은 베이지안 정리를 이용하여 사전 확률 분포(prior) p(ρ)에 대한 지식으로 사후 확률 분포(posterior probability distribution) p(ρ|D)를 결정할 수 있다. 여기서 D는 측정 데이터를 의미한다.

[0266] 전통적인 양자 통신에서 양자 메시지가 일련의 통신채널 $\mathcal{N}_1$ 및 $\mathcal{N}_2$를 통해 전송될 때, 채널을 통해 송신되는 메시지의 순서는 채널 $\mathcal{N}_1$을 통과한 후에 $\mathcal{N}_2$ 또는 먼저 $\mathcal{N}_2$를 통과한 다음 $\mathcal{N}_1$을 통과하는 것으로 정의될 수 있다.

[0267] 양자 이론은 이 채널들의 중첩을 생성하여 양자 채널을 결합하는 새로운 방식을 허용할 수 있다. 이를 통해, 정보 전달 순서는 이전의 두 가지 상태에 해당하지 않는다. 즉, 양자 채널 사이의 인과 순서가 무한하다. 무한한 인과 순서의 과정은 작업 순서가 퀀텀 비트(quantum bit)로 제어되는 양자 스위치(Quantum switch)에 의할 수 있다. 그리고/또는, 두 가지 대안적 순서를 중첩하여 완전 탈분극 채널의 조합을 통해 정보가 전송될 수 있다. 양자 스위치는 양자 계측(quantum metrology), 채널 용량 향상, 양자 탈분극 채널 식별 및 양자 인터넷을 향상시키는 데 활용될 수 있다.

[0268] 본 명세서에서는 양자 상태가 측정 전에 최대 잡음이 있는 양자 탈분극 채널을 통해 전송된다는 가정하에 선형 회귀 분석을 통해 QST를 모델링한다. 그리고, 본 명세서에서는 양자 채널을 무한한 인과 순서로 설정하는 것이 QST에 미치는 영향을 살펴본다. 그리고, 본 명세서에서는 명확한(definite) 인과 순서 및 ICO로 조립된 채널을 통해 전송되는 경우 추정된 상태와 실제 상태의 부정확성(infidelity)을 비교한다. 후자의 방법은 최대 잡음이 있는 양자 탈분극 채널에 대한 QST를 지원할 수 있다.

[0269] 이하, 본 명세서에서는 먼저, 선형 회귀 방법과 양자 스위치를 통한 양자 상태 단층 촬영을 살펴보고, 명확한 인과 순서와 ICO에 따라 설정된 채널을 통해 양자 상태를 전송할 때 QST 성능을 살펴본다.

[0271] 양자 상태 단층 촬영(Quantum State Tomography)

[0272] 먼저, 미지의 양자 상태를 추정하기 위한 선형 회귀 접근법을 살펴본다.

[0273] $i=j$이면 1이고, 그렇지 않은 경우 0인 Kronecker의 델타 함수 δ_{ij}를 이용할 수 있다. $\mathrm{tr}(\cdot)$은 행렬의 추적을 의미하는 것으로 (1) $\mathrm{tr}(\sigma_i)=0$ 와 (2) $\mathrm{tr}(\sigma_i\sigma_j)=\delta_{ij}$를 만족하는 Hermitian 연산자 $\{\sigma_i\}_{i=1}^{d^2-1}$로 지정할 수 있다. 예를 들면, 단일 큐비트의 경우(single-qubit case), $\{\sigma_i\}_{i=1}^{d^2-1}$는 아래 수학식 12와 같을 수 있다.

[0274] [수학식 12]

[0275]
$$\left\{\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}0&1\\1&0\end{pmatrix},\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}0&-i\\i&0\end{pmatrix},\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1&0\\0&-1\end{pmatrix}\right\}$$

[0276] 큐비트 밀도 연산자(operator)는 다음 수학식 13과 같이 매개변수화될 수 있다.

[0277] [수학식 13]

[0278]
$$\rho=\frac{I}{d}+\sum_{i=1}^{d^2-1}r_i\sigma_i$$

[0279] 여기서, $r_i=\mathrm{tr}(\rho\sigma_i)$이고, 측정 세트 $\{\mathcal{M}_n\}_{n=1}^{M}$이 베이시스(bases) $\{\sigma_i\}_{i=1}^{d^2-1}$하에 다음 수학식 14와 같이 매

개변수화될 수 있다고 가정할 수 있다.

[0280] [수학식 14]

$$\mathcal{M}_n = \frac{I}{d} + \sum_{i=1}^{d^2-1} \psi_i^n \sigma_i$$

[0281]

[0282] 여기서, $\psi_i^n = \mathrm{tr}(\mathcal{M}_n \sigma_i)$ 이고, $\sum_{n=1}^{M} \mathcal{M}_n = 1$ 이다. 이 작업에서 사용되는 측정 세트는 $\{|H\rangle\langle H|, |V\rangle\langle V|, |D\rangle\langle D|, |R\rangle\langle R|\}$ 인 스토크스 측정 세트(stokes measurement set)이다. 보른 규칙(Born's rule)에 기반하여, 동일하게 준비된 양자 시스템의 다수의 사본들이 측정된다면, $\mathcal{M}_n$의 측정 결과를 획득하기 위한 확률은 다음 수학식 15와 같을 수 있다.

[0283] [수학식 15]

$$\begin{aligned} p_n &= \mathrm{tr}(\mathcal{M}_n \rho) \\ &= \mathrm{tr}\left(\left(\frac{I}{d} + \sum_{i=1}^{d^2-1} \psi_i^n \sigma_i\right)\rho\right) \\ &= \frac{1}{d}\mathrm{tr}(\rho) + \mathrm{tr}\left(\sum_{i=1}^{d^2-1} \psi_i^n \sigma_i \rho\right) \\ &= \frac{1}{d} + \sum_{i=1}^{d^2-1} \psi_i^n r_i = \frac{1}{d} + \boldsymbol{\psi^{(n)T}}\boldsymbol{\theta} \end{aligned}$$

[0284]

[0285] 여기서, $\boldsymbol{\psi^{(n)T}}$ 는 열벡터 $\boldsymbol{\psi^{(n)}} = \{\psi_1^n, \cdots, \psi_{d^2-1}^n\}$ 의 전치이고, $\boldsymbol{\theta} = \{r_1, \cdots, r_{d^2-1}\}$ 이다.

[0286] 상기 수학식 15로부터 QST에 대한 선형 회귀 형태는 다음 수학식 16과 같을 수 있다.

[0287] [수학식 16]

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{X}\boldsymbol{\theta}$$

[0288]

[0289] 여기서, $\boldsymbol{Y} = \{p_1 - \frac{1}{d}, \cdots, p_M - \frac{1}{d}\}$ 이고, $\boldsymbol{X} = \left\{\boldsymbol{\psi^{(1)T}}, \cdots, \boldsymbol{\psi^{(M)T}}\right\}^T$ 이다.

[0290] 각 $\{\mathcal{M}_n\}_{n=1}^{d^2-1}$ 에 대해 상태 ρ 에서 양자 시스템을 N번 측정하는 것을 가정할 수 있다. 측정 결과 $\mathcal{M}_n$을 획득하기 위한 확률은 다음 수학식 17에 의해 추정될 수 있다.

[0291] [수학식 17]

$$\hat{p_n} = \frac{f_n}{N}$$

[0292]

[0293] 여기서, f_n 는 추정 오류 $e_n = \hat{p_n} - p_n$ 를 갖는 관찰된 주파수들을 나타낸다. 다음, 상기 수학식 16에서 선형 회귀 방정식은 다음 수학식 18과 같을 수 있다.

[0294] [수학식 18]

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{X}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{e}$$

[0295]

[0296] 여기서, $\boldsymbol{Y} = \{\hat{p_1} - \frac{1}{d}, \cdots, \hat{p_M} - \frac{1}{d}\}$ 이고, $\boldsymbol{e} = \{e_1, \cdots, e_M\}$ 이다. 큰 N의 경우, $\{e_n\}_{n=1}^{M}$은 평균 0과 변화량 $\frac{p_n - p_n^2}{N}$ 를 갖는 정규 분포에 대한 분포로 수렴될 수 있다. 많은 측정이 수행된다면, 큐비트 상태에 대한 측정은 더 정확해질 수 있다. 상기 수학식 18에서 선형 회귀 문제에 대한 해결책은 다음 수학식 19를 최소화하는 $\boldsymbol{\theta}$ 일 수 있다.

[0297] [수학식 19]

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \arg\max_{\theta} (\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{X}\boldsymbol{\theta})^T (\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{X}\boldsymbol{\theta})$$

[0298] $$= (\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X})^{-1} \boldsymbol{X}^T\boldsymbol{Y}.$$

[0299] 측정 세트 $\{\mathcal{M}_n\}_{n=1}^{M}$ 이 정보적으로 완전하거나 넘쳐서 $(\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X})$ 역을 가지는 것을 가정할 수 있다. 추정값 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 는 평균 제곱 오차(mean squared error)를 갖는 평향되지 않는 추정값이고, 점근적으로, 다음 수학식 20과 같을 수 있다.

[0300] [수학식 20]

[0301] $$MSE_{\theta} = \mathrm{tr}\left((\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X})^{-1} \boldsymbol{X}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{X} (\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X})^{-1}\right)$$

[0302] 여기서, $\boldsymbol{P} = \frac{1}{N} diag\{p_1 - p_1^2, \cdots, p_M - p_M^2\}$ 이다.

[0304] 양자 탈분극 채널(Quantum Depolarizing Channel)

[0305] 양자 정보는 양자 채널을 통해 전송될 수 있다. 양자 채널은 밀도 연산자에 대한 맵을 보존하는 완전한 양의 추적으로서 수학적으로 정의될 수 있다. 채널을 통해 전송되는 동안, 큐비트는 확률 (1-q)를 갖는 완전히 혼합된 상태로 진화(evolution)하고, 확률 q로 그대로 유지될 수 있다. 이러한 종류의 양자 채널을 양자 탈분극 채널 $\mathcal{N}(\rho)$ 이라 칭할 수 있다. 큐비트의 진화 ρ 는 다음 수학식 21과 같이 정의된다.

[0306] [수학식 21]

[0307] $$\mathcal{N}(\rho) = (1-q)\frac{I}{d} + q\rho$$

[0309] 양자 스위치 (Quantum Switch)

[0310] 상술한 바와 같이, 두 개의 양자 채널을 통해 전송되는 양자 시스템은 명확한 인과 순서로 진화하고, 두 번째 채널은 첫 번째 채널의 출력에 작용한다. 양자 시스템은 ICO에서도 진화할 수 있기 때문에 어떤 과정이 다른 과정보다 먼저 일어나는지 결정할 수 없다. 이것은 양자 스위치 때문에 가능하다. 양자 스위치는 양자 채널을 결합하고, 제어 큐비트라고 하는 큐비트 ρ_c 에 의해 상대적인 순서를 제어할 수 있다. 제어 큐비트가 $\rho_c = |0\rangle\langle 0|$ 상태에 있는 경우, 양자 스위치는 $\mathcal{N}_1 \to \mathcal{N}_2$ 순서에 따라 양자 시스템을 지나갈 것이다. 제어 큐비트가 $|1\rangle\langle 1|$ 상태에 있다면, 양자 상태는 $\mathcal{N}_2 \to \mathcal{N}_1$ 순서에 따라 양자 채널을 지나간다. 제어 큐비트가 $|+\rangle\langle +|$ 와 같이 $|0\rangle$ 와 $|1\rangle$ 의 중첩에 있는 경우, 양자 스위치는 채널을 $\mathcal{N}_1 \to \mathcal{N}_2$ 와 $\mathcal{N}_2 \to \mathcal{N}_1$ 순서의 중첩에 둘 수 있다. 양자 스위치의 결과로서 양자 채널의 Kraus 연산자는 다음 수학식 22와 같이 정의될 수 있다.

[0311] [수학식 22]

[0312] $$W_{ij} = K_i^{(2)} K_j^{(1)} \otimes |0\rangle\langle 0|^c + K_j^{(1)} K_i^{(2)} \otimes |1\rangle\langle 1|^c$$

[0313] 여기서, 채널 $\mathcal{N}_1$ 와 $\mathcal{N}_2$ 의 Kraus 연산자는 각각 $K_i^{(1)}$ 와 $K_i^{(2)}$ 로 나타낼 수 있다.

[0314] 하나의 큐비트 시스템에 대한 양자 스위치는 다음 수학식 23과 같이 주어질 수 있다.

[0315] [수학식 23]

[0316] $$\mathcal{S}(\mathcal{N}_1, \mathcal{N}_2)(\rho \otimes \rho_c) = \sum W_{ij}(\rho \otimes \rho_c) W_{ij}^{\dagger}$$

[0318] 단층 촬영 방법, 시뮬레이션 및 결과

[0319] 추론할 양자 상태 ρ 가 고전적인 궤적에서 잡음이 있는 탈분극 채널을 통해 측정 시스템으로 전송된다고 가정할 수 있다. 채널이 최대 잡음인 경우, 예를 들면 $q = 0$ 일 때, 수학식 10으로부터 큐비트는 ρ 에 종속하지 않는 다음 수학식 24의 최대 혼합 상태로 변환될 수 있다.

[0320] [수학식 24]

[0321] $$\mathcal{N}(\rho) = \frac{I}{d}$$

[0322] 결론적으로, $\mathcal{N}(\rho)$ 에서 QST가 수행된다면, ρ 를 재구성하는 것은 불가능하다.

[0323] 제어 큐비트 $\rho_c = |c\rangle\langle c|$ 를(여기서, $|c\rangle = \sqrt{a}\,|0\rangle + \sqrt{\bar{a}}\,|1\rangle$) 갖는 무한한 인과 순서에서 채널이 설정된다면, 채널의 출력은 다음 수학식 25과 같을 수 있다.

[0324] [수학식 25]

[0325] $$\mathcal{P}(\mathcal{N}_1, \mathcal{N}_2)(\rho, \rho_c) = \bar{q}^2 \left[(a|0\rangle\langle 0| + \bar{a}|1\rangle\langle 1|) \otimes \frac{I}{d} + \sqrt{a\bar{a}}\,(|0\rangle\langle 1| + |1\rangle\langle 0|) \otimes \frac{\rho}{d^2} \right] + 2q\bar{q}\left(\rho_c \otimes \frac{I}{d}\right) + q^2 \rho_c \otimes \rho$$

[0326] $\{|+\rangle, |-\rangle\}$ 베이시스(basis)에서 제어 큐비트의 측정은 채널의 출력을 다음 수학식 26과 같이 변환할 수 있다.

[0327] [수학식 26]

[0328] $$\rho^{QS} = \begin{cases} \rho_{|+\rangle}^{QS} = \bar{q}^2\left(\frac{I}{2d} + \sqrt{a\bar{a}}\frac{\rho}{d^2}\right) + 2q\bar{q}\frac{I}{d} + q^2\rho & , \mathrm{pr}_{|+\rangle} = \bar{q}\frac{d+\sqrt{a\bar{a}}}{d^2} + \frac{4q\bar{q}}{d} + q^2. \\ \rho_{|-\rangle}^{QS} = \bar{q}^2\left(\frac{I}{2d} - \sqrt{a\bar{a}}\frac{\rho}{d^2}\right) & , \mathrm{pr}_{|-\rangle} = 1 - \mathrm{pr}_{|+\rangle} \end{cases}$$

[0329] 여기서, $\mathrm{pr}_{|+\rangle}$ 와 $\mathrm{pr}_{|-\rangle}$ 는 각각 $|+\rangle$ 와 $|-\rangle$ 에서 측정 결과를 획득하는 확률을 나타낼 수 있다. 채널이 최대로 잡음이 있는 경우, 수학식 26으로부터, ρ^{QS} 에 대해 QST를 수행한다면, ρ^{QS} 는 상태 ρ 를 재구성할 수 있는 것을 의미하는 ρ 에 의존할 수 있다.

[0330] ρ^{QS} 를 측정한다면, ρ 가 아닌 ρ^{QS} 의 추정을 얻을 것이다.

[0331] 양자 상태의 확률이 온전히 남아 있는지 여부는 ρ 를 다음 수학식 27과 같이 복구할 수 있는 수학식 26으로부터 양자 처리 단층 촬영(quantum process tomography)에 의해 결정될 수 있다.

[0332] [수학식 27]

[0333]
$$\hat{\rho} = \begin{cases} \left(\hat{\rho}^{QS}\mathrm{pr}_{|+\rangle} - \frac{\bar{q}^2}{2d}I - \frac{2q\bar{q}}{d}I\right) / \left(\frac{\bar{q}^2\sqrt{a\bar{a}}}{d^2} + q^2\right) & , \text{for } \rho^{QS}_{|+\rangle} \\ \left(\frac{\bar{q}^2}{2d}I - \hat{\rho}^{QS}\mathrm{pr}_{|-\rangle}\right) / \left(\frac{\bar{q}^2\sqrt{a\bar{a}}}{d^2}\right) & , \text{for } \rho^{QS}_{|-\rangle} \end{cases}$$

[0334] ρ^{QS} 상에 수학식 27이 적용되는 경우, $\hat{\rho}$ 가 비물리적 행렬인 몇가지 경우들이 있을 수 있다.

[0335] 이러한 이유로, $\hat{\rho}$ 를 물리적 행렬 공간에 투영할 수 있고, 단위 트레이스와 양의 반정의 행렬들의 공간으로 표현될 수 있다. 단순 투영 알고리즘은 채택될 수 있으며, 이것의 아이디어는 밀도 행렬의 모든 고윳값들을 양의 값들 그리고 이들의 합으로 변환하는 것일 수 있다.

[0336] <MSE 분석(MSE analysis)>

[0337] 수학식 26에서의 양자 상태가 측정된다면, 상태 $\rho^{QS}_{|+\rangle}$ 에 대한 $\mathcal{M}_n$ 의 측정 결과를 획득하기 위한 확률은 다음 수학식 28과 같이 정의될 수 있다.

[0338] [수학식 28]

[0339]
$$\begin{aligned} \hat{p_n}^{QS} &= \mathrm{tr}\left(\mathcal{M}_n\rho^{QS}_{|+\rangle}\right) \\ &= \frac{1}{\mathrm{pr}_{|+\rangle}}\left[\bar{q}^2\left(\frac{1}{2d} + \frac{\sqrt{a\bar{a}}}{d^2}p_n\right) + \frac{2q\bar{q}}{d} + q^2p_n\right] \end{aligned}$$

[0340] 상태 $\rho^{QS}_{|-\rangle}$ 의 경우, 확률은 다음 수학식 29와 같이 정의될 수 있다.

[0341] [수학식 29]

[0342]
$$\begin{aligned} \hat{p_n}^{QS} &= \mathrm{tr}\left(\mathcal{M}_n\rho^{QS}_{|-\rangle}\right) \\ &= \frac{1}{\mathrm{pr}_{|-\rangle}}\left[\bar{q}^2\left(\frac{1}{2d} - \frac{\sqrt{a\bar{a}}}{d^2}p_n\right)\right] \end{aligned}$$

[0343] 최대 노이즈 채널(q=0)의 경우, $\hat{p}^{QS}_n$ 는 다음 수학식 30과 같을 수 있다.

[0344] [수학식 30]

[0345]
$$\hat{p}^{QS}_n = \begin{cases} \frac{1}{\mathrm{pr}_{|+\rangle}}\left(\frac{1}{2d} + \frac{\sqrt{a\bar{a}}}{d^2}p_n\right) & , \text{for } \rho^{QS}_{|+\rangle} \\ \frac{1}{\mathrm{pr}_{|-\rangle}}\left(\frac{1}{2d} - \frac{\sqrt{a\bar{a}}}{d^2}p_n\right) & , \text{for } \rho^{QS}_{|-\rangle} \end{cases}$$

[0346] 여기서, 제어 큐비트가 상태 $|-\rangle$ 에 해당하는 경우, 즉 $\mathrm{MSE}_{\theta,\,|-\rangle} < \mathrm{MSE}_{\theta,\,|+\rangle}$ 인 경우, 더 나은 결과는 얻어질 수 있다.

[0347] 수학식 20으로부터, X는 제어 큐비트 측정 후 획득된 양쪽 상태에 대한 동일한 값을 얻을 수 있다. 그러므로, P에 의해 야기된 차이점을 확인해야할 필요가 있다.

[0348] 모순을 가정하기 위해, $\mathrm{MSE}_{\theta,\,|-\rangle} > \mathrm{MSE}_{\theta,\,|+\rangle}$ 는 다음 수학식 31로부터 수학식 32의 과정을 거쳐 수학식 33

으로 표현될 수 있다.

[0349] [수학식 31]

[0350] $$\mathrm{MSE}_{\theta,\,|-\rangle} - \mathrm{MSE}_{\theta,\,|+\rangle} > 0$$

[0351] [수학식 32]

[0352] $$(\hat{p}_{n,|-\rangle} - \hat{p}n,|-)^2) - (\hat{p}_{n,|+\rangle} - \hat{p}^2_{n,|+\rangle}) > 0$$

[0353] [수학식 33]

[0354] $$A - B - C + D - E > 0$$

[0356] 여기서, $A = \frac{1}{2d}\left(\frac{1}{\mathrm{pr}_{|-\rangle}} - \frac{1}{\mathrm{pr}_{|+\rangle}}\right)$ 이고, $B = \frac{\sqrt{a\bar{a}}}{d^2}p_n\left(\frac{1}{\mathrm{pr}_{|-\rangle}} + \frac{1}{\mathrm{pr}_{|+\rangle}}\right)$ 이며,

$C = \frac{1}{4d^2}\left(\frac{1}{\mathrm{pr}^2_{|-\rangle}} - \frac{1}{\mathrm{pr}^2_{|+\rangle}}\right)$ 이고, $D = \frac{\sqrt{a\bar{a}}}{d^3}p_n\left(\frac{1}{\mathrm{pr}^2_{|-\rangle}} - \frac{1}{\mathrm{pr}^2_{|+\rangle}}\right)$ 이며,

$E = \frac{a\bar{a}}{d^4}p_n^2\left(\frac{1}{\mathrm{pr}^2_{|-\rangle}} - \frac{1}{\mathrm{pr}^2_{|+\rangle}}\right)$ 이다.

[0357] 여기서, 수학식 33은 $A + D < B + C + E.$로 표현될 수 있고, $A + D < B + C + E.$은 모순이다. 그러므로, $\mathrm{MSE}_{\theta,\,|-\rangle} < \mathrm{MSE}_{\theta,\,|+\rangle}$어야 할 수 있다.

[0358] 수학식 24로부터 양자 상태가 고전(classical) 배열을 통해 전송되는 경우, $\mathcal{M}_n$의 측정 결과를 획득하기 위한 확률은 $\hat{p}_n = \frac{1}{d}$ 이고, 이에 따라 $\mathrm{MSE}_{\theta,\,|-\rangle}$와 $\mathrm{MSE}_{\theta,\,|+\rangle}$ 보다 더 큰 MSE는 주어질 것이다.

[0359] <수치 시뮬레이션(Numerical Simulation)>

[0360] 이하에서는, 상술한 체계를 사용하여 하나의 큐비트 시스템에서 수치 시뮬레이션을 수행한다. 순수 상태와 혼합 상태에서 QST를 수행하여 두 가지 상태 모두에서 체계가 잘 작동하는지 확인한다.

[0361] 도 9는 큐비트 전송에서 양자 스위치(1010)를 채택함으로써, 최대 잡음이 있는 양자 탈분극 채널에서 QST를 수행하기 위한 메커니즘을 설명하는 도면이다.

[0362] 도 9를 참조하면, 시뮬레이션 시 구성되는 일실시예에 따른 단층 촬영 장치(1000)는 양자 스위치(Quantum Switch)(1010)와, 제어 큐비트를 측정하는 측정(Control Qubit Measurement) 장치(1020)와, 양자 상태 단층 촬영(Quantum Sate Tomography) 장치(1030)를 포함할 수 있다.

[0363] Haar 측정(measure)에 따라, 그리고 혼합 상태들을 위한 힐베르트-슈미트(Hilbert-Schmidt) 측정(measure) 또는 Bures 측정(measure)에 따라 균일하게 분포된 5×10^3개의 임의 양자 상태들이 생성될 수 있다. 측정 전에 고전적 궤도에서 조립된 최대 잡음이 있는 탈분극 채널 및 ICO에서 큐비트 전송을 모델링할 수 있다. 6×10^3 측정들은 각 큐비트 상에서 각 $\{\mathcal{M}_n\}_{n=1}^{d^2-1}$ 마다 수행될 수 있다. 실제 상태와 추정이 얼마나 가까운지 정량화하기 위해, 양쪽 상태 $F(\rho,\hat{\rho}) = \mathrm{tr}\left(\sqrt{\sqrt{\rho}\hat{\rho}\sqrt{\rho}}\right)$ 모두의 정확도(fidelity)가 계산될 수 있다.

[0364] 다음, 5×10^3 개의 양자 상태들의 평균 log 정확도 $log_{10}(1 - F(\rho,\hat{\rho}))$ 는 계산될 수 있다. 상태들이 유한

한 인과 순서 그리고 ICO에서 전송되는 경우, 이러한 추정을 갖는 실제 순수 상태들의 Log 부정확도(infidelity)는 도 10과 같이 나타낼 수 있다.

[0365] 도 10은 순수 상태들 (a)과 혼합 상태들 (b)에 대한 재구성 상태 $\hat{\rho}$와 실제 상태 ρ의 Log 부정확도(infidelity)를 나타낸다.

[0366] 실제 상태들이 ICO 배열에서 놓여진 채널을 통해 전송되는 경우, log 부정확도(infidelity)는 각 $|+\rangle$와 $|-\rangle$에서의 측정 결과에 대해 빨간 색과 녹색 선에 의해 표시될 수 있다. 또한, 추정된 상태의 평균 정확도는 다음 수학식 34와 같이 계산될 수 있다.

[0367] [수학식 34]

[0368] $$F_{av} = \mathrm{pr}_{|+\rangle} F_{|+\rangle} + \mathrm{pr}_{|-\rangle} F_{|-\rangle}$$

[0369] 여기서, $\mathrm{pr}_{|+\rangle}$, $\mathrm{pr}_{|-\rangle}$, $F_{|+\rangle}$ 및 $F_{|+\rangle}$는 제어 큐비트의 측정이 $|+\rangle$와 $|-\rangle$에 대응하는 경우, 추정된 상태의 확률과 정확도일 수 있다.

[0370] 도 10으로부터, 최대 잡음이 있는 양자 탈분극 채널에 대해, ICO 배열이 순수 상태 및 혼합 상태 양쪽 모두에 대한 QST 추정 성능에 도움이 되는 것을 확인할 수 있다. 측정 결과 $|-\rangle$에 해당하는 상태들 상에 QST는 이전에 설명된 MSE 분석과 일치하는 $|+\rangle$에 해당하는 상태들보다 더 좋은 추정을 획득할 수 있다.

[0372] 예를 들어, 도 11의 일실시예에 따른 단층 촬영 장치(1100)는 상술한 동작을 수행할 수 있다. 예를 들어, 단층 촬영 장치(1100)의 양자 스위치부(1110)를 통과한 출력은 수학식 25와 같을 수 있다. 그리고/또는, 단층 촬영 장치(1100)의 양자 스위치부(1110)는 $\{|+\rangle, |-\rangle\}$ 베이시스(basis)에서의 제어 큐비트에서 채널의 출력을 수학식 26과 같이 변환할 수 있다. 그리고/또는, 단층 촬영 장치(1100)의 단층 촬영부(1120) 및/또는 추정부(1130)는 상기의 양자 상태 단층 촬영에 대한 설명과 같이 선형 회귀 접근법에 기반하여 양자 상태를 추정할 수 있다. 예를 들어, 단층 촬영 장치(1100)의 단층 촬영부(1120) 및/또는 추정부(1130)는 수학식 12 내지 수학식 20의 연산을 수행할 수 있다. 그리고/또는, 단층 촬영 장치(1100)의 단층 촬영부(1120) 및/또는 추정부(1130)는 수학식 26에 기반하여 ρ를 재구성할 수도 있다.

[0373] 그리고/또는, 단층 촬영 장치(1100)의 단층 촬영부(1120) 및/또는 추정부(1130)는 수학식 23에 의해 ρ에 또는 $\hat{\rho}$를 결정 및/또는 추정할 수 있다.

[0374] 도 11을 참조하여 설명한 단층 촬영 장치의 동작은 상술한 방식에 한하지 않으며, 다양한 방식으로 본 명세서에서 설명된 동작들을 수행할 수 있다. 또한, 단층 촬영 장치는 상기 도 11을 참조하여 설명한 단층 촬영 장치의 동작 이외에도 본 명세서에서 설명된 모든 또는 일부 동작들을 수행할 수 있다.

[0375] 도 11의 단층 촬영 장치는 도 12의 양자 상태 단층 촬영 처리부(2031)에 적용될 수 있다.

[0376] 본 명세서에서는 최대 잡음이 있는 탈분극 채널에서의 QST를 살펴보았다. 본 명세서에서는 최대 잡음 채널에서 QST가 가능하도록 양자 스위치(quantum switch)을 적용하였다. 본 명세서에서 설명한 바와 같이, 양자 전환 배열로 큐비트를 전송하는 것이 고전적인 궤도를 통해 전송하는 것보다 더 정확한 양자 상태 추정을 제공한다. 다시 말해, 본 발명은 최대 잠음이 있는 탈분극 양자 채널에서 정확한 양자 상태 단층 촬영을 수행할 수 있다.

[0378] 도 11은 본 발명의 일실시예에 따른 단층 촬영 장치의 블록도이다.

[0379] 도 11을 참조하면, 본 발명의 일실시예에 따른 단층 촬영 장치(1100)는 제어 큐비트에 의해 제어되고 추정될 양자 상태를 수신하는 양자 스위치부(1110)와, 양자 스위치부(1110)에서 출력되는 상태에 양자 상태 단층 촬영을 수행하는 단층 촬영부(1120)와, 단층 촬영부(1120)의 출력 및 대수학에 기반하여 초기 상태를 추정하는 추정부

(1130)를 포함하며, 최대 잡음 채널에서도 양자 상태 촬영이 수행될 수 있다.

[0380] 그리고/또는, 양자 스위치부(1110)는 양자 채널을 결합할 수 있다.

[0381] 그리고/또는, 단층 촬영은 선형 회귀 추정에 기반할 수 있다.

[0382] 그리고/또는, 최대 잡음 채널은 무한 인과 순서(Indefinite Causal Order, ICO)로 설정될 수 있다.

[0383] 그리고/또는, 최대 잡음 채널은 양자 탈분극 채널일 수 있다.

[0384] 다른 일실시예에 따라, 단층 촬영 장치(1100)는 추정될 양자 상태를 양자 스위치로 전송하고, 양자 스위치에서 출력되는 상태에서 양자 상태 단층 촬영을 수행하며, 양자 스위치에서 출력되는 상태의 예측에서 대수학을 수행하여 초기 상태를 추정함에 따라 최대 잡음 탈분극 양자 채널에서 양자 상태 단층 촬영 정확도를 향상시킬 수 있다.

[0385] 다른 일실시예에 따라, 단층 촬영 장치(1100)는 추정될 양자 상태를 양자 스위치로 전송하고, 양자 스위치에서 출력되는 상태에서 양자 상태 단층 촬영을 수행하며, 양자 스위치에서 출력되는 상태의 예측에서 대수학을 수행하여 초기 상태를 추정함으로써, 채널 잡음이 최대인 경우에도 양자 상태 단층 촬영을 수행할 수 있다.

[0386] 그리고/또는, 양자 상태는 최대 잡음 탈분극 양자 채널로 전송되면 최대한으로 혼합된 상태로 변환하면서 양자 상태 단층 촬영을 수행할 수 없게 된다. 채널 잡음이 최대인 경우에도 일실시 예에 따른 양자 상태 단층 촬영 장치는 먼저, 추정될 양자 상태를 양자 스위치로 전송하고, 양자 스위치에서 출력되는 상태에서 양자 상태 단층 촬영을 수행하며, 양자 스위치에서 출력되는 상태의 예측에서 대수학을 수행하여 초기 상태를 추정할 수 있다.

[0387] 도 11을 참조하여 설명한 단층 촬영 장치의 동작은 이에 한정되지 않으며, 이외 본 명세서에서 설명된 모든 또는 일부 동작들이 단층 촬영 장치에 의해 수행될 수 있다.

[0389] 도 12는 본 발명의 실시예에 따른 양자정보기술 통합 시스템을 나타내는 도면이다.

[0390] 도 12를 참조하면, 양자 통신 플랫폼(2010), 양자 컴퓨팅 플랫폼(2020), 양자 관측 및 분석 플랫폼(2030), 플랫폼 제어부(2040) 및 플랫폼 인터페이스부(2050)을 포함한다.

[0391] 양자 통신 플랫폼(2010)은 양자통신 및 양자정보통신과 관련된 요소 기술의 구현 및 실험을 제공하는 플랫폼이다.

[0392] 양자 통신 플랫폼(2010)은 양자 키 분배(quantum key distribution: QKD)를 통해 보안된 통신을 수행하는 양자 키 분배 처리부(2011), 채널에 입자가 존재하지 않는 무-입자(particle-free) 정보전송과 새로운 형태의 전 이중(full-duplex) 정보전송 및 익명-원격계산(blind tele-computation) 등을 수행하는 반사실 양자 통신 처리부(2013), 차세대이동통신에 양자 통신을 적용하는 경우 무선자원 관리를 수행하는 무선 자원 관리 처리부(2015) 및 네트워크 간섭 제어를 수행하는 네트워크 간섭 제어 처리부(2017)를 포함할 수 있다. 예를 들어, 반사실 양자통신 처리부(2013)는 제1 단말(Alice), 제2 단말(Bob) 및 제3 단말(Charlie) 중 적어도 어느 하나의 역할을 수행할 수 있다.

[0393] 양자 컴퓨팅 플랫폼(2020)은 양자 알고리즘을 기반으로 기하급수적으로 빠른 병렬계산이 가능한 양자컴퓨터의 실용화를 위한 요소 기술의 구현 및 실험을 제공하는 플랫폼이다.

[0394] 양자 컴퓨팅 플랫폼(2020)은 잡음중규모양자(noisy intermediate-scale quantum: NISQ) 장치를 위해 특별 히 설계된 변형 양자알고리즘(variational quantum algorithm: VQA)을 제공하는 변형 양자 알고리즘 처리부(2021), Grover 검색 알고리즘 또는 양자 카운팅 알고리즘과 같은 양자 검색 알고리즘(quantum search algorithm: QSA)을 제공하는 양자 검색 알고리즘 처리부(2023) 및 다체(multi-body) Hamiltonian의 양자강화학습(quantum reinforcement learning)과 같은 양자머신러닝(quantum machine learning: QML) 기술을 제공하는 양자 머신 러닝 처리부(2025)을 포함할 수 있다.

[0395] 양자 관측 및 분석 플랫폼(2030)은 양자 측정 및 양자 시뮬레이션을 지원하고, 양자 결맞음(coherence) 및 얽힘(entanglement)과 같은 실제 입자의 양자특성을 직접 활용하기 때문에 고전 컴퓨터에서 모의실험하기 어려운 문제를 해결하기 위한 플랫폼이다.

[0396] 양자 관측 및 분석 플랫폼(2030)은 양자 상태 단층 촬영을 제공하는 양자 상태 단층 촬영 처리부(2031), 양자 상태 측정을 지원하는 양자 상태 측정 처리부(2033), 큐빗 측정 및 실험을 위한 양자 상관 측정을 지원하는 양

자 상관 측정 처리부(2035) 및 모의실험을 위한 텐서 네트워크 및 Hamiltonian 기반 양자시뮬레이션을 지원하는 텐서 네트워크 실험 처리부(2037)을 포함한다.

[0397] 플랫폼 제어부(240)은 양자 통신 플랫폼(2010), 양자 컴퓨팅 플랫폼(2020) 및 양자 관측 및 분석 플랫폼(2030)에서 수행된 내역 및 측정 결과를 저장하고, 어느 하나의 플랫폼에서 다른 플랫폼의 구성요소의 사용이 필요할 때 이를 연결해 주는 동작을 수행할 수 있다.

[0398] 예를 들어, 양자 통신 플랫폼(2010)의 반사실 양자 통신 처리부(2013)에서 벨 측정이 필요한 경우 벨 측정은 양자 관측 및 분석 플랫폼(2030)의 양자 상태 측정 처리부(2033) 또는 양자 상관 측정 처리부(2035)에서 수행될 수 도 있다.

[0399] 플랫폼 인터페이스부(2050)는 사용자 또는 실험자가 각 플랫폼에 접속할 수 있는 컴퓨터 장치일 수 있다. 예를 들어, 사용자는 플랫폼 인터페이스부(2050)를 통해 양자 관측 및 분석 플랫폼(2030)에 접속하여 원하는 양자 시뮬레이션을 실행할 수 있다.

[0400] 예를 들어, 본 발명의 실시예에 따른 양자정보기술 통합 시스템은 제1단계 내지 제5단계를 수행하는 반사실 양자 통신 처리부를 포함하는 양자 통신 플랫폼 및 도 9 내지 도 11에서 설명된 동작을 수행하는 양자 상태 단층 촬영 처리부를 포함하는 양자 관측 및 분석 플랫폼을 포함할 수 있다.

[0402] 양자정보기술은 통신, 알고리즘 및 시뮬레이션 기술 분야와 융합되어 네트워크 보안, 무선자 원 관리, 채널추정, 네트워크 간섭관리 등 차세대이동통신의 한계를 극복하기 위한 방향으로 지속적으로 연구가 진행되고 있다. 따라서, 양자 통신 플랫폼(2010), 양자 컴퓨팅 플랫폼(2020) 및 양자 관측 및 분석 플랫폼(2030) 각각에 포함되는 구성요소는 각 기술의 발전 및 출현에 따라 대체되거나 개량될 수 있다.

[0403] 예를 들어, 양자 키 분배 처리부(2011)는 차세대이동통신 시스템의 보안계층에 융합되기 위한 기술을 제공하기 위하여 개량될 수 있다.

[0404] 예를 들어, 지능형 네트워크 기능을 요구하는 차세대이동통신 시스템의 간섭 관리에 활용하기 위하여 양자 통신 플랫폼(2010)의 각 구성요소는 개량될 수 있다.

[0406] 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, 영역, 장치, 회로 등의 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다.

[0407] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 특허청구범위의 범위에 속한다.

부호의 설명

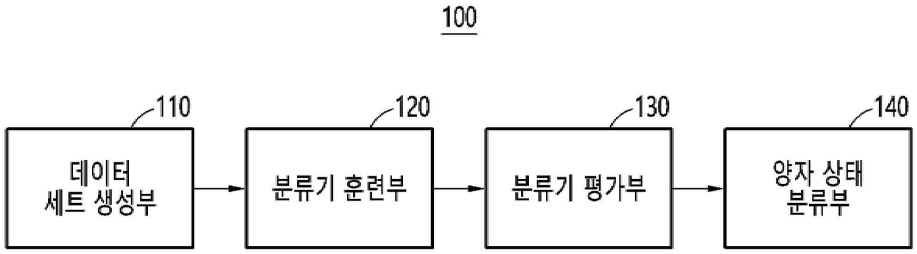
[0408] 100: 양자 상태 분류 장치

110: 데이터 세트 생성부 120: 분류기 훈련부

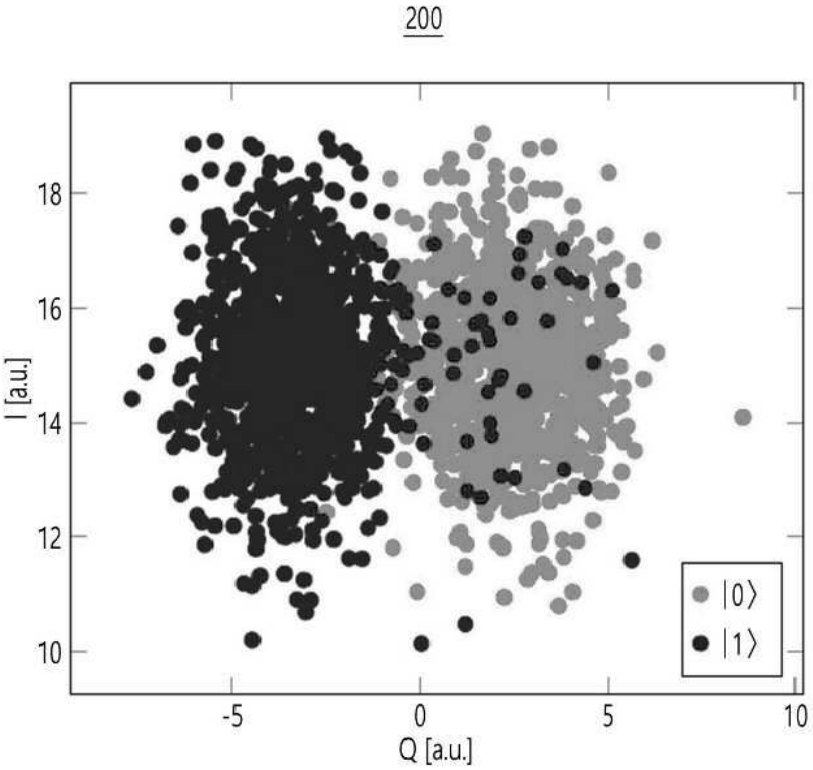
130: 분류기 평가부 140: 양자 상태 분류부

도면

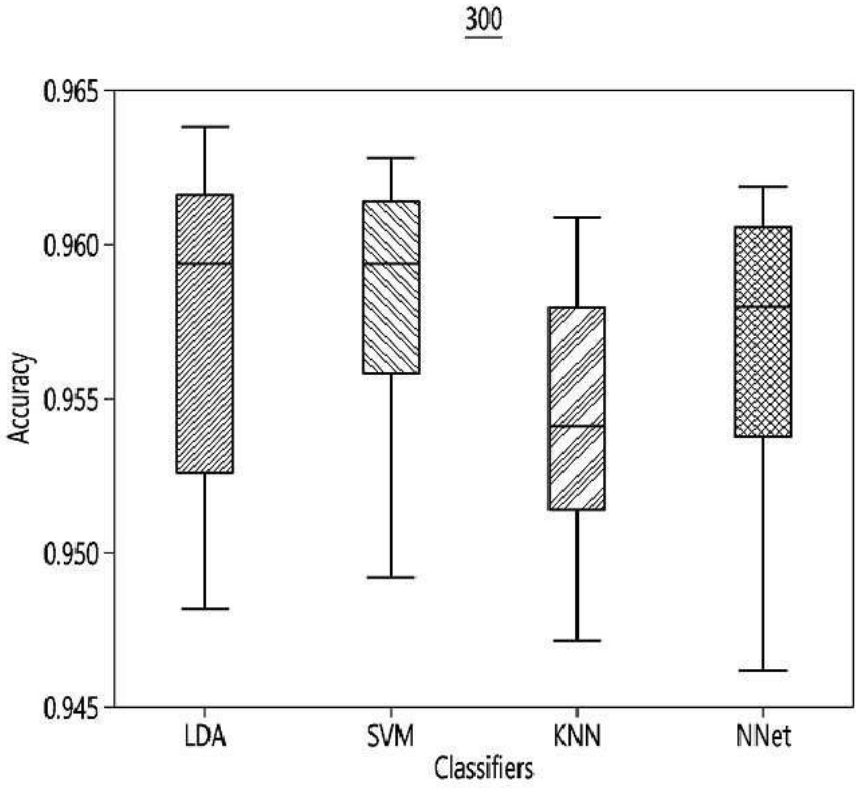
도면1


100
110
데이터
세트 생성부
120
분류기 훈련부
130
분류기 평가부
140
양자 상태
분류부

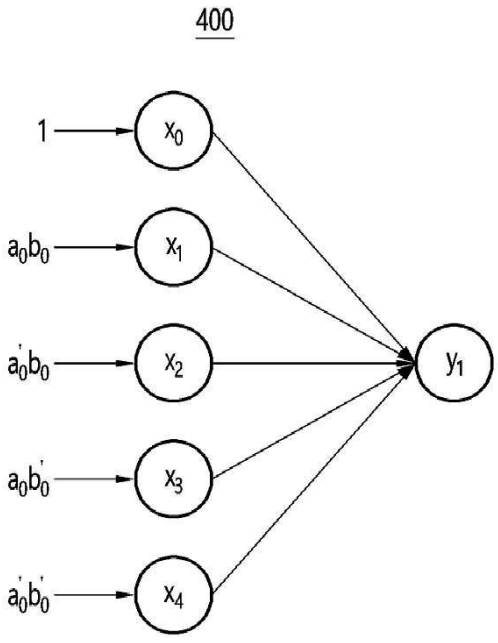
도면2


200
18
16
14
12
10
I [a.u.]
-5
0
5
10
Q [a.u.]
|0⟩
|1⟩

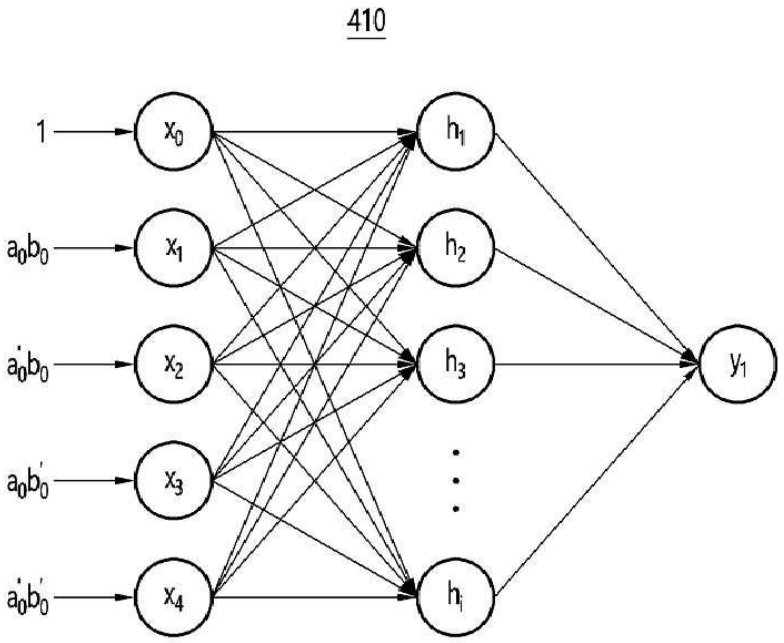
도면3


300
0.965
0.960
0.955
0.950
0.945
Accuracy
LDA
SVM
KNN
NNet
Classifiers

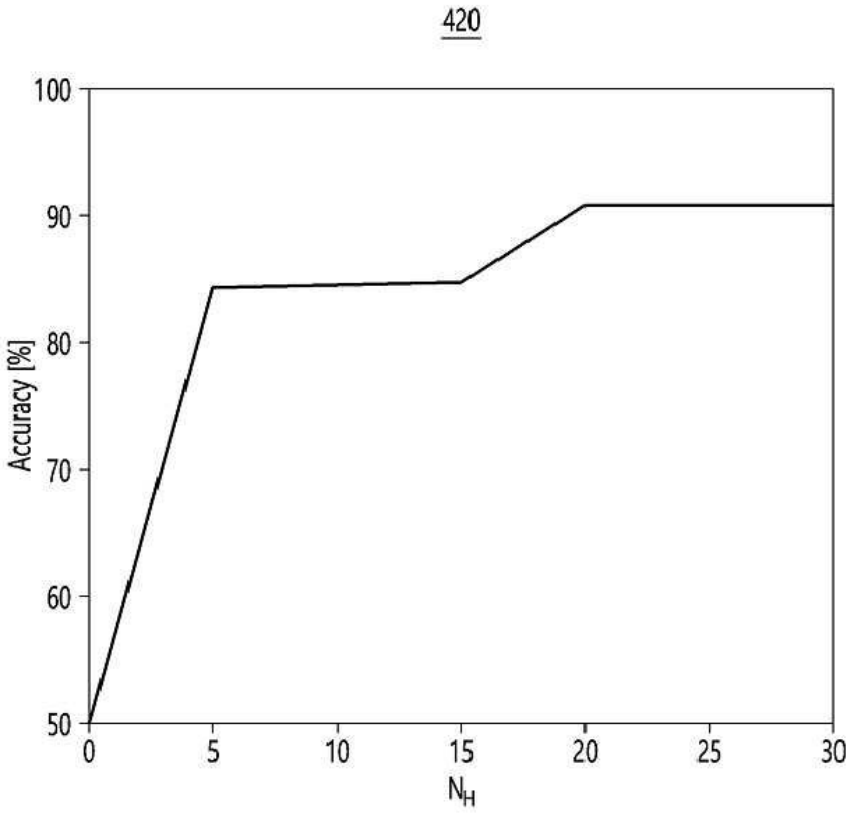
도면4a


400
1
x_0
a_0b_0
x_1
$a_0'b_0$
x_2
y_1
a_0b_0'
x_3
$a_0'b_0'$
x_4

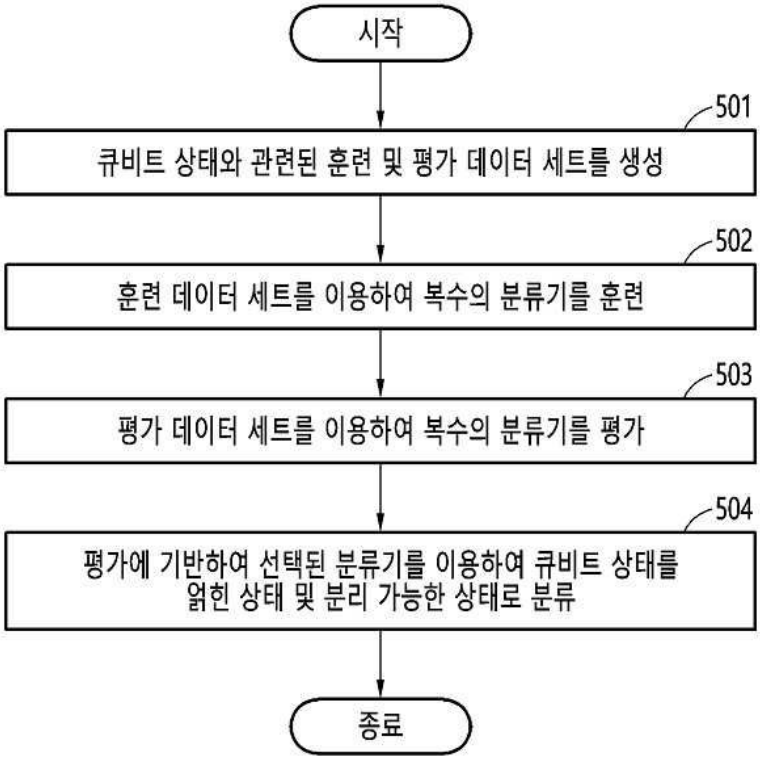
도면4b


410
1
a_0b_0
a_0b_0'
$a_0'b_0$
$a_0'b_0'$
x_0
x_1
x_2
x_3
x_4
h_1
h_2
h_3
h_i
y_1

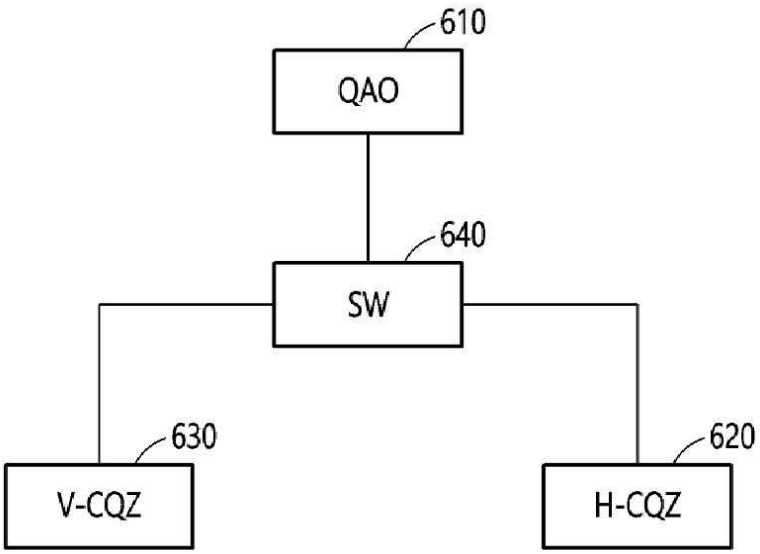
도면4c


420
Accuracy [%]
100
90
80
70
60
50
0
5
10
15
20
25
30
N_H

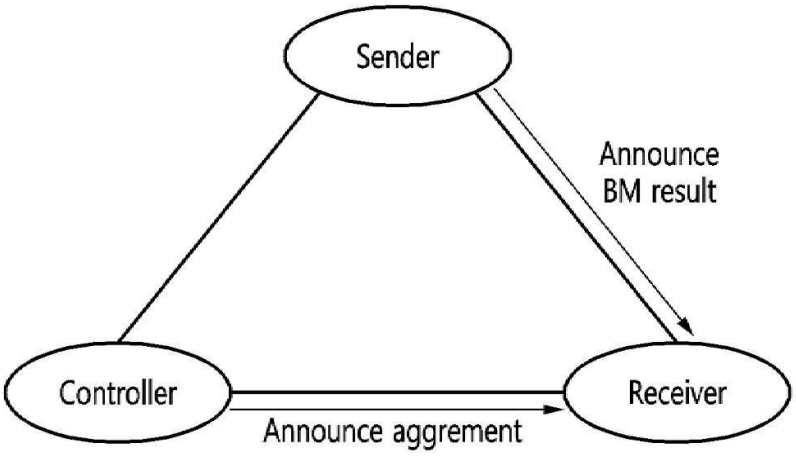
도면5


시작
501
큐비트 상태와 관련된 훈련 및 평가 데이터 세트를 생성
502
훈련 데이터 세트를 이용하여 복수의 분류기를 훈련
503
평가 데이터 세트를 이용하여 복수의 분류기를 평가
504
평가에 기반하여 선택된 분류기를 이용하여 큐비트 상태를
얽힌 상태 및 분리 가능한 상태로 분류
종료

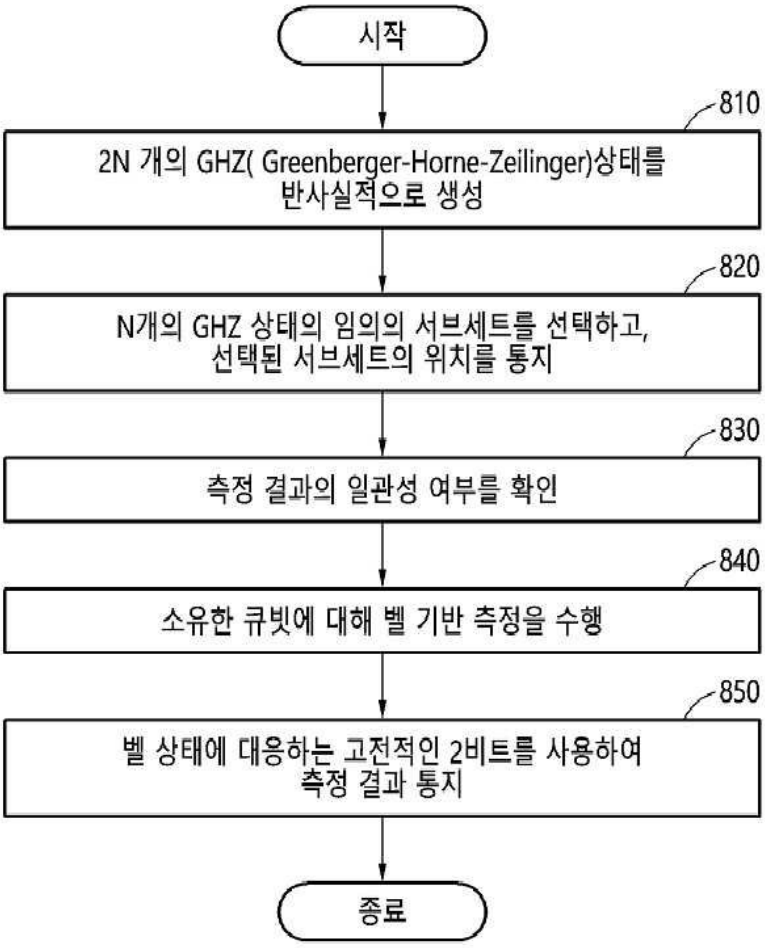
도면6


610
QAO
640
SW
630
V-CQZ
620
H-CQZ

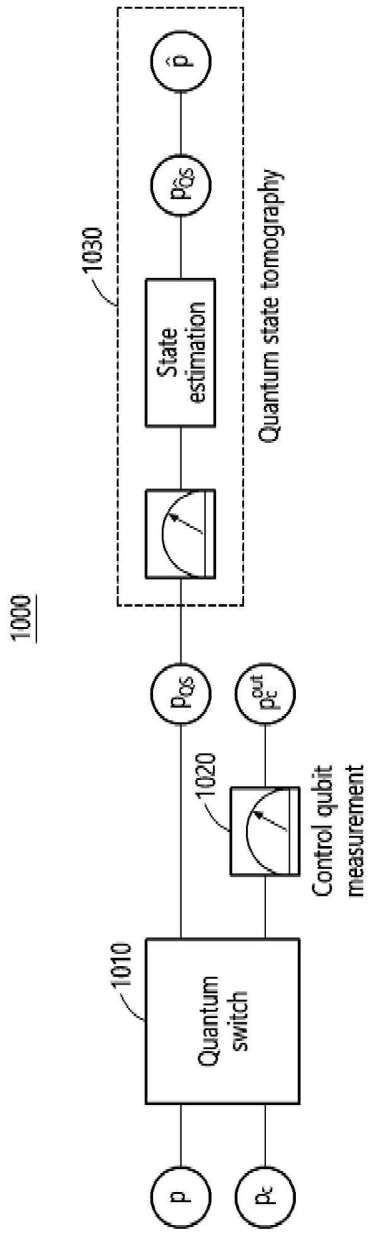
도면7


Sender
Announce
BM result
Controller
Receiver
Announce aggrement

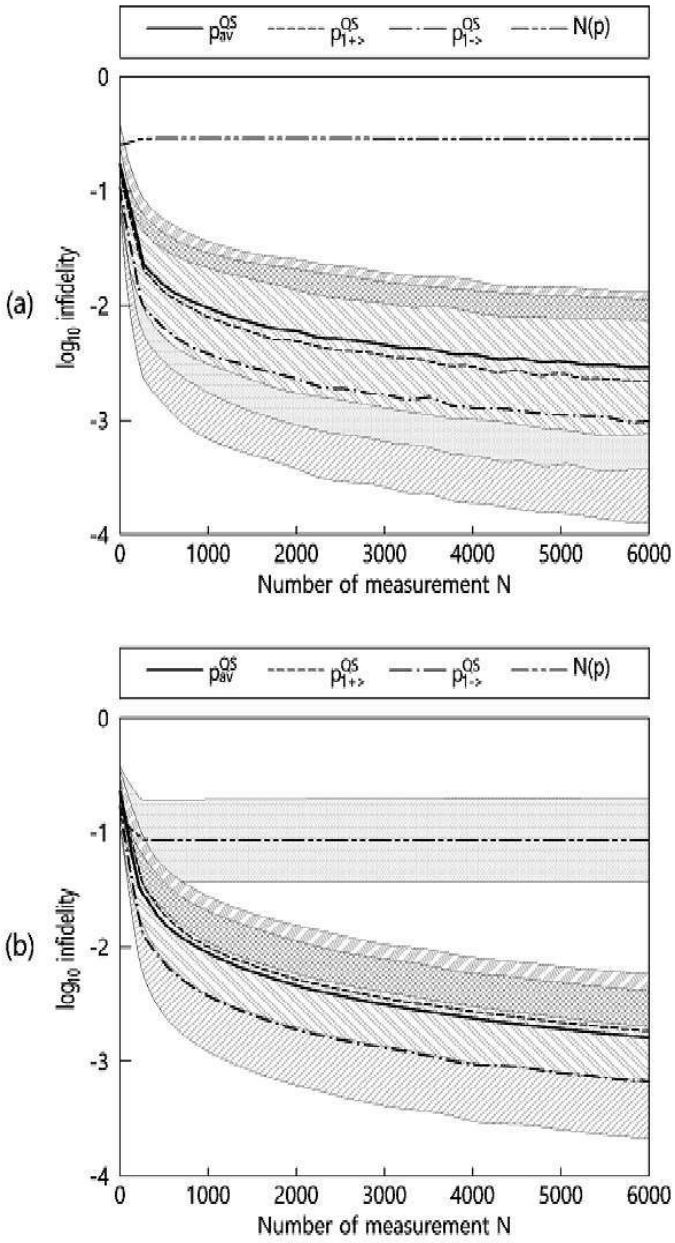
도면8


시작
810
2N 개의 GHZ(Greenberger-Horne-Zeilinger)상태를
반사실적으로 생성
820
N개의 GHZ 상태의 임의의 서브세트를 선택하고,
선택된 서브세트의 위치를 통지
830
측정 결과의 일관성 여부를 확인
840
소유한 큐빗에 대해 벨 기반 측정을 수행
850
벨 상태에 대응하는 고전적인 2비트를 사용하여
측정 결과 통지
종료

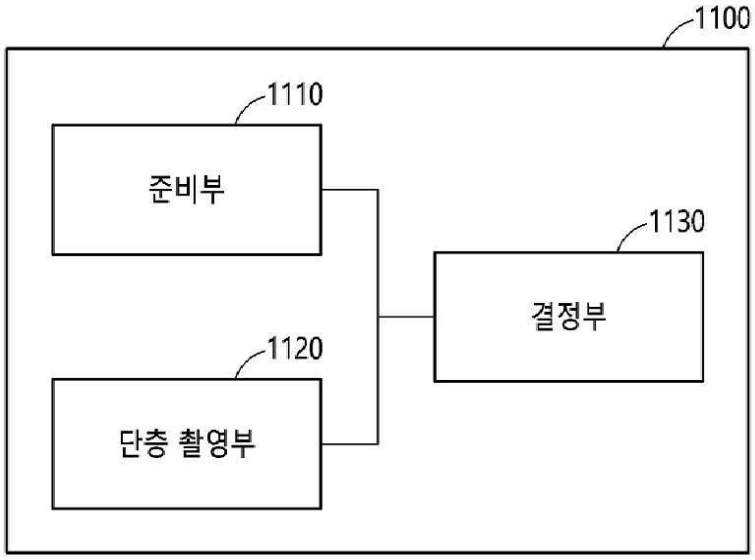
도면9


1000
1010
Quantum switch
p
pc
1020
Control qubit measurement
pos
pc^out
1030
Quantum state tomography
State estimation
pos
p̂

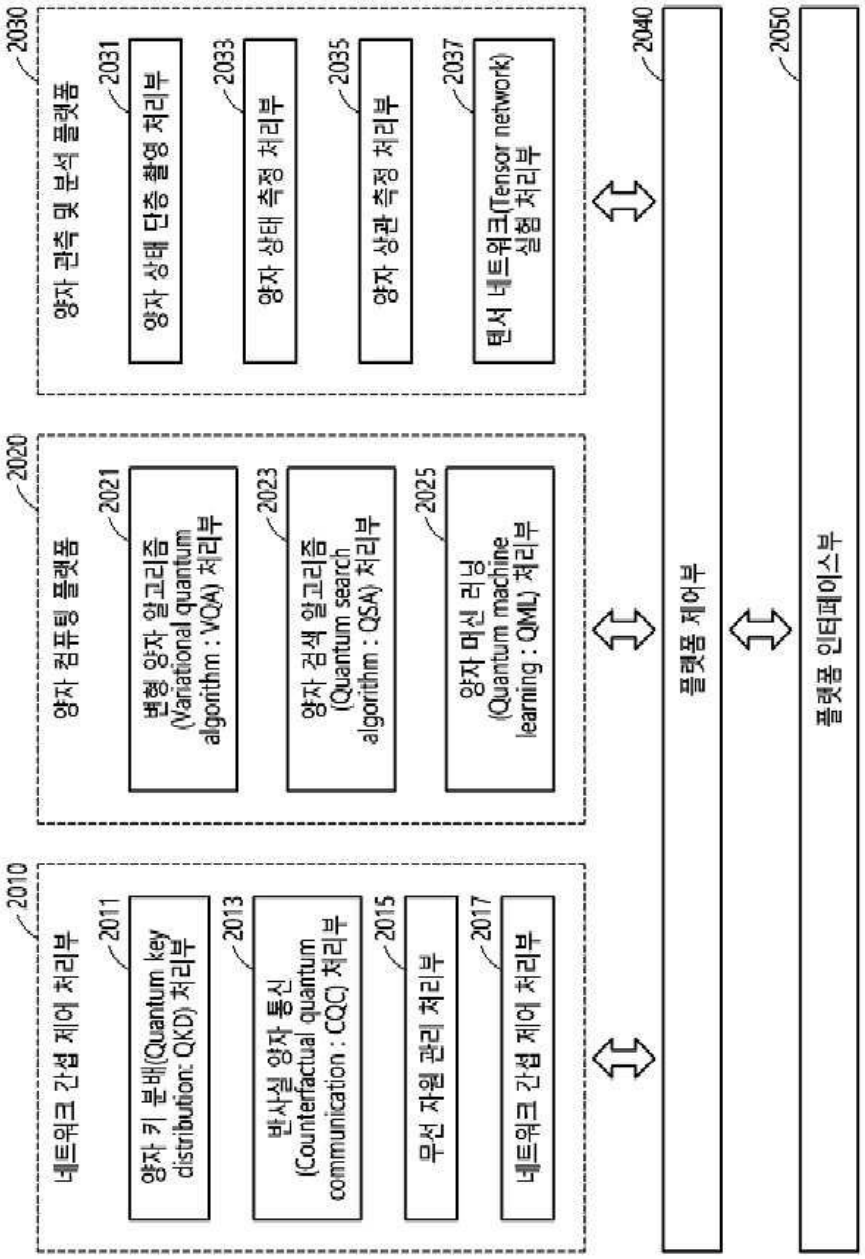
도면10


(a)
(b)
p_{av}^{QS}
$p_{1+>}^{QS}$
$p_{1->}^{QS}$
N(p)
$\log_{10}$ infidelity
0
-1
-2
-3
-4
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
Number of measurement N

도면11



도면12


2010
네트워크 간섭 제어 처리부
2011
양자 키 분배(Quantum key distribution: QKD) 처리부
2013
반사실 양자 통신 (Counterfactual quantum communication : CQC) 처리부
2015
무선 자원 관리 처리부
2017
네트워크 간섭 제어 처리부
2020
양자 컴퓨팅 플랫폼
2021
변형 양자 알고리즘 (Variational quantum algorithm : VQA) 처리부
2023
양자 검색 알고리즘 (Quantum search algorithm : QSA) 처리부
2025
양자 머신 러닝 (Quantum machine learning : QML) 처리부
2030
양자 관측 및 분석 플랫폼
2031
양자 상태 단층 촬영 처리부
2033
양자 상태 측정 처리부
2035
양자 상관 측정 처리부
2037
텐서 네트워크(Tensor network) 실험 처리부
2040
플랫폼 제어부
2050
플랫폼 인터페이스부