



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0072594
(43) 공개일자 2022년06월02일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06N 10/00 (2022.01) B82Y 10/00 (2017.01)
(52) CPC특허분류
G06N 10/00 (2022.01)
B82Y 10/00 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2020-0160381
(22) 출원일자 2020년11월25일
심사청구일자 2020년11월25일

(71) 출원인
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(72) 발명자
신현동
경기도 수원시 영통구 청명로 132, 323동 501호(영통동, 벽산삼익아파트)
샤리 라마다니
경기도 수원시 영통구 매영로398번길 22(영통동)
울라 무하마드 아사드
경기도 수원시 영통구 청명로59번길 51, B03호 (영통동)
(74) 대리인
김연권

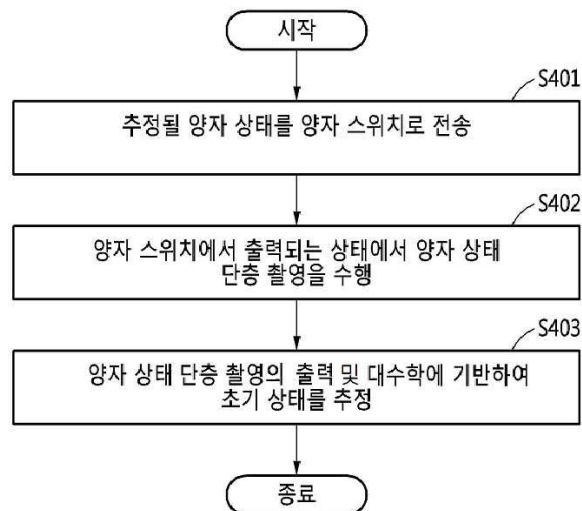
전체 청구항 수 : 총 8 항

(54) 발명의 명칭 최대 잡음 디폴라라이징 양자 채널에서 양자 상태 단층 촬영을 수행하는 방법 및 그 장치

(57) 요약

본 발명의 일실시예에 따른 단층 촬영 장치는 제어 큐비트에 의해 제어되고 추정될 양자 상태를 수신하는 양자 스위치부와, 양자 스위치부에서 출력되는 상태에서 양자 상태 단층 촬영을 수행하는 단층 촬영부와 단층 촬영부의 출력 및 대수학에 기반하여 초기 상태를 추정하는 추정부를 포함하며, 최대 잡음 채널에서도 양자 상태 촬영이 수행될 수 있다.

대표도 - 도4



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711111536
과제번호	2019R1A2C2007037
부처명	교육부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	이공분야기초연구사업/중견연구자지원사업
연구과제명	양자네트워킹 핵심기술 연구
기 여 율	1/1
과제수행기관명	경희대학교 산학협력단
연구기간	2019.03.01 ~ 2024.02.29

명세서

청구범위

청구항 1

제어 큐비트에 의해 제어되고 추정될 양자 상태를 수신하는 양자 스위치부;
상기 양자 스위치부에서 출력되는 상태에 양자 상태 단층 촬영을 수행하는 단층 촬영부; 및
상기 단층 촬영부의 출력 및 대수학에 기반하여 초기 상태를 추정하는 추정부를 포함하며,
최대 잡음 채널에서도 양자 상태 촬영이 수행되는 단층 촬영 장치.

청구항 2

제1항에 있어서,
상기 양자 스위치부는 양자 채널을 결합하는 단층 촬영 장치.

청구항 3

제1항에 있어서,
상기 최대 잡음 채널은 무한 인과 순서(Indefinite Causal Order, ICO)로 설정되는 단층 촬영 장치.

청구항 4

제1항에 있어서,
상기 최대 잡음 채널은 양자 탈분극 채널인 단층 촬영 장치.

청구항 5

추정될 양자 상태를 양자 스위치로 전송하는 단계;
상기 양자 스위치에서 출력되는 상태에서 양자 상태 단층 촬영을 수행하는 단계; 및
상기 양자 상태 단층 촬영의 출력 및 대수학에 기반하여 초기 상태를 추정하는 단계를 포함하며,
최대 잡음 채널에서도 양자 상태 촬영이 수행되는 단층 촬영 방법.

청구항 6

제5항에 있어서,
상기 양자 스위치는 양자 채널을 결합하고, 제어 큐비트에 기반하여 제어되는 단층 촬영 방법.

청구항 7

제5항에 있어서,
상기 최대 잡음 채널은 무한 인과 순서(Indefinite Causal Order, ICO)로 설정되는 단층 촬영 방법.

청구항 8

제5항에 있어서,
상기 최대 잡음 채널은 양자 탈분극 채널인 단층 촬영 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 양자 스위치 기반의 양자 단층 촬영 장치 및 그 방법에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 양자 스위치를 이용함으로써 최대 잡음 탈분극 채널에서도 양자 상태를 정확히 추정하는 양자 상태 단층 촬영 장치 및 그 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 양자 시스템의 상태를 특성화하는 능력은 양자 컴퓨팅, 통신 및 계측과 같은 연구 분야의 발전과 함께 필수적이 되고 있다. 양자 상태 단층 촬영(Quantum State Tomography, QST)은 동일하게 준비된 알려지지 않은 양자 상태에 대한 일련의 측정을 사용하여 양자 시스템의 상태를 나타내는 밀도 행렬을 통계적으로 재구성한다.

[0003] 또한, QST의 최근 발전은 얽힘 및 더 높은 차원을 포함하는 것과 같은 더 복잡한 양자 시스템의 특성화를 촉진했고, QST는 향후 양자 기술의 초석 역할을 할 것으로 예상된다.

[0004] QST 기술은 측정 관측 값, 통계 모델 및 양자 리소스 세트를 활용하는데, 가장 초기의 방법 중 하나는 측정된 데이터의 단순한 선형 변환을 사용하여 양자 상태를 고유하게 결정하는 것이다.

선행기술문헌

특허문헌

[0005] (특허문헌 0001) 한국공개특허 제2020-0050841호 "UD 기반 큐비트 상태 토모그래피를 위한 방법"

(특허문헌 0002) 한국등록특허 제2098285호, "양자 프로세스 분석 장치 및 방법"

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명은 최대 잡음이 채널에서 양자 상태 단층 촬영(Quantum State Tomography, QST)을 가능하도록 하는 것을 목적으로 한다.

[0007] 본 발명은 정확한 양자 상태 추정을 가능하도록 하는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0008] 본 발명의 일실시예에 따른 단층 촬영 장치는 제어 큐비트에 의해 제어되고 추정될 양자 상태를 수신하는 양자 스위치부와, 상기 양자 스위치부에서 출력되는 상태에 양자 상태 단층 촬영을 수행하는 단층 촬영부와 상기 단층 촬영부의 출력 및 대수학에 기반하여 초기 상태를 추정하는 추정부를 포함하며, 최대 잡음 채널에서도 양자 상태 촬영이 수행될 수 있다.

[0009] 본 발명의 일실시예에 따르면, 상기 양자 스위치부는 양자 채널을 결합할 수 있다.

[0010] 본 발명의 일실시예에 따르면, 상기 최대 잡음 채널은 무한 인과 순서(Indefinite Causal Order, ICO)로 설정될 수 있다.

[0011] 본 발명의 일실시예에 따르면, 상기 최대 잡음 채널은 양자 탈분극 채널일 수 있다.

[0012] 본 발명의 일실시예에 따른 단층 촬영 방법은 추정될 양자 상태를 양자 스위치로 전송하는 단계와, 상기 양자 스위치에서 출력되는 상태에서 양자 상태 단층 촬영을 수행하는 단계와, 상기 양자 상태 단층 촬영의 출력 및 대수학에 기반하여 초기 상태를 추정하는 단계를 포함하며, 최대 잡음 채널에서도 양자 상태 촬영이 수행될 수 있다. 본 발명의 일실시예에 따르면, 상기 양자 스위치는 양자 채널을 결합하고, 제어 큐비트에 기반하여 제어될 수 있다.

[0013] 본 발명의 일실시예에 따르면, 상기 최대 잡음 채널은 무한 인과 순서(Indefinite Causal Order, ICO)로 설정될 수 있다.

[0014] 본 발명의 일실시예에 따르면, 상기 최대 잡음 채널은 양자 탈분극 채널일 수 있다.

발명의 효과

- [0015] 일실시예에 따르면, 양자 스위치를 이용함으로써, 최대 잡음이 채널에서 QST의 수행이 가능하다.
- [0016] 일실시예에 따르면, 양자 스위치에 기반한 QST를 수행함으로써 보다 정확한 양자 상태 추정이 가능하다.

도면의 간단한 설명

- [0017] 도 1은 큐비트 전송에서 양자 스위치를 채택함으로써, 최대 잡음이 있는 양자 탈분극 채널에서 QST를 수행하기 위한 메커니즘을 설명하는 도면이다.
- 도 2는 순수 상태들과 혼합 상태들에 대한 재구성 상태와 실제 상태의 Log 부정확도(infidelity)를 나타낸다.
- 도 3은 본 발명의 일실시예에 따른 단층 촬영 장치의 블록도이다.
- 도 4는 본 발명의 일실시예에 따른 단층 촬영 방법의 흐름도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0018] 본 명세서에 개시되어 있는 본 발명의 개념에 따른 실시예들에 대해서 특정한 구조적 또는 기능적 설명들은 단지 본 발명의 개념에 따른 실시예들을 설명하기 위한 목적으로 예시된 것으로서, 본 발명의 개념에 따른 실시예들은 다양한 형태로 실시될 수 있으며 본 명세서에 설명된 실시예들에 한정되지 않는다.
- [0019] 본 발명의 개념에 따른 실시예들은 다양한 변경들을 가할 수 있고 여러 가지 형태들을 가질 수 있으므로 실시예들을 도면에 예시하고 본 명세서에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명의 개념에 따른 실시예들을 특정한 개시형태들에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 변경, 균등물, 또는 대체물을 포함한다.
- [0020] 제1 또는 제2 등의 용어를 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 상기 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만, 예를 들어 본 발명의 개념에 따른 권리 범위로부터 이탈되지 않은 채, 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소는 제1 구성요소로도 명명될 수 있다.
- [0021] 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "연결되어" 있다거나 "접속되어" 있다고 언급된 때에는, 그 다른 구성요소에 직접적으로 연결되어 있거나 또는 접속되어 있을 수도 있지만, 중간에 다른 구성요소가 존재할 수도 있다고 이해되어야 할 것이다. 반면에, 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "직접 연결되어" 있다거나 "직접 접속되어" 있다고 언급된 때에는, 중간에 다른 구성요소가 존재하지 않는 것으로 이해되어야 할 것이다. 구성요소들 간의 관계를 설명하는 표현들, 예를 들어 "~사이에"와 "바로~사이에" 또는 "~에 직접 이웃하는" 등도 마찬가지로 해석되어야 한다.
- [0022] 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예들을 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 실시된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것이 존재함으로 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.
- [0023] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가진다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥상 가지는 의미와 일치하는 의미를 갖는 것으로 해석되어야 하며, 본 명세서에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.
- [0025] 이하, 실시예들을 첨부된 도면을 참조하여 상세하게 설명한다. 그러나, 특허출원의 범위가 이러한 실시예들에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다. 각 도면에 제시된 동일한 참조 부호는 동일한 부재를 나타낸다.
- [0027] 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(고

전적 궤적)가 입력된 최대 잡음 탈분극 채널을 통과할 때 양자 상태가 최대 혼합 상태로 전환되어, QST 수행이 불가능하다.

[0028] 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.

[0030] 미지의 시스템의 상태를 판별하는 양자 작업은 양자 상태 단층 촬영(QST, Quantum State Tomography)라 칭할 수 있다. QST는 두 단계로 구성될 수 있다.

[0031] 먼저, 동일하게 준비된 양자 상태 사본에 대한 측정이 수행된다.

[0032] 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), 베이저안 추정 방법(bayesian estimation method) 및 선형 회귀(linear regression) 등이 있을 수 있다.

[0033] 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. 베이저안 방법은 베이저안 정리를 이용하여 사전 확률 분포(prior) $p(\rho)$ 에 대한 지식으로 사후 확률 분포(posterior probability distribution) $p(\rho|D)$ 를 결정할 수 있다. 여기서 D는 측정 데이터를 의미한다.

[0034] 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.

[0035] 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 쿼텀 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.

[0036] 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.

[0037] 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.

[0039] 양자 상태 단층 촬영(Quantum State Tomography)

[0040] 먼저, 미지의 양자 상태를 추정하기 위한 선형 회귀 접근법을 살펴본다.

[0041] $i = j$ 이면 1이고, 그렇지 않은 경우 0인 Kronecker의 델타 함수 δ_{ij} 를 이용할 수 있다. $\text{tr}(\cdot)$ 은 행렬의 추적을 의미하는 것으로 (1) $\text{tr}(\sigma_i) = 0$ 와 (2) $\text{tr}(\sigma_i \sigma_j) = \delta_{ij}$ 를 만족하는 Hermitian 연산자 $\{\sigma_i\}_{i=1}^{d^2-1}$ 로 지정

할 수 있다. 예를 들면, 단일 큐비트의 경우(single-qubit case), $\{\sigma_i\}_{i=1}^{d^2-1}$ 는 아래 수학식 1과 같을 수 있다.

수학식 1

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

큐비트 밀도 연산자(operator)는 다음 수학식 2와 같이 매개변수화될 수 있다.

수학식 2

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

여기서, $r_i = \text{tr}(\rho \sigma_i)$ 이고, 측정 세트 $\{\mathcal{M}_n\}_{n=1}^M$ 이 베이스스(bases) $\{\sigma_i\}_{i=1}^{d^2-1}$ 하에 다음 수학식 3과 같이 매개변수화될 수 있다고 가정할 수 있다.

수학식 3

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

여기서, $\psi_i^n = \text{tr}(\mathcal{M}_n \sigma_i)$ 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 4와 같을 수 있다.

수학식 4

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

[0049] 여기서, $\psi^{(n)T}$ 는 열벡터 $\psi^{(n)} = \{\psi_1^n, \dots, \psi_{d^2-1}^n\}$ 의 전치이고, $\theta = \{r_1, \dots, r_{d^2-1}\}$ 이다.

[0050] 상기 수학적식 4로부터 QST에 대한 선형 회귀 형태는 다음 수학적식 5와 같을 수 있다.

수학적식 5

[0051]
$$Y = X\theta$$

[0052] 여기서, $Y = \{p_1 - \frac{1}{d}, \dots, p_M - \frac{1}{d}\}$ 이고, $X = \{\psi^{(1)T}, \dots, \psi^{(M)T}\}^T$ 이다.

[0053] 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 수학적식 6에 의해 추정될 수 있다.

수학적식 6

[0054]
$$\hat{p}_n = \frac{f_n}{N}$$

[0055] 여기서, f_n 는 추정 오류 $e_n = \hat{p}_n - p_n$ 를 갖는 관찰된 주파수들을 나타낸다. 다음, 상기 수학적식 5에서 선형 회귀 방정식은 다음 수학적식 7과 같을 수 있다.

수학적식 7

[0056]
$$Y = X\theta + e$$

[0057] 여기서, $Y = \{\hat{p}_1 - \frac{1}{d}, \dots, \hat{p}_M - \frac{1}{d}\}$ 이고, $e = \{e_1, \dots, e_M\}$ 이다. 큰 N의 경우, $\{e_n\}_{n=1}^M$ 은 평균 0과 분산 $\frac{p_n - p_n^2}{N}$ 을 갖는 정규 분포에 대한 분포로 수렴될 수 있다. 많은 측정이 수행된다면, 큐비트 상태에 대한 측정은 더 정확해질 수 있다. 상기 수학적식 7에서 선형 회귀 문제에 대한 해결책은 다음 수학적식 8을 최소화하는 θ 일 수 있다.

수학적식 8

[0058]
$$\begin{aligned} \hat{\theta} &= \arg \max_{\theta} (Y - X\theta)^T (Y - X\theta) \\ &= (X^T X)^{-1} X^T Y. \end{aligned}$$

[0059] 측정 세트 $\{\mathcal{M}_n\}_{n=1}^M$ 이 정보적으로 완전하거나 넘쳐서 $(X^T X)$ 역을 가지는 것을 가정할 수 있다. 추정값 $\hat{\theta}$ 는 평균 제곱 오차(mean squared error)를 갖는 평행되지 않는 추정값이고, 점근적으로, 다음 수학적식 9와 같을 수 있다.

수학식 9

$$MSE_{\theta} = \text{tr} \left((X^T X)^{-1} X^T P X (X^T X)^{-1} \right)$$

여기서, $P = \frac{1}{N} \text{diag} \{p_1 - p_1^2, \dots, p_M - p_M^2\}$ 이다.

양자 탈분극 채널(Quantum Depolarizing Channel)

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 q 로 그대로 유지될 수 있다. 이러한 종류의 양자 채널을 양자 탈분극 채널 $\mathcal{N}(\rho)$ 이라 칭할 수 있다. 큐비트의 진화 ρ 는 다음 수학식 10과 같이 정의된다.

수학식 10

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

양자 스위치 (Quantum Switch)

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 $\mathcal{N}_1 \rightarrow \mathcal{N}_2$ 순서에 따라 양자 시스템을 지나갈 것이다. 제어 큐비트가 $|1\rangle\langle 1|$ 상태에 있다면, 양자 상태는 $\mathcal{N}_2 \rightarrow \mathcal{N}_1$ 순서에 따라 양자 채널을 지나간다. 제어 큐비트가 $|+\rangle\langle +|$ 와 같이 $|0\rangle$ 와 $|1\rangle$ 의 중첩에 있는 경우, 양자 스위치는 채널을 $\mathcal{N}_1 \rightarrow \mathcal{N}_2$ 와 $\mathcal{N}_2 \rightarrow \mathcal{N}_1$ 순서의 중첩에 둘 수 있다. 양자 스위치의 결과로서 양자 채널의 Kraus 연산자는 다음 수학식 11과 같이 정의될 수 있다.

수학식 11

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

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

하나의 큐비트 시스템에 대한 양자 스위치는 다음 수학식 12와 같이 주어질 수 있다.

수학식 12

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

단층 촬영 방법, 시뮬레이션 및 결과

추론할 양자 상태 ρ 가 고전적인 레직에서 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 13의 최대 혼합 상태로 변환될 수 있다.

수학식 13

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

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

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 14와 같을 수 있다.

수학식 14

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

$\{|+\rangle, |-\rangle\}$ 베이스(basis)에서 제어 큐비트의 측정은 채널의 출력을 다음 수학식 15와 같이 변환할 수 있다.

수학식 15

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

여기서, $\text{pr}_{|+\rangle}$ 와 $\text{pr}_{|-\rangle}$ 는 각각 $|+\rangle$ 와 $|-\rangle$ 에서 측정 결과를 획득하는 확률을 나타낼 수 있다. 채널이 최대로 잡음이 있는 경우, 수학식 15로부터, ρ^{QS} 에 대해 QST를 수행한다면, ρ^{QS} 는 상태 ρ 를 재구성할 수 있는 것을 의미하는 ρ 에 의존할 수 있다.

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

[0084] 양자 상태의 확률이 온전히 남아 있는지 여부는 $\hat{\rho}$ 를 다음 수학적 식 16과 같이 복구할 수 있는 수학적 식 15로부터 양자 처리 단층 촬영(quantum process tomography)에 의해 결정될 수 있다.

수학적 식 16

[0085]
$$\hat{\rho} = \begin{cases} \left(\hat{\rho}^{QS} \text{pr}_{|+}\rangle - \frac{\bar{q}^2}{2d} I - \frac{2q\bar{q}}{d} I \right) / \left(\frac{\bar{q}^2 \sqrt{a\bar{a}}}{d^2} + q^2 \right) & , \text{for } \rho_{|+}\rangle^{QS} \\ \left(\frac{\bar{q}^2}{2d} I - \hat{\rho}^{QS} \text{pr}_{|-}\rangle \right) / \left(\frac{\bar{q}^2 \sqrt{a\bar{a}}}{d^2} \right) & , \text{for } \rho_{|-}\rangle^{QS} \end{cases}$$

[0086] $\rho_{|+}\rangle^{QS}$ 상에 수학적 식 16이 적용되는 경우, $\hat{\rho}$ 가 비물리적 행렬인 몇가지 경우들이 있을 수 있다.

[0087] 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.

[0088] <MSE 분석(MSE analysis)>

[0089] 수학적 식 15에서의 양자 상태가 측정된다면, 상태 $\rho_{|+}\rangle^{QS}$ 에 대한 $\mathcal{M}_n$ 의 측정 결과를 획득하기 위한 확률은 다음 수학적 식 17과 같이 정의될 수 있다.

수학적 식 17

[0090]
$$\begin{aligned} \hat{p}_n^{QS} &= \text{tr} \left(\mathcal{M}_n \rho_{|+}\rangle^{QS} \right) \\ &= \frac{1}{\text{pr}_{|+}\rangle} \left[\bar{q}^2 \left(\frac{1}{2d} + \frac{\sqrt{a\bar{a}}}{d^2} p_n \right) + \frac{2q\bar{q}}{d} + q^2 p_n \right] \end{aligned}$$

[0091] 상태 $\rho_{|-}\rangle^{QS}$ 의 경우, 확률은 다음 수학적 식 18과 같이 정의될 수 있다.

수학적 식 18

[0092]
$$\begin{aligned} \hat{p}_n^{QS} &= \text{tr} \left(\mathcal{M}_n \rho_{|-}\rangle^{QS} \right) \\ &= \frac{1}{\text{pr}_{|-}\rangle} \left[\bar{q}^2 \left(\frac{1}{2d} - \frac{\sqrt{a\bar{a}}}{d^2} p_n \right) \right] \end{aligned}$$

[0093] 최대 노이즈 채널($q=0$)의 경우, $\hat{p}_n^{QS}$ 는 다음 수학적 식 19와 같을 수 있다.

수학적 식 19

[0094]
$$\hat{p}_n^{QS} = \begin{cases} \frac{1}{\text{pr}_{|+}\rangle} \left(\frac{1}{2d} + \frac{\sqrt{a\bar{a}}}{d^2} p_n \right) & , \text{for } \rho_{|+}\rangle^{QS} \\ \frac{1}{\text{pr}_{|-}\rangle} \left(\frac{1}{2d} - \frac{\sqrt{a\bar{a}}}{d^2} p_n \right) & , \text{for } \rho_{|-}\rangle^{QS} \end{cases}$$

[0095] 여기서, 제어 큐비트가 상태 $|-\rangle$ 에 해당하는 경우, 즉 $\text{MSE}_{\theta, |-\rangle} < \text{MSE}_{\theta, |+\rangle}$ 인 경우, 더 나은 결과는 얻어질 수 있다.

[0096] 수학적 9로부터, X는 제어 큐비트 측정 후 획득된 양쪽 상태에 대한 동일한 값을 얻을 수 있다. 그러므로, P에 의해 야기된 차이점을 확인해야 할 필요가 있다.

[0097] 모순을 가정하기 위해, $\text{MSE}_{\theta, |-\rangle} > \text{MSE}_{\theta, |+\rangle}$ 는 다음 수학적 20부터 수학적 21의 과정을 거쳐 수학적 22로 표현될 수 있다.

수학적 20

[0098]
$$\text{MSE}_{\theta, |-\rangle} - \text{MSE}_{\theta, |+\rangle} > 0$$

수학적 21

[0099]
$$(\hat{p}_{n,|-\rangle} - \hat{p}_{n,|-\rangle})^2 - (\hat{p}_{n,|+\rangle} - \hat{p}_{n,|+\rangle})^2 > 0$$

수학적 22

[0100]
$$A - B - C + D - E > 0$$

[0102] 여기서,
$$A = \frac{1}{2d} \left(\frac{1}{\text{pr}_{|-\rangle}} - \frac{1}{\text{pr}_{|+\rangle}} \right) \text{ 이고, } B = \frac{\sqrt{a\bar{a}}}{d^2} p_n \left(\frac{1}{\text{pr}_{|-\rangle}} + \frac{1}{\text{pr}_{|+\rangle}} \right) \text{ 이며,}$$

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

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

[0103] 여기서, 수학적 22는 $A + D < B + C + E$ 로 표현될 수 있고, $A + D < B + C + E$ 은 모순이다. 그러므로, $\text{MSE}_{\theta, |-\rangle} < \text{MSE}_{\theta, |+\rangle}$ 여야 할 수 있다.

[0104] 수학적 13으로부터 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 $\text{MSE}_{\theta, |-\rangle}$ 와 $\text{MSE}_{\theta, |+\rangle}$ 보다 더 큰 MSE는 주어질 것이다.

[0105] <수치 시뮬레이션(Numerical Simulation)>

[0106] 이하에서는, 상술한 체계를 사용하여 하나의 큐비트 시스템에서 수치 시뮬레이션을 수행한다. 순수 상태와 혼합 상태에서 QST를 수행하여 두 가지 상태 모두에서 체계가 잘 작동하는지 확인한다.

[0107] 도 1은 큐비트 전송에서 양자 스위치(110)를 채택함으로써, 최대 잡음이 있는 양자 탈분극 채널에서 QST를 수행하기 위한 메커니즘을 설명하는 도면이다.

[0108] 도 1을 참조하면, 시뮬레이션 시 구성되는 일실시에에 따른 단층 촬영 장치(100)는 양자 스위치(Quantum

Switch)(110)와, 제어 큐비트를 측정하는 측정(Control Qubit Measurement) 장치(120)와, 양자 상태 단층 촬영(Quantum State Tomography) 장치(130)를 포함할 수 있다.

[0109] Haar 측정(measure)에 따라, 그리고 혼합 상태들을 위한 힐베르트-슈미트(Hilbert-Schmidt) 측정(measure) 또는 Bures 측정(measure)에 따라 균일하게 분포된 5×10^3 개의 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 정량화 하기 위해, 양쪽 상태 $F(\rho, \hat{\rho}) = \text{tr}(\sqrt{\sqrt{\rho}\hat{\rho}\sqrt{\rho}})$ 모두의 정확도(fidelity)가 계산될 수 있다.

[0110] 다음, 5×10^3 개의 양자 상태들의 평균 log 정확도 $\log_{10}(1 - F(\rho, \hat{\rho}))$ 는 계산될 수 있다. 상태들이 유한한 인과 순서 그리고 ICO에서 전송되는 경우, 이러한 추정을 갖는 실제 순수 상태들의 Log 부정확도(infidelity)는 도 2와 같이 나타낼 수 있다.

[0111] 도 2는 순수 상태들 (a)과 혼합 상태들 (b)에 대한 재구성 상태 $\hat{\rho}$ 와 실제 상태 ρ 의 Log 부정확도(infidelity)를 나타낸다.

[0112] 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 수학적 식 23과 같이 계산될 수 있다.

수학적 식 23

[0113] $F_{av} = \text{pr}_{|+\rangle} F_{|+\rangle} + \text{pr}_{|-\rangle} F_{|-\rangle}$

[0114] 여기서, $\text{pr}_{|+\rangle}$, $\text{pr}_{|-\rangle}$, $F_{|+\rangle}$ 및 $F_{|-\rangle}$ 는 제어 큐비트의 측정이 $|+\rangle$ 와 $|-\rangle$ 에 대응하는 경우, 추정된 상태의 확률과 정확도일 수 있다.

[0115] 도 2로부터, 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.

[0117] 예를 들어, 도 3의 일실시예에 따른 단층 촬영 장치(300)는 상술한 동작을 수행할 수 있다. 예를 들어, 단층 촬영 장치(300)의 양자 스위치부(310)를 통과한 출력은 수학적 식 14와 같을 수 있다. 그리고/또는, 단층 촬영 장치(300)의 양자 스위치부(310)는 $\{|+\rangle, |-\rangle\}$ 베이스(basis)에서의 제어 큐비트에서 채널의 출력을 수학적 식 15와 같이 변환할 수 있다. 그리고/또는, 단층 촬영 장치(300)의 단층 촬영부(320) 및/또는 추정부(330)는 상기의 양자 상태 단층 촬영에 대한 설명과 같이 선형 회귀 접근법에 기반하여 양자 상태를 추정할 수 있다. 예를 들어, 단층 촬영 장치(300)의 단층 촬영부(320) 및/또는 추정부(330)는 수학적 식 1 내지 수학적 식 9의 연산을 수행할 수 있다. 그리고/또는, 단층 촬영 장치(300)의 단층 촬영부(320) 및/또는 추정부(330)는 수학적 식 15에 기반하여 ρ 를 재구성할 수도 있다.

[0118] 그리고/또는, 단층 촬영 장치(300)의 단층 촬영부(320) 및/또는 추정부(330)는 수학적 식 16에 의해 ρ 에 또는 $\hat{\rho}$ 를 결정 및/또는 추정할 수 있다.

[0119] 도 3을 참조하여 설명한 단층 촬영 장치의 동작은 상술한 방식에 한하지 않으며, 다양한 방식으로 본 명세서에

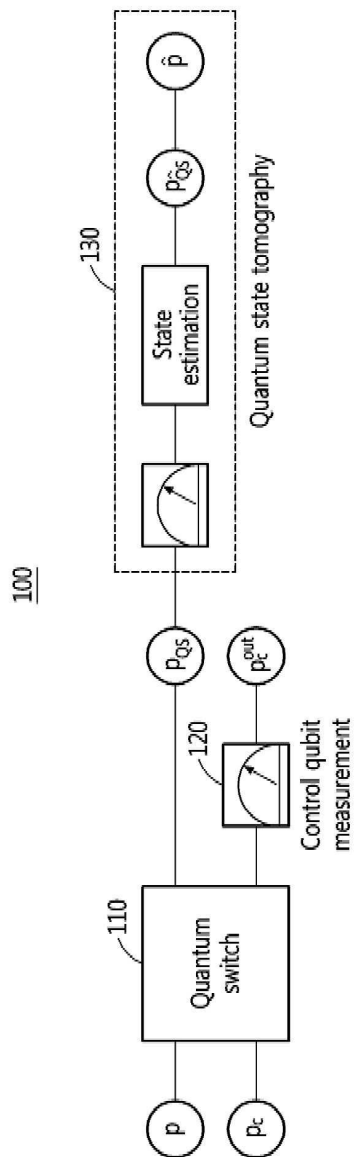
서 설명된 동작들을 수행할 수 있다. 또한, 단층 촬영 장치는 상기 도 3을 참조하여 설명한 단층 촬영 장치의 동작 이외에도 본 명세서에서 설명된 모든 또는 일부 동작들을 수행할 수 있다.

- [0121] 본 명세서에서는 최대 잡음이 있는 탈분극 채널에서의 QST를 살펴보았다. 본 명세서에서는 최대 잡음 채널에서 QST가 가능하도록 양자 스위치(quantum switch)를 적용하였다. 본 명세서에서 설명한 바와 같이, 양자 전환 배열로 큐비트를 전송하는 것이 고전적인 회로를 통해 전송하는 것보다 더 정확한 양자 상태 추정을 제공한다. 다시 말해, 본 발명은 최대 잡음이 있는 탈분극 양자 채널에서 정확한 양자 상태 단층 촬영을 수행할 수 있다.
- [0123] 도 3은 본 발명의 일실시예에 따른 단층 촬영 장치의 블록도이다.
- [0124] 도 3을 참조하면, 본 발명의 일실시예에 따른 단층 촬영 장치(300)는 제어 큐비트에 의해 제어되고 추정될 양자 상태를 수신하는 양자 스위치부(310)와, 양자 스위치부(310)에서 출력되는 상태에 양자 상태 단층 촬영을 수행하는 단층 촬영부(320)와, 단층 촬영부(320)의 출력 및 대수학에 기반하여 초기 상태를 추정하는 추정부(330)를 포함하며, 최대 잡음 채널에서도 양자 상태 촬영이 수행될 수 있다.
- [0125] 그리고/또는, 양자 스위치부(310)는 양자 채널을 결합할 수 있다.
- [0126] 그리고/또는, 단층 촬영은 선형 회귀 추정에 기반할 수 있다.
- [0127] 그리고/또는, 최대 잡음 채널은 무한 인과 순서(Indefinite Causal Order, ICO)로 설정될 수 있다.
- [0128] 그리고/또는, 최대 잡음 채널은 양자 탈분극 채널일 수 있다.
- [0129] 다른 일실시예에 따라, 단층 촬영 장치(300)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.
- [0130] 다른 일실시예에 따라, 단층 촬영 장치(300)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.
- [0131] 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 일실시예에 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.
- [0132] 도 3을 참조하여 설명한 단층 촬영 장치의 동작은 이에 한정되지 않으며, 이외 본 명세서에서 설명된 모든 또는 일부 동작들이 단층 촬영 장치에 의해 수행될 수 있다.
- [0134] 도 4는 본 발명의 일실시예에 따른 단층 촬영 방법의 흐름도이다.
- [0135] 예를 들어, 도 4의 단층 촬영 방법은 도 3의 단층 촬영 장치에 의해 수행될 수 있다.
- [0136] 도 4를 참조하면, 일실시예에 따른 단층 촬영 장치는 S401 단계에서, 추정될 양자 상태를 양자 스위치로 전송할 수 있다.
- [0137] 그리고/또는, 일실시예에 따른 단층 촬영 장치는 S402 단계에서, 양자 스위치에서 출력되는 상태에서 양자 상태 단층 촬영을 수행할 수 있다.
- [0138] 그리고/또는, 일실시예에 따른 단층 촬영 장치는 S403 단계에서, 양자 상태 단층 촬영의 출력 및 대수학에 기반하여 초기 상태를 추정할 수 있다.
- [0139] 이에 따라, 일실시예에 따른 단층 촬영 장치는 최대 잡음 채널에서도 양자 상태 촬영이 수행될 수 있다.
- [0140] 그리고/또는, 양자 스위치는 양자 채널을 결합하고, 제어 큐비트에 기반하여 제어될 수 있다.

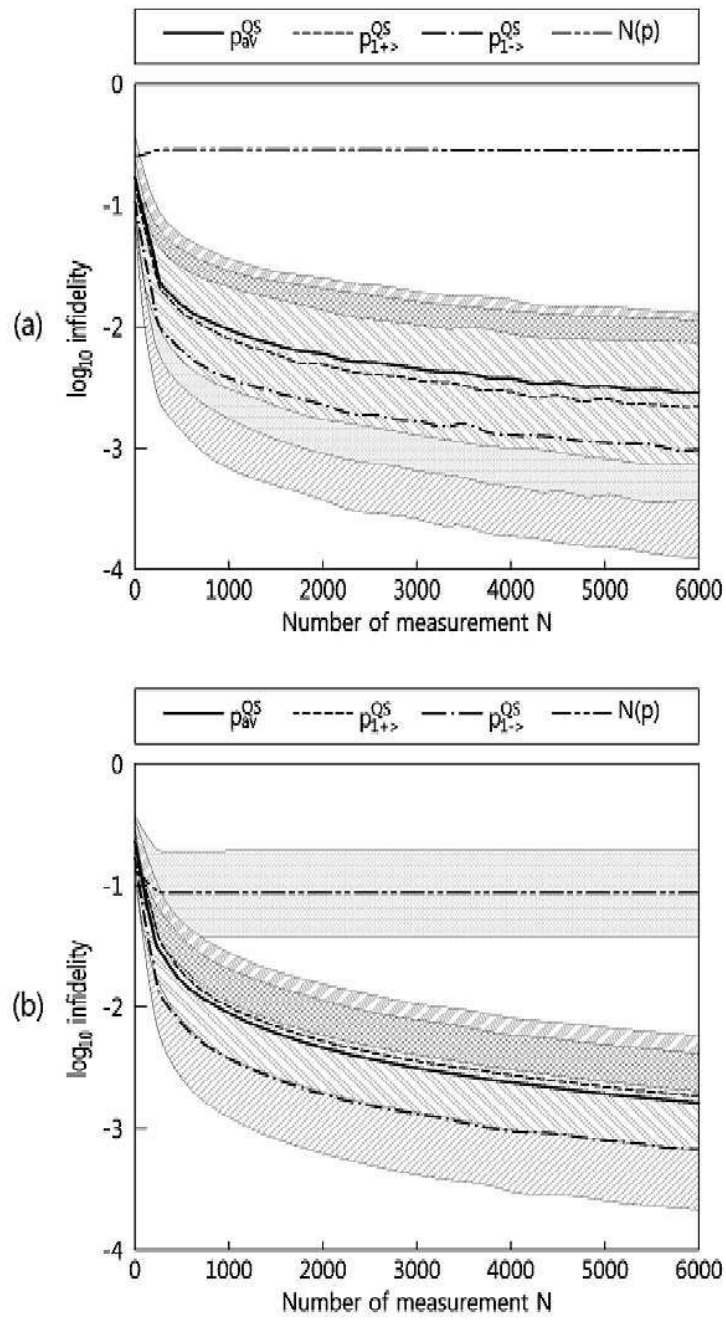
- [0141] 그리고/또는, 최대 잡음 채널은 무한 인과 순서(Indefinite Causal Order, ICO)로 설정될 수 있다.
- [0142] 그리고/또는, 최대 잡음 채널은 양자 탈분극 채널일 수 있다.
- [0143] 그리고/또는, 단층 촬영은 선형 회귀 추정에 기반할 수 있다.
- [0144] 다른 일실시예에 따라, 단층 촬영 방법은 추정될 양자 상태를 양자 스위치로 전송하고, 양자 스위치에서 출력되는 상태에서 양자 상태 단층 촬영을 수행하며, 양자 스위치에서 출력되는 상태의 예측에서 대수학을 수행하여 초기 상태를 추정하는 동작을 포함하여, 최대 잡음 탈분극 양자 채널에서 양자 상태 단층 촬영 정확도를 향상시킬 수 있다.
- [0145] 다른 일실시예에 따라, 단층 촬영 방법은 추정될 양자 상태를 양자 스위치로 전송하고, 양자 스위치에서 출력되는 상태에서 양자 상태 단층 촬영을 수행하며, 양자 스위치에서 출력되는 상태의 예측에서 대수학을 수행하여 초기 상태를 추정하는 동작을 포함하여, 채널 잡음이 최대인 경우에도 양자 상태 단층 촬영이 수행될 수 있다.
- [0146] 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 일실시예에 따른 양자 상태 단층 촬영 방법은 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 추정하는 동작을 포함할 수 있다.
- [0147] 도 4를 참조하여 설명한 단층 촬영 방법은 이에 한정되지 않으며, 이외 본 명세서에서 설명된 모든 또는 일부 동작들이 단층 촬영 방법에 포함될 수 있다.
- [0149] 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.
- [0150] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 특허청구범위의 범위에 속한다.

도면

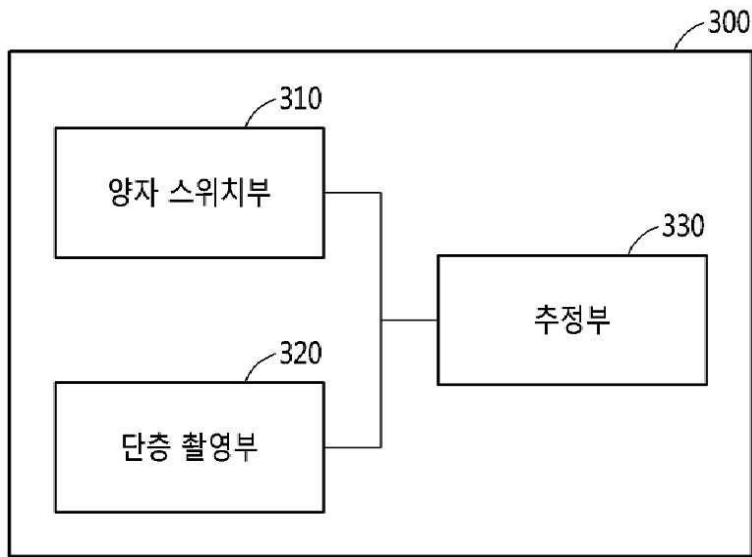
도면1



도면2



도면3



도면4

