

(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)(11) 공개번호 10-2023-0149630
(43) 공개일자 2023년10월27일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06N 10/70 (2022.01) G06N 10/60 (2022.01)
B82Y 10/00 (2017.01)
(52) CPC특허분류
G06N 10/70 (2022.08)
G06N 10/60 (2022.01)
(21) 출원번호 10-2022-0049081
(22) 출원일자 2022년04월20일
심사청구일자 2022년04월20일

(71) 출원인
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(72) 발명자
신현동
경기도 수원시 영통구 청명로 132, 323동 501호(영통동, 벽산삼익아파트)
사예드 무하마드 카짐
경기도 수원시 영통구 청명로59번길 44, B05호
주나이드 우르 랭만
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732, 전자정보관 542호
(74) 대리인
김연권

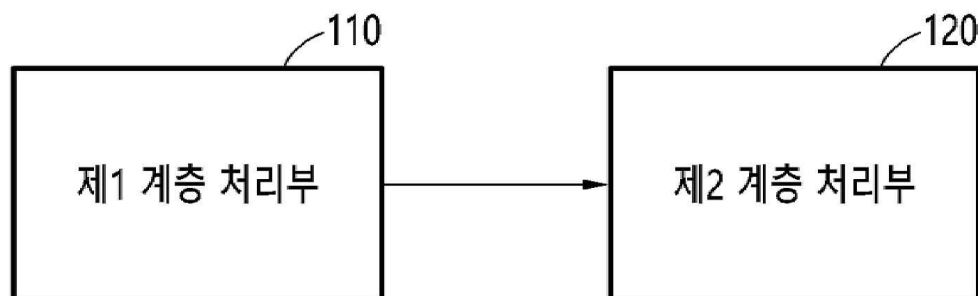
전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 양자 정보 처리 통합 시스템에서 양자 상태 단층 촬영 처리 장치 및 방법

(57) 요약

본 발명은 측정기지의 효율적인 적응형 학습을 도입하여 양자 상태 추정에 소요되는 자원을 줄이는 입자필터 기반 양자 상태 단층 촬영(tomography)에 기반하여 큐비트 및 다중 큐비트 시스템 추정에 소요되는 자원을 줄이는 기술에 관한 것으로, 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 단층 촬영 처리 장치는 큐비트(Qubit)의 기저 단층에 대한 각 반복(iteration)에서 입자 분포를 이용하여 다음 반복의 측정 설정에서 상기 입자 분포를 단일 항목으로 적용하도록 상기 다음 반복의 측정 설정을 최적화하는 제1 계층 처리부 및 상기 최적화된 다음 반복의 측정 설정에 따른 측정 설정 집합들의 측정 결과들을 이용하여 상기 측정 설정 집합들의 수를 감소시키는 제2 계층 처리부를 포함할 수 있다.

대표도 - 도1

100

(52) CPC특허분류

B82Y 10/00 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711155671
과제번호	2019R1A2C2007037
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	(유형1-2)중견연구
연구과제명	양자네트워킹 핵심기술 연구
기 여 율	70/100
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	정보통신기술인력양성/대학ICT연구센터육성지원
연구과제명	6H 차세대 이동통신 기술 개발
기 여 율	30/100
과제수행기관명	경희대학교 산학협력단
연구기간	2021.07.01 ~ 2028.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

큐비트(Qubit)의 기저 단층에 대한 각 반복(iteration)에서 입자 분포를 이용하여 다음 반복의 측정 설정에서 상기 입자 분포를 단일 항목으로 적용하도록 상기 다음 반복의 측정 설정을 최적화하는 제1 계층 처리부; 및
상기 최적화된 다음 반복의 측정 설정에 따른 측정 설정 집합들의 측정 결과들을 이용하여 상기 측정 설정 집합들의 수를 감소시키는 제2 계층 처리부를 포함하는 것을 특징으로 하는
양자 상태 단층 촬영 처리 장치.

청구항 2

제1항에 있어서,
상기 제2 계층 처리부는, 상기 감소된 수가 하나의 요소로 될 경우까지 상기 측정 설정 집합들의 수를 감소시키고, 상기 하나의 요소를 상기 큐비트(Qubit)의 양자 상태 단층 촬영(QST)에 요구되는 큐비트 정보로 캡슐화하는 것을 특징으로 하는
양자 상태 단층 촬영 처리 장치.

청구항 3

제1항에 있어서,
상기 제1 계층 처리부는, 상기 다음 반복의 측정 설정에서 기 준비된 복수의 추정될 양자 상태에 대하여 상기 각 반복(iteration)에서 베이지안 평균 추정(Bayesian mean estimation, BMS)에 따른 추정치의 대각선 기저를 상기 입자 분포로 이용하는 입자 필터를 이용하는 것을 특징으로 하는
양자 상태 단층 촬영 처리 장치.

청구항 4

제3항에 있어서,
상기 입자 필터는, 양자 상태 단층 촬영(quantum state tomography, QST)에 적용되기 위해 사전 분포를 기반으로 블로흐(Bloch) 공간에서 상기 입자 분포와 관련된 특정 입자를 초기화하는 것을 특징으로 하는
양자 상태 단층 촬영 처리 장치.

청구항 5

제1항에 있어서,
상기 제2 계층 처리부는, 상기 측정 결과들에 대한 엔트로피(entropy)를 계산하고, 상기 계산된 엔트로피가 임계 값보다 높은 측정 설정 집합들을 제거하여 상기 측정 설정 집합들의 수가 하나가 되는 경우까지 측정 설정 집합들을 연속적으로 감소시키는 것을 특징으로 하는
양자 상태 단층 촬영 처리 장치.

청구항 6

제1 계층 처리부에서, 큐비트(Qubit)의 기저 단층에 대한 각 반복(iteration)에서 입자 분포를 이용하여 다음 반복의 측정 설정에서 상기 입자 분포를 단일 항목으로 적용하도록 상기 다음 반복의 측정 설정을 최적화하는 단계; 및
제2 계층 처리부에서, 상기 최적화된 다음 반복의 측정 설정에 따른 측정 설정 집합들의 측정 결과들을 이용하

여 상기 측정 설정 집합들의 수를 감소시키는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 양자 상태 단층 촬영 처리 방법.

청구항 7

제6항에 있어서,

제2 계층 처리부에서, 상기 감소된 수가 하나의 요소로 될 경우까지 상기 측정 설정 집합들의 수를 감소시키고, 상기 하나의 요소를 상기 큐비트(Qubit)의 양자 상태 단층 촬영(QST)에 요구되는 큐비트 정보로 캡슐화하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는

양자 상태 단층 촬영 처리 방법.

청구항 8

제6항에 있어서,

상기 큐비트(Qubit)의 기저 단층에 대한 각 반복(iteration)에서 입자 분포를 이용하여 다음 반복의 측정 설정에서 상기 입자 분포를 단일 항목으로 적용하도록 상기 다음 반복의 측정 설정을 최적화하는 단계는,

상기 다음 반복의 측정 설정에서 기 준비된 복수의 추정될 양자 상태에 대하여 상기 각 반복(iteration)에서 베이지안 평균 추정(Bayesian mean estimation, BMS)에 따른 추정치의 대각선 기저를 상기 입자 분포로 이용하는 입자 필터를 이용하여 상기 다음 반복의 측정 설정을 최적화하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는

양자 상태 단층 촬영 처리 방법.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 입자 필터는, 양자 상태 단층 촬영(quantum state tomography, QST)에 적용되기 위해 사전 분포를 기반으로 블로흐(Bloch) 공간에서 상기 입자 분포와 관련된 특정 입자를 초기화하는 것을 특징으로 하는

양자 상태 단층 촬영 처리 방법.

청구항 10

제6항에 있어서,

상기 최적화된 다음 반복의 측정 설정에 따른 측정 설정 집합들의 측정 결과들을 이용하여 상기 측정 설정 집합들의 수를 감소시키는 단계는,

상기 측정 결과들에 대한 엔트로피(entropy)를 계산하고, 상기 계산된 엔트로피가 임계 값보다 높은 측정 설정 집합들을 제거하여 상기 측정 설정 집합들의 수가 하나가 되는 경우까지 측정 설정 집합들을 연속적으로 감소시키는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는

양자 상태 단층 촬영 처리 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001]

본 발명은 양자 상태 단층 촬영 처리 장치 및 방법에 관한 것으로, 보다 구체적으로, 측정기저의 효율적인 적응형 학습을 도입하여 양자 상태 추정에 소요되는 자원을 줄이는 입자필터 기반 양자 상태 단층 촬영(tomography)에 기반하여 큐비트 및 다중 큐비트 시스템 추정에 소요되는 자원을 줄이는 기술을 제공한다. 양자 상태 단층 촬영 처리 장치 및 방법은 양자정보기술 통합 시스템에서 양자 관측 및 분석 플랫폼의 양자 상태 단층 촬영 처리부에 적용될 수 있다.

배경 기술

- [0002] 양자역학(quantum mechanics)은 분자, 원자, 전자, 소립자와 미시적인 계의 현상을 다루는 즉, 작은 크기를 갖는 계의 현상을 연구하는 물리학의 분야이다. 양자역학을 이해하기 위해 양자와 역학의 의미를 각각 살펴볼 수 있다.
- [0003] 양자로 번역된 영어의 quantum은 양을 의미하는 quantity에서 온 말로, 무엇인가 띄엄띄엄 떨어진 양으로 있는 것을 가리키는 말이다.
- [0004] 역학은 말 그대로는 힘의 학문이지만, 실제로는 이러저러한 힘을 받는 물체가 어떤 운동을 하게 되는지 밝히는 물리학의 한 이론이라고 할 수 있다.
- [0005] 간단히 말해 힘과 운동의 이론이다. 이렇듯 양자역학이란 띄엄띄엄 떨어진 양으로 있는 것이 이러저러한 힘을 받으면 어떤 운동을 하게 되는지 밝히는 이론이라고 할 수 있다.
- [0006] 양자 얽힘(quantum entanglement)은 양자 통신, 양자 암호 및 양자 계측학을 포함하는 양자 정보 처리의 재료(resource)이다.
- [0007] 양자역학에서, 양자 얽힘 또는 간단히 얽힘은 두 부분 계 사이에 존재할 수 있는 일련의 비고전적인 상관관계이다. 얽힘은 두 부분계가 공간적으로 서로 멀리 떨어져 있어도 존재할 수 있다.
- [0008] 예를 들어, 두입자를 일정한 양자상태에 두어 두 입자의 스핀이 항상 반대가 되도록 할 수 있다. (예를 들어, 두 스핀의 단일항 상태) 양자역학에 따르면, 측정하기 전까지는 두 입자의 상태를 알 수 없다.
- [0009] 하지만 측정을 한다면, 그 순간 한 계의 상태가 결정되고, 이는 즉시 그 계와 얽혀 있는 다른 계의 상태까지 결정하게 된다.
- [0010] 이는 마치 정보가 순식간에 한 계에서 다른 계로 이동한 것처럼 보일 수 있다.
- [0011] 양자 채널은 양자 정보 이론과 양자 통신 프로토콜의 핵심이라고 할 수 있다. 프로토콜의 성능과 실행 품질은 양자 채널의 용량에 크게 좌우될 수 있다. 현실적인 관점에서, 이용 가능한 양자 채널에 대한 정보를 모두 인지할 수 없으므로 실제로 프로토콜을 효율적으로 구현하는 것은 매우 어렵다.
- [0012] 예를 들어, 양자 채널의 기본적인 임무 중 하나인, 멀리 떨어진 당사자간 정보 전송을 생각할 수 있다. 최대로 전송할 수 있는 정보는 채널의 용량에 의해 결정될 수 있다.
- [0013] 따라서, 일반적으로 채널 용량을 특성화하기 전에 해당 양자 채널에 대한 이해가 필요하다.
- [0014] 일반화된 파울리 채널 또는 이산 바일 채널(discrete Weyl channel)은 파울리 큐비트, 디페이싱 및 디폴라이징 채널을 포함하는 광범위한 종류의 큐비트 채널을 구성한다.
- [0015] 중요성과 다양성을 고려할 때 이산 바일 채널을 특성화하기위한 실험 설정을 고안하는 몇 가지 연구가 수행되었고, 일반화된 파울리 채널의 파라미터 추정의 실행 가능한 방법이 탐색된 바 있다.
- [0016] 앞서 언급한 모든 추정 방법은 d 차원 힐버트 공간에서 작동하는 양자 채널이 $d^2 \times d^2$ 프로세스 매트릭스로 표현되는 전통적인 프로세스 단층 촬영법(tomography)을 따랐다.
- [0017] 양자 상태의 특성화는 양자 기술의 출현과 함께 필수적인 작업이 되었고, 이는 양자 컴퓨팅, 광학 및 통신과 같은 연구 분야에서 중요한 의미를 갖는다.
- [0018] 완전 또는 전체 양자 상태 단층 촬영(quantum state tomography, QST)은 충분한 양의 가용성을 고려할 때 임의의 양자 상태를 통계적으로 식별하는 작업을 공식적으로 다루는 분야이다
- [0019] 단층 촬영의 다른 인기 있는 분야로는 각각 게이트 세트(Gate Set) 단층 촬영 및 해밀토니안(Hamiltonian) 단층 촬영에서 연구된 양자 논리 게이트 및 해밀토니안 특성 분석이 있다.
- [0020] 양자 상태 ρ 가 동일하게 준비된 큐비트의 앙상블이 주어지면 QST는 일련의 측정을 사용하고 각 측정의 결과를 사용하여 ρ 를 추정하는 또 다른 양자 상태 ρ 를 재구성될 수 있다.
- [0021] 통계적 정량화를 위해서는 추정치의 오류에 대한 설명도 필요하고, 측정된 큐비트의 수가 증가할수록 상대 주파수가 확률적으로 실제 주파수에 근접함에 따라 근사 오차가 감소할 수 있다.
- [0022] 그러나 무한히 많은 큐비트가 없는 경우(실생활의 경우) 적은 리소스를 사용하여 고정 임계값(선택한 성능 지수) 아래로 오류를 줄이는 물리적으로 유효한 양자 상태를 재구성하는 방법이 필요하다.

- [0023] 유효한 큐비트는 단위 자취가 있는 에르미트(Hermitian) 양의 준정부호 밀도 행렬로 설명된다.
- [0024] 베이지안 추론 방법은 재구성된 상태의 유효성을 보장하고 완전한 통계적 정량화를 제공하는 데 사용될 수 있다.
- [0025] 또한, 양자 상태 단층 촬영 처리 뿐만 아니라 관련된 기술의 구현 및 연구를 지원하기 위한 다양한 양자 정보 처리를 지원할 수 있는 양자 정보 통합 시스템이 필요하다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0026] (특허문헌 0001) 한국등록특허 제10-2231130호, "양자 채널 용량 추정 방법 및 이를 이용한 양자 통신 시스템"

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0027] 본 발명은 측정기지의 효율적인 적응형 학습을 도입하여 양자 상태 추정에 소요되는 자원을 줄이는 입자필터 기반 양자 상태 단층 촬영(tomography)에 기반하여 큐비트 및 다중 큐비트 시스템 추정에 소요되는 자원을 줄이는 것을 목적으로 한다.
- [0028] 본 발명은 고차원 양자 상태 학습에 기반하여 추정 오차의 통계적 정량화와 양자 시스템의 특성화율을 향상시키는 것을 목적으로 한다.
- [0029] 본 발명은 입자 분포에 기반한 입자 필터를 이용하여 다음 반복의 측정 설정을 최적화하는 제1 단계와 최적화된 측정 설정에 기반한 측정 설정 집합들의 측정 결과를 이용하여 측정 설정 집합들의 수를 주기적으로 감소시키는 제2 단계를 적응적으로 적용하여 수치분석에 따른 편의 추정량을 사용함에 단층 촬영(tomography)의 정밀도를 증가시키는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

- [0030] 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 단층 촬영 처리 장치는 큐비트(Qubit)의 기저 단층에 대한 각 반복(iteration)에서 입자 분포를 이용하여 다음 반복의 측정 설정에서 상기 입자 분포를 단일 항목으로 적용하도록 상기 다음 반복의 측정 설정을 최적화하는 제1 계층 처리부 및 상기 최적화된 다음 반복의 측정 설정에 따른 측정 설정 집합들의 측정 결과들을 이용하여 상기 측정 설정 집합들의 수를 감소시키는 제2 계층 처리부를 포함할 수 있다.
- [0031] 상기 제2 계층 처리부는, 상기 감소된 수가 하나의 요소로 될 경우까지 상기 측정 설정 집합들의 수를 감소시키고, 상기 하나의 요소를 상기 큐비트(Qubit)의 양자 상태 단층 촬영(QST)에 요구되는 큐비트 정보로 캡슐화할 수 있다.
- [0032] 상기 제1 계층 처리부는, 상기 다음 반복의 측정 설정에서 기 준비된 복수의 추정될 양자 상태에 대하여 상기 각 반복(iteration)에서 베이지안 평균 추정(Bayesian mean estimation, BMS)에 따른 추정치의 대각선 기저를 상기 입자 분포로 이용하는 입자 필터를 이용할 수 있다.
- [0033] 상기 입자 필터는, 양자 상태 단층 촬영(quantum state tomography, QST)에 적용되기 위해 사전 분포를 기반으로 블로흐(Bloch) 공간에서 상기 입자 분포와 관련된 특정 입자를 초기화할 수 있다.
- [0034] 상기 제2 계층 처리부는, 상기 측정 결과들에 대한 엔트로피(entropy)를 계산하고, 상기 계산된 엔트로피가 임계 값보다 높은 측정 설정 집합들을 제거하여 상기 측정 설정 집합들의 수가 하나가 되는 경우까지 측정 설정 집합들을 연속적으로 감소시킬 수 있다.
- [0035] 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 단층 촬영 처리 방법은 제1 계층 처리부에서, 큐비트(Qubit)의 기저 단층에 대한 각 반복(iteration)에서 입자 분포를 이용하여 다음 반복의 측정 설정에서 상기 입자 분포를 단일 항목으로 적용하도록 상기 다음 반복의 측정 설정을 최적화하는 단계 및 제2 계층 처리부에서, 상기 최적화된 다음 반복의 측정 설정에 따른 측정 설정 집합들의 측정 결과들을 이용하여 상기 측정 설정 집합들의 수를 감소시키는

는 단계를 포함할 수 있다.

[0036] 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 단층 촬영 처리 방법은 제2 계층 처리부에서, 상기 감소된 수가 하나의 요소로 될 경우까지 상기 측정 설정 집합들의 수를 감소시키고, 상기 하나의 요소를 상기 큐비트(Qubit)의 양자 상태 단층 촬영에 요구되는 큐비트 정보로 캡슐화하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0037] 상기 큐비트(Qubit)의 기저 단층에 대한 각 반복(iteration)에서 입자 분포를 이용하여 다음 반복의 측정 설정에서 상기 입자 분포를 단일 항목으로 적용하도록 상기 다음 반복의 측정 설정을 최적화하는 단계는, 상기 다음 반복의 측정 설정에서 기 준비된 복수의 추정된 양자 상태에 대하여 상기 각 반복(iteration)에서 베이저안 평균 추정(Bayesian mean estimation, BMS)에 따른 추정치의 대각선 기저를 상기 입자 분포로 이용하는 입자 필터를 이용하여 상기 다음 반복의 측정 설정을 최적화하는 단계를 포함할 수 있다.

[0038] 상기 입자 필터는, 양자 상태 단층 촬영(quantum state tomography, QST)에 적용되기 위해 사전 분포를 기반으로 블로흐(Bloch) 공간에서 상기 입자 분포와 관련된 특정 입자를 초기화할 수 있다.

[0039] 상기 최적화된 다음 반복의 측정 설정에 따른 측정 설정 집합들의 측정 결과들을 이용하여 상기 측정 설정 집합들의 수를 감소시키는 단계는, 상기 측정 결과들에 대한 엔트로피(entropy)를 계산하고, 상기 계산된 엔트로피가 임계 값보다 높은 측정 설정 집합들을 제거하여 상기 측정 설정 집합들의 수가 하나가 되는 경우까지 측정 설정 집합들을 연속적으로 감소시키는 단계를 포함할 수 있다.

발명의 효과

[0040] 본 발명은 측정기저의 효율적인 적응형 학습을 도입하여 양자 상태 추정에 소요되는 자원을 줄이는 입자필터 기반 양자 상태 단층 촬영(tomography)에 기반하여 큐비트 및 다중 큐비트 시스템 추정에 소요되는 자원을 줄일 수 있다.

[0041] 본 발명은 고차원 양자 상태 학습에 기반하여 추정 오차의 통계적 정량화와 양자 시스템의 특성화율을 향상시킬 수 있다.

[0042] 본 발명은 입자 분포에 기반한 입자 필터를 이용하여 다음 반복의 측정 설정을 최적화하는 제1 단계와 최적화된 측정 설정에 기반한 측정 설정 집합들의 측정 결과를 이용하여 측정 설정 집합들의 수를 주기적으로 감소시키는 제2 단계를 적응적으로 적용하여 수치분석에 따른 편의 추정량을 사용함에 단층 촬영(tomography)의 정밀도를 증가시킬 수 있다.

[0043] 또한, 본 발명의 실시예에 따르면, 양자 상태 단층 촬영 처리 뿐만 아니라 관련된 기술의 구현 및 연구를 지원하기 위한 다양한 양자 정보 처리를 지원할 수 있다.

도면의 간단한 설명

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

도 2는 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 단층 촬영 처리 방법을 설명하는 도면이다.

도 3은 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 단층 촬영 처리 방법의 성능을 설명하는 도면이다.

도 4는 본 발명의 실시예에 따른 반사실적 얽힘 분배(Counterfactual Entanglement Distribution) 모델을 설명하기 위한 도면이다.

도 5는 본 발명의 실시예에 따른 제어된 양자 순간이동의 개념을 나타내는 도면이다.

도 6은 본 발명의 실시예에 따른 제어된 반사실적 양자 순간이동 지원 장치의 동작을 나타내는 흐름도이다.

도 7은 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 단층 촬영 처리 장치를 설명하는 도면이다.
- [0062] 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 단층 촬영 처리 장치의 구성 요소를 예시한다.
- [0063] 도 1을 참고하면, 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 단층 촬영 처리 장치(100)는 제1 계층 처리부(110) 및 제2 계층 처리부(120)를 포함한다.
- [0064] 일례로, 양자 상태 단층 촬영 처리 장치(100)는 단일 큐비트(qubit) 및 다중 큐비트 시스템 추정에 소요되는 자원을 줄일 수 있다.
- [0065] 본 발명의 일실시예에 따르면 양자 상태 단층 촬영 처리 장치(100)는 측정기지의 효율적인 적응형 학습을 도입하여 양자 상태 추정에 소요되는 자원을 줄이는 입자필터 기반 양자 상태 단층 촬영(tomography)을 수행한다.
- [0066] 일례로, 양자 상태 단층 촬영 처리 장치(100)는 복수개의 추정될 동일 양자 상태를 준비하고, 정보적으로 완전한(informationally complete) 측정 구성에서 양자 상태를 측정하며, 사전분포 지식이 실험 결과와 함께 증가되어 추정치와 오류를 보고할 수 있다.
- [0067] 한편, 양자 측정은 반복적으로 계속되며 다음 측정 연산자가 기존 입자필터 분포에 따라 달라지게 되는데 이는 제1 계층 처리부(110)에 의해 수행된다.
- [0068] 본 발명의 일실시예에 따르면 제1 계층 처리부(110)는 큐비트(Qubit)의 기저 단층에 대한 각 반복(iteration)에

서 입자 분포를 이용하여 다음 반복의 측정 설정에서 입자 분포를 단일 항목으로 적용하도록 다음 반복의 측정 설정을 최적화할 수 있다.

[0069] 베이지안 추론 방법은 재구성된 상태의 유효성을 보장하고, 완전한 통계적 정량화를 제공하는데 활용된다.

[0070] 베이지안 추론 방법의 일반적인 구현은 사전, 가능성 및 증거를 사용하고, 이러한 요소는 사후 분포를 생성할 수 있다.

[0071] 베이지안 평균 추정(Bayesian mean estimation, BMS) 방법은 사후 평균을 추정으로 사용된다.

[0072] 베이지안 체계(Bayesian system)의 더 강력하고 계산하기 쉬운 구현은 입자 필터(pixel filter, PF)로 지칭될 수 있고, 이 방법의 양자 버전에서 예상 상태는 사전에 따라 배포되며, 측정할 때마다 이러한 입자의 가능성을 업데이트될 수 있다.

[0073] 본 발명의 일실시예에 따르면 제1 계층 처리부(110)는 다음 반복의 측정 설정에서 기 준비된 복수의 추정될 양자 상태에 대하여 각 반복(iteration)에서 베이지안 평균 추정에 따른 추정치의 대각선 기저를 입자 분포로 이용하는 입자 필터를 이용할 수 있다.

[0074] 일례로, 입자 필터는 양자 상태 단층 촬영(quantum state tomography, QST)에 적용되기 위해 사전 분포를 기반으로 블로흐(Bloch) 공간에서 입자 분포와 관련된 특정 입자를 초기화할 수 있다.

[0075] 입자 필터는 큐비트의 경우 임의의 p 를 블로흐 벡터 r 로 나타낼 수 있으며, 하기 수학적 식 1로 표현될 수 있다.

[0077] [수학적 식 1]

$$\rho = \frac{1}{2} (\mathbb{I} + \mathbf{r} \cdot \boldsymbol{\sigma})$$

[0078]

[0080] 수학적 식 1에서, $\mathbb{I}$ 는 2 X 2 단위 행렬이고, $\mathbf{r} = (r_x, r_y, r_z) \in \mathbb{R}^3$ 및 $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ 는 파울리(Pauli) 연산자의 벡터일 수 있고, 상태(state)의 유효성을 보장하기 위해, $\|\mathbf{r}\|_2 \leq 1$ 이고, $\|\cdot\|_2$ 는 유클리드 규범일 수 있다.

[0081] 양자 상태 단층 촬영 처리 장치(100)는 양자 상태 단층 촬영(의 경우, 처음에 $i \in \{x, y, z\}$ 에 대한 σ_i 구성에서 ρ 를 측정한다.

[0082] 또한, 양자 상태 단층 촬영 처리 장치(100)는 $\ell \in \{+1_i, -1_i\}$ 에 대한 $|\ell\rangle$ 결과(outcome)에 대한 각 i 의 가능성 $P|\ell\rangle = \text{tr}(|\ell\rangle\langle\ell|\rho)$ 을 관찰한다.

[0083] 양자 상태 단층 촬영 처리 장치(100)는 다음 QST의 작업에서 ρ 를 추정하기 위해 이러한 확률을 가장 잘 근사한다.

[0084] 양자 상태 단층 촬영 처리 장치(100)는 입자 필터를 사용하여 QST를 적용하기 위해 사전 분포를 기반으로 Bloch 공간에서 $k \in \{1, \dots, k\}$ 에 대한 $\{\gamma_k\}$ 입자를 초기화할 수 있다.

[0085] 양자 상태 단층 촬영 처리 장치(100)는 σ_i 구성에서 N_0 번째 큐비트의 측정 이후에, 1의 결과에 해당하는 n_1 을 관찰하고, 우도 함수(likelihood function)를 하기 수학적 식 2와 같이 평가한다.

[0087] [수학식 2]

[0088]

$$\mathcal{L}(\gamma_k) = N_0! \prod_{\ell} \frac{\text{tr}(|\ell\rangle\langle\ell| \gamma_k)^{n_{\ell}}}{n_{\ell}!}$$

[0090]

가중치 w_k 로 알려진 입자의 정규화된 가능성 분포는 이 반복에 대한 사후 분포를 형성할 수 있다.

[0091]

일례로, 제1 계층 처리부(110)는 적응성의 첫 번째 계층에서 파울리(Pauli) 행렬로 측정 세트를 초기화하고, 각 측정 후 사후 분포의 베이저안 평균 추정을 기반으로 원래 집합에 단일 항목을 적용할 수 있다.

[0092]

이것은 우리 집합의 요소 중 하나의 대각선 기저가(평균적으로) ρ 의 대각선 기저에 더 근접하도록 측정 집합을 회전시키는 것과 유사할 수 있다.

[0093]

본 발명의 일실시예에 따르면 제2 계층 처리부(120)는 최적화된 다음 반복의 측정 설정에 따른 측정 설정 집합들의 측정 결과들을 이용하여 측정 설정 집합들의 수를 감소시킬 수 있다.

[0094]

일례로, 제2 계층 처리부(120)는 감소된 수가 하나의 요소로 될 경우까지 측정 설정 집합들의 수를 감소시키고, 하나의 요소를 큐비트(Qubit)의 양자 상태 단층 촬영(quantum state tomography, QST)에 요구되는 큐비트 정보로 캡슐화할 수 있다.

[0095]

본 발명의 일실시예에 따르면 제2 계층 처리부(120)는 측정 결과들에 대한 엔트로피(entropy)를 계산하고, 계산된 엔트로피가 임계 값보다 높은 측정 설정 집합들을 제거하여 측정 설정 집합들의 수가 하나가 되는 경우까지 측정 설정 집합들을 연속적으로 감소시킬 수 있다.

[0096]

양자 상태 단층 촬영 처리 장치(100)는 반복이 반복되면 연산자의 측정 결과가 n_l 이 $N_0/2$ 에 수렴하는 것을 확인하고, 이는 엔트로피를 최대화할 수 있다.

[0097]

양자 상태 단층 촬영 처리 장치(100)는 사전 분포 지식이 필요 없는 양자 시스템으로서 부정확한 사전 적용이 수렴을 지연시키는 문제점의 발생을 방지한다.

[0098]

다시 말해, 양자 상태 단층 촬영 처리 장치(100)는 분포 지식에 대해 강력하지만 정확한 정보를 제공하는 사전에 비해 동일한 추정 정확도 달성을 위해서 더 많은 수의 측정 반복을 수행한다.

[0099]

QST(quantum state tomography)의 경우 블로흐 구를 σ -의 회전된 축으로 시각화하면, ρ 는 한 축에만 가까울 수 있다.

[0100]

이 통찰력을 사용하여 이 설정에서 엔트로피를 최대화하는 연산자에 대한 측정은 의미 있는 정보를 제공하지 않으므로 측정 세트에서 제거될 수 있음을 이해하고, 이러한 방식으로 하나의 요소만 가질 때까지 측정 세트를 연속적으로 줄일 수 있다.

[0101]

이 요소는 이 회전된 블로흐 공간에서 QST에 필요한 전체 큐비트 정보를 캡슐화할 수 있다.

[0102]

따라서, 본 발명은 측정기지의 효율적인 적응형 학습을 도입하여 양자 상태 추정에 소요되는 자원을 줄이는 입자필터 기반 양자 상태 단층 촬영(tomography)에 기반하여 큐비트 및 다중 큐비트 시스템 추정에 소요되는 자원을 줄일 수 있다.

[0104]

도 2는 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 단층 촬영 처리 방법을 설명하는 도면이다.

[0105]

도 2는 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 단층 촬영 처리 방법을 예시한다.

[0106]

도 2를 참고하면, 단계(201)에서 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 단층 촬영 처리 방법은 각 반복에서 입자 분포를 이용하여 다음 반복의 측정 설정을 최적화한다.

[0107]

즉, 양자 상태 단층 촬영 처리 방법은 큐비트(Qubit)의 기저 단층에 대한 각 반복(iteration)에서 입자 분포를 이용하여 다음 반복의 측정 설정에서 상기 입자 분포를 단일 항목으로 적용하도록 상기 다음 반복의 측정 설정을 최적화할 수 있다.

- [0108] 단계(202)에서 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 단층 촬영 처리 방법은 최적화된 다음 반복의 측정 설정에 따른 측정 결과들을 이용하여 측정 설정 집합들의 수를 감소시킨다.
- [0109] 즉, 양자 상태 단층 촬영 처리 방법은 최적화된 다음 반복의 측정 설정에 따른 측정 설정 집합들의 측정 결과들을 이용하여 측정 설정 집합들의 수를 감소시킬 수 있다.
- [0110] 예를 들어, 양자 상태 단층 촬영 처리 방법은 측정 결과들에 대한 엔트로피(entropy)를 계산하고, 계산된 엔트로피가 임계 값보다 높은 측정 설정 집합들을 제거하여 측정 설정 집합들의 수가 하나가 되는 경우까지 측정 설정 집합들을 연속적으로 감소시킬 수 있다.
- [0111] 따라서, 본 발명은 입자 분포에 기반한 입자 필터를 이용하여 다음 반복의 측정 설정을 최적화하는 제1 단계와 최적화된 측정 설정에 기반한 측정 설정 집합들의 측정 결과를 이용하여 측정 설정 집합들의 수를 주기적으로 감소시키는 제2 단계를 적응적으로 적용하여 수치분석에 따른 편향 추정량을 사용함에 단층 촬영(tomography)의 정밀도를 증가시킬 수 있다.
- [0112] 또한, 본 발명은 고차원 양자 상태 학습에 기반하여 추정 오차의 통계적 정량화와 양자 시스템의 특성화율을 향상시킬 수 있다.
- [0114] 도 3은 본 발명의 일실시예에 따른 양자 상태 단층 촬영 처리 방법의 성능을 설명하는 도면이다.
- [0115] 도 3을 참고하면, 그래프(300)는 가로축에서 반복 횟수의 변화를 예시하고, 세로축에서 부정확도의 변화를 예시한다.
- [0116] 그래프(300)는 $N_0 =$ 각각 50샷의 1000회 반복에 대해 200개의 임의의 2차원 혼합 상태를 시뮬레이션 결과를 나타낸다.
- [0117] 추정된 상태 ρ 와 다음과 같이 정의된 실제 상태 ρ 사이의 부정확도 I 를 하기 수학적 식 3과 같이 나타낸다.
- [0119] [수학적 식 3]
- [0120]
$$\mathcal{I}(\rho, \hat{\rho}) = 1 - \sqrt{\text{tr}(\sqrt{\rho} \hat{\rho} \sqrt{\rho})}$$
- [0122] 부정확도는 $\rho = \rho$ 인 경우에만 $\mathcal{I}(\rho, \rho) = 0$ 이 되도록 ρ 와 ρ 사이의 근접성 개념을 포착할 수 있다.
- [0123] 즉, 그래프(300)는 반복에 대한 우리 프로토콜의 불충실도의 규모를 보여준다.
- [0124] 그래프(300)에 따른 부정확도는 반복당 $N_0 = 50$ 샷인 200개 혼합 상태에 대해 평균화되었다.
- [0125] 또한, 그래프(300)에서 빨간색 음영 영역은 모든 측정에서 16% 및 84% 분위수를 나타낼 수 있다.
- [0126] 양자 상태 단층 촬영 처리 방법은 정보적으로 완전한 측정 세트가 매우 클 수 있는 더 높은 차원의 큐비트에서 더 두드러진다.
- [0127] 따라서, 양자 상태 단층 촬영 처리 방법은 스케일링을 향상시킬 뿐만 아니라 더 높은 차원의 문제를 계산적으로 다루기 쉽게 만들 수 있다.
- [0129] 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 반사실적 얽힘 분배(Counterfactual Entanglement Distribution) 모델을 설명하기 위한 도면이다.
- [0130] 도 4를 참조하면, 제1 단말(Alice)(410), 제2 단말(Bob)(420) 및 제3 단말(Charlie)(430) 각각은 모두 송신 단말, 수신 단말 및 제어 단말로 동작할 수 있다. 예를 들어, Alice(410)가 Bob(420)에게 양자 정보를 보내는 경우 Charlie(430)는 제어 단말의 역할을 수행하고, 반대로 Bob(420)이 Alice(430)에게 양자 정보를 보내는 경우도 가능하다. 이와 같이, 본 발명의 실시예에 따른 제어된 양자 순간 이동 프로토콜은 3자 양자네트워크를 가

정한다.

[0131] 한편, 도 4에서 참조부호 440 'SW'는 전환 가능 미러(Switchable Mirror)의 및 전환 가능 회전자 등을 포함하는 양자 채널을 의미하고, QA0는 quantum absorptive object의 약칭이고, V-CQZ는 수직(Vertical) CQZ 게이트를 포함함을 나타내고, H-CQZ는 수평(Horizontal) CQZ 게이트를 포함하고 있음을 나타낸다.

[0132] 도 4에 도시된 제1 단말(Alice)(410), 제2 단말(Bob)(420) 및 제3 단말(Charlie)(430) 중 적어도 어느 하나는 도 7의 반사실 양자 통신 처리부(2013)에 적용될 수 있다.

[0134] [제1 단계]

[0135] 제1 단계에서 각 단말은 2N 개의 GHZ 상태를 반사실적으로 생성한다.

[0136] 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(tripartite) GHZ 상태를 생성한다.

[0137] 송신 단말로 가정된 Alice는 얽힘을 반사실적으로 분배하기 위하여, GHZ 상태 생성의 각 라운드에서 자신의 큐빗이 양자 흡수 객체(quantum absorptive object, QA0)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.

[0138] Bob과 Charlie는 도 4에 도시된 바와 같이, GHZ 상태 생성의 각 라운드에서 CQZ 게이트를 사용하여 양자 채널을 통해 Alice와 교대로 연결한다.

[0139] 각 라운드가 종료되는 시점에 Alice, Bob 및 Charlie의 초기 상태는 수학적식 4와 같이 변환된다.

[0140] [수학적식 4]

$$|\theta\rangle_{A_i B_i C_i} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|000\rangle_{A_i B_i C_i} + |111\rangle_{A_i B_i C_i})$$

$$i \in \{1, 2, \dots, 2N\}.$$

[0143] 여기서, A, B, C는 각각 Alice, Bob 및 Charlie를 나타내는 인덱스이고, i는 GHZ 상태 생성의 i번째 라운드를 나타내는 인덱스를 의미한다.

[0145] [제2 단계]

[0146] 제2 단계에서 Alice, Bob 및 Charlie는 큐빗 측정 및 결과발표를 수행한다.

[0147] 먼저, Alice는 보안 검사를 위하여, 2N개의 GHZ 상태들 중 N개의 GHZ 상태의 임의의 서브세트를 선택하고, 선택된 서브세트의 위치를 통지(announce) 한다.

[0148] Bob 및 Charlie는 {x, y} 세트로부터 측정 기저(basis)을 랜덤하게 선택하여 각 큐빗에서 측정을 수행하고 측정 결과와 선택한 기저(basis) 세트를 통지한다.

[0149] Alice는 [표 1]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.

[0150] [표 1]

		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$

[0151] Alice's measurement result

[0152] 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.

[0153] 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.

[0155] [제3 단계]

[0156] 제3 단계에서 송신 단말은 자신이 소유한 큐빗에 대해 벨 기반 측정을 수행함으로써, 미지의 양자상태를 순간이동시킨다. 보다 구체적으로, 수학적식 5와 같이 정의되는 미지의 양자 상태 $|\phi\rangle_q$ 를 송신 단말이 전송하는 경우를 가정한다.

[0157] [수학적식 5]

[0158]
$$|\phi\rangle_q = \alpha |0\rangle_q + \beta |1\rangle_q,$$

[0159]
$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1.$$

[0160] 미지의 양자 상태 및 GHZ 상태의 조합 상태는 수학적식 6과 같이 표현될 수 있다.

[0161] [수학적식 6]

[0162]
$$\begin{aligned} |\eta_j\rangle &= |\phi\rangle_q \otimes |\theta\rangle_{s_j r_j c_j} \\ &= \frac{1}{2} \left[|\Phi^+\rangle_{qs_j} \otimes (\alpha |00\rangle_{r_j c_j} + \beta |11\rangle_{r_j c_j}) \right. \\ &\quad + |\Phi^-\rangle_{qs_j} \otimes (\alpha |00\rangle_{r_j c_j} - \beta |11\rangle_{r_j c_j}) \\ &\quad + |\Psi^+\rangle_{qs_j} \otimes (\alpha |11\rangle_{r_j c_j} + \beta |00\rangle_{r_j c_j}) \\ &\quad \left. + |\Psi^-\rangle_{qs_j} \otimes (\alpha |11\rangle_{r_j c_j} - \beta |00\rangle_{r_j c_j}) \right], \end{aligned}$$

[0163]
$$j \in \{1, 2, \dots, N\}.$$

[0164] 여기서, $|\Phi^\pm\rangle$ 및 $|\Psi^\pm\rangle$ 는 벨 상태를 나타내고, j는 제어된 양자 순간 이동의 j번째 라운드를 나타낸다.

[0165] 제3 단계에서 송신 단말은 큐빗 q 및 s_j 에 대한 벨 기저 측정을 수행하고, 측정 결과를 기록 및 유지한다.

[0167] [제4 단계]

[0168] 제4 단계에서 제어 단말은 Hadamard 기저로 큐빗을 측정하고 미지의 양자 상태를 재구성하도록 수신단말에게 측

정 결과를 통지한다.

- [0169] 보다 구체적으로, 제어 단말은 큐비트 c_j 에서 Hadamard gate H를 수행하고 계산 기저로 큐비트를 측정한다. 제어 단말은 제어된 반사실적 양자 순간이동을 승인하기 위해 고전적 정보인 m 의 1비트를 통해 측정 결과를 통지한다.
- [0170] 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 m_1m_2 2비트를 통해 측정 결과를 제어 단말 및 수신 단말에게 통지한다.
- [0172] 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 제어된 양자 순간이동의 개념을 나타내는 도면이다.
- [0173] 도 5를 참조하면, 제어 단말의 승인하에 송신 단말은 벨 측정 결과를 통지함으로써, 제어된 양자 순간이동을 수행함을 알 수 있다.
- [0175] [제5 단계]
- [0176] 제5 단계에서 수신 단말은 양자 상태를 재구성한다.
- [0177] 보다 구체적으로, 수신 단말은 양자 상태를 재구성하기 위해 송신 단말 및 제어 단말의 측정 결과에 기초하여 큐비트 r_j 에서 수학식 7과 같이 정의되는 유니터리 오퍼레이션(unitary operation)을 수행한다.
- [0178] [수학식 7]
- [0179]
$$U = X^{m_1} Z^{m_2+m}$$
- [0180] 여기서, X 및 Z는 각각 Pauli x 및 z 연산자를 의미한다.
- [0181] 제1 단계 내지 제5단계를 통해 설명된 방법은 제어를 수행하는 제어 단말의 승인하에 미지의 양자 상태 시퀀스를 재구성할 수 있다. 따라서, 다양한 공격 전략에 대해 보다 안전하고 다자간 통신 시스템에 활용이 가능하다.
- [0182] 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.
- [0183] 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.
- [0185] 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 제어된 반사실적 양자 순간이동 지원 장치의 동작을 나타내는 흐름도이다.
- [0186] 여기서, 제어된 반사실적 양자 순간이동 지원 장치는 송신 단말, 수신 단말 및 제어 단말 중 어느 하나의 단말일 수 있고, 도 6은 제어된 반사실적 양자 순간이동 지원 장치가 송신 단말인 경우에 해당한다.
- [0187] 도 6을 참조하면, 송신 단말은 610 단계에서 $2N$ 개의 GHZ(Greenberger-Horne-Zeilinger)상태를 반사실적으로 생성한다.
- [0188] 620 단계에서 송신 단말은 N 개의 GHZ 상태의 임의의 서브세트를 선택하고, 선택된 서브세트의 위치를 통지한다.
- [0189] 630 단계에서 송신 단말은 측정 결과의 일관성 여부를 확인한다.
- [0190] 측정 결과의 일관성이 기 설정된 허용 가능한 임계 값까지 신뢰 가능한 경우, 송신 단말은 640 단계에서 소유한 큐비트에 대해 벨 기반 측정을 수행한다.
- [0191] 이후, 제어 단말로부터 통신이 승인되면, 650 단계에서 송신 단말은 벨 상태에 대응하는 고전적인 2비트를 사용하여 측정 결과 통지한다.

- [0193] 도 7은 본 발명의 실시예에 따른 양자정보기술 통합 시스템을 나타내는 도면이다.
- [0194] 도 7을 참조하면, 양자 통신 플랫폼(2010), 양자 컴퓨팅 플랫폼(2020), 양자 관측 및 분석 플랫폼(2030), 플랫폼 제어부(2040) 및 플랫폼 인터페이스부(2050)를 포함한다.
- [0195] 양자 통신 플랫폼(2010)은 양자통신 및 양자정보통신과 관련된 요소 기술의 구현 및 실험을 제공하는 플랫폼이다.
- [0196] 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.
- [0197] 양자 컴퓨팅 플랫폼(2020)은 양자 알고리즘을 기반으로 기하급수적으로 빠른 병렬계산이 가능한 양자컴퓨터의 실용화를 위한 요소 기술의 구현 및 실험을 제공하는 플랫폼이다.
- [0198] 양자 컴퓨팅 플랫폼(2020)은 잡음중규모양자(noisy intermediate-scale quantum: NISQ) 장치를 위해 특별히 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)를 포함할 수 있다.
- [0199] 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.
- [0200] 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), 큐비트 측정 및 실험을 위한 양자 상관 측정을 지원하는 양자 상관 측정 처리부(2035) 및 모의실험을 위한 텐서 네트워크 및 Hamiltonian 기반 양자시뮬레이션을 지원하는 텐서 네트워크 실험 처리부(2037)를 포함한다.
- [0201] 플랫폼 제어부(2040)는 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.
- [0202] 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 수도 있다.
- [0203] 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.
- [0204] 예를 들어, 본 발명의 실시예에 따른 양자정보기술 통합 시스템은 제1단계 내지 제5단계를 수행하는 반사실 양자 통신 처리부를 포함하는 양자 통신 플랫폼 및 도 1 내지 도 3에서 설명된 동작을 수행하는 양자 상태 단층 촬영 처리부를 포함하는 양자 관측 및 분석 플랫폼을 포함할 수 있다.
- [0206] 양자정보기술은 통신, 알고리즘 및 시뮬레이션 기술 분야와 융합되어 네트워크 보안, 무선자원 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.
- [0207] 예를 들어, 양자 키 분배 처리부(2011)는 차세대이동통신 시스템의 보안계층에 융합되기 위한 기술을 제공하기

위하여 개량될 수 있다.

[0208] 예를 들어, 지능형 네트워크 기능을 요구하는 차세대이동통신 시스템의 간섭 관리에 활용하기 위하여 양자 통신 플랫폼(2010)의 각 구성요소는 개량될 수 있다.

[0210] 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.

[0211] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 특허청구범위의 범위에 속한다.

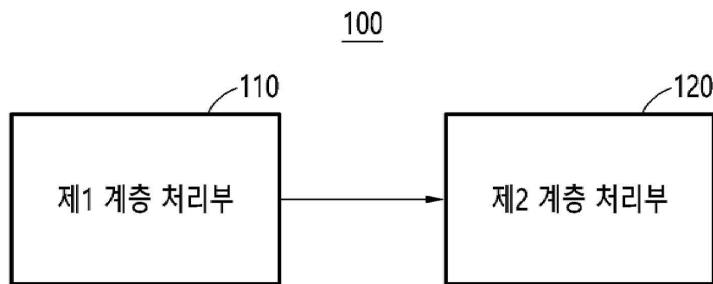
부호의 설명

[0212] 100: 양자 상태 단층 촬영 처리 장치

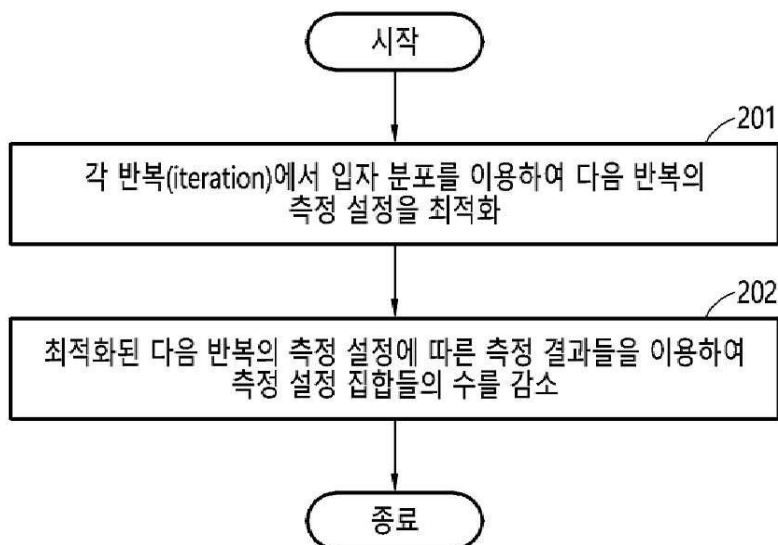
110: 제1 계층 처리부 120: 제2 계층 처리부

도면

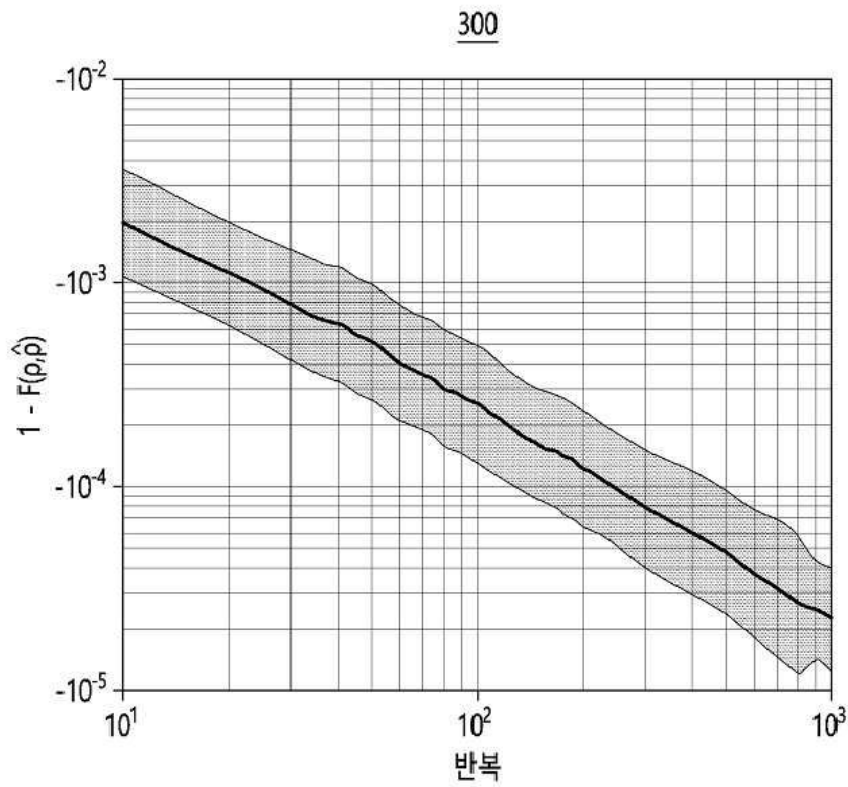
도면1



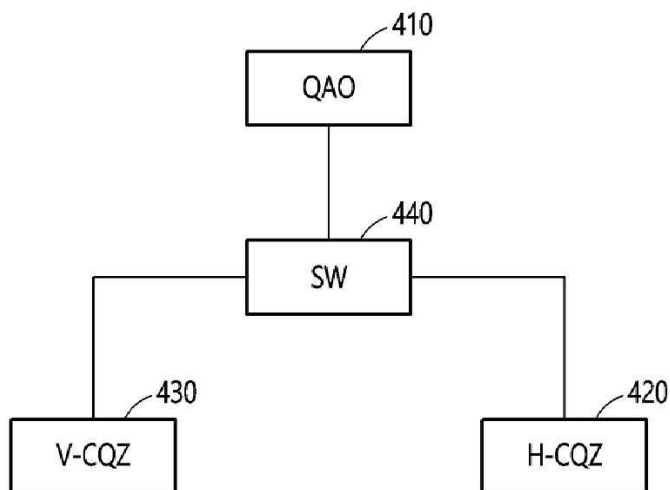
도면2



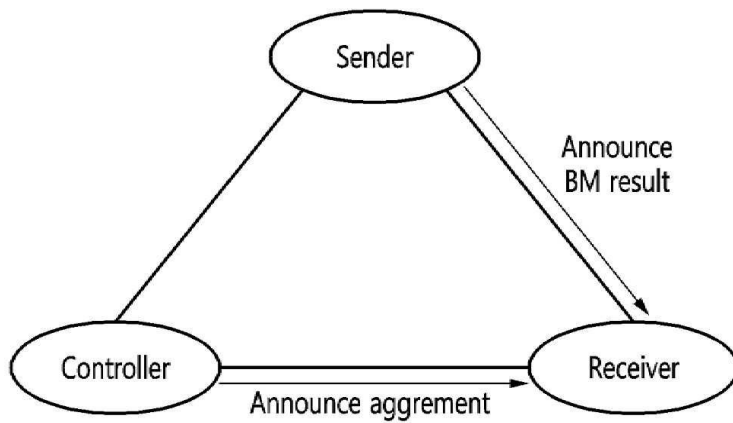
도면3



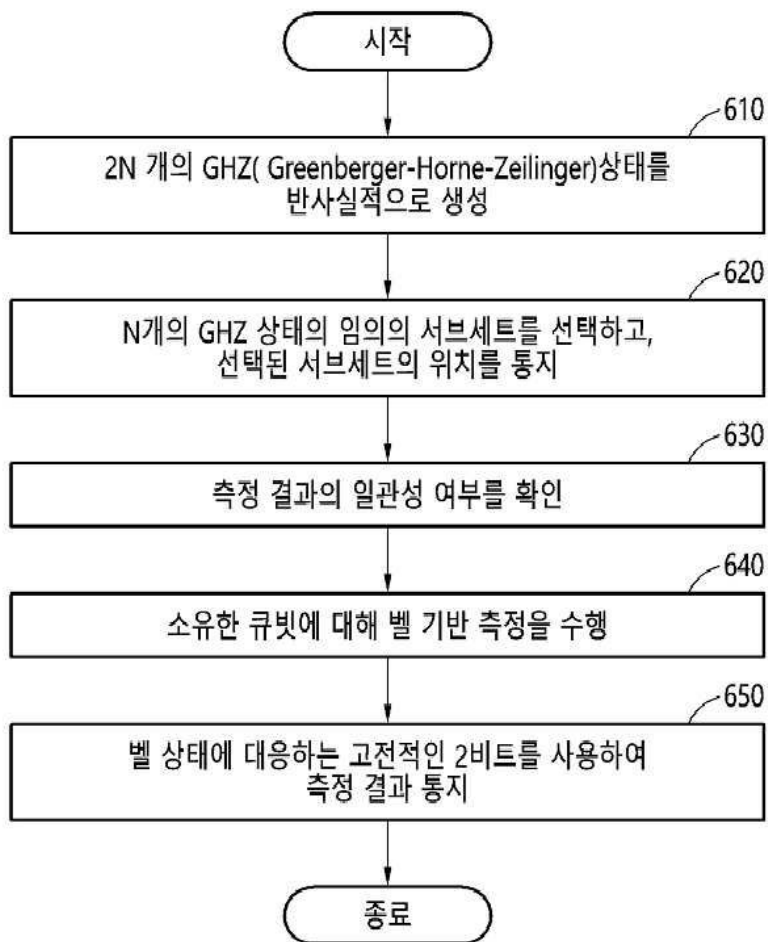
도면4



도면5



도면6



도면7

