



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0078261
(43) 공개일자 2022년06월10일

(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 10-2020-0167610
(22) 출원일자 2020년12월03일
심사청구일자 2020년12월03일

(71) 출원인
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(72) 발명자
신현동
경기도 수원시 영통구 청명로 132, 323동 501호 (영통동, 벽산삼익아파트)
우만 칼리드
경기도 수원시 영통구 청명남로60번길 24, B04호
올라 무하마드 아사드
경기도 수원시 영통구 청명로59번길 45-2 B03
(74) 대리인
김홍석

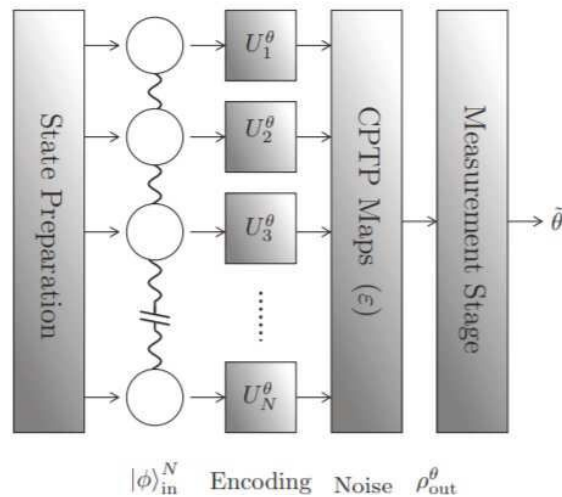
전체 청구항 수 : 총 20 항

(54) 발명의 명칭 양자 다수-바디 효과하에서 측정기반 다분 얽힘 측정 방법

(57) 요약

본 발명에 따른 다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정 방법에 있어서, 상기 방법은 양자 기기에 의해 수행되고, 상기 방법은, 정보를 인코딩하는 제1 양자 기기와 양자 프로브를 이용하여 상호 작용할 수 있는 상태를 구성하는 상태 준비(state preparation) 단계; 제1 양자 기기가 입력 상태를 인코딩하고, 입력 상태에 잡음이 추가됨에 따른 다분 얽힘 상태로 구성된 입력 상태에 얽힘 분해(entanglement dissociation) 동작을 수행하여 출력 상태가 제공되도록 하는 얽힘 분해 단계; 얽힘 분해 동작에 따라 제공되는 출력 상태를 측정하는 측정 단계; 및 측정된 출력 상태에 기반하여 입력 상태를 추정하는 추정 단계를 포함하고, 상기 얽힘 분해 단계에서, N개의 입력 상태 중 적어도 하나의 입력 상태는 출력 상태로 변환되어 분해될 수 있다.

대표도 - 도3



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711111536
과제번호	2019R1A2C2007037
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)(R&D)
연구과제명	양자네트워킹 핵심기술 연구
기 여 율	1/1
과제수행기관명	경희대학교산학협력단
연구기간	2019.03.01 ~ 2024.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정 방법에 있어서, 상기 방법은 양자 기기에 의해 수행되고, 상기 방법은,

정보를 인코딩하는 제1 양자 기기와 양자 프로브를 이용하여 상호 작용할 수 있는 상태를 구성하는 상태 준비(state preparation) 단계;

제1 양자 기기가 입력 상태를 인코딩하고, 입력 상태에 잡음이 추가됨에 따른 다분 얽힘 상태로 구성된 입력 상태에 얽힘 분해(entanglement dissociation) 동작을 수행하여 출력 상태가 제공되도록 하는 얽힘 분해 단계;

얽힘 분해 동작에 따라 제공되는 출력 상태를 측정하는 측정 단계; 및

측정된 출력 상태에 기반하여 입력 상태를 추정하는 추정 단계를 포함하고,

상기 얽힘 분해 단계에서, N개의 입력 상태 중 적어도 하나의 입력 상태는 출력 상태로 변환되어 분해되는 것을 특징으로 하는, 양자 측정 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 얽힘 분해 단계에서,

입력 상태에 전역 잡음(global noise)이 추가됨에 따라, N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고,

변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작을 수행하는 것을 특징으로 하는, 양자 측정 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 얽힘 분해 단계에서,

입력 상태에 국부 잡음(local noise)이 추가됨에 따라, N개의 입력 상태 중 해당 입력 상태는 출력 상태로 변환되어 얽힘 분해 동작이 수행되고,

N개의 입력 상태 중 나머지 입력 상태는 얽힘 분해 동작 없이 출력 상태로 제공되는, 양자 측정 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 추정 단계에서, 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 상태에 관한 파라미터가 입력 상태로 추정되고,

상기 추정 단계 이후에, 추정된 파라미터를 제2 양자 기기로 전달하는 추정 파라미터 전달 단계를 더 포함하고,

상기 추정 파라미터 전달 단계에서 전달된 파라미터를 이용하여 제2 양자 기기가 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 정보를 디코딩하는 것을 특징으로 하는, 양자 측정 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 얽힘 분해 단계 내지 상기 추정 단계는 반복적으로 수행되고,

상기 얽힘 분해 단계에서 N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태 중 제1 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작을 수행하고,

제1 출력 상태가 대응하는 제1 입력 상태에만 연관되면, 반복적으로 수행되는 얽힘 분해 단계에서 제1 입력 파라미터를 제외하고 나머지 입력 파라미터에 대해서만 얽힘 분해 동작을 수행하는, 양자 측정 방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 얽힘 분해 단계 내지 상기 추정 단계는 반복적으로 수행되고,

상기 얽힘 분해 단계에서 N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작에 따라 얽힘 상태가 아닌 독립 출력 상태들을 제외하고,

독립 출력 상태들을 제외한 해당 출력 상태들에 대응하는 해당 입력 상태들을 조합하여 서브 입출력 그룹을 형성하고,

반복적으로 수행되는 얽힘 분해 단계에서 얽힘 상태인 서브 입출력 그룹에 대해서만 얽힘 분해 동작을 수행하는, 양자 측정 방법.

청구항 7

다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정 방법에 있어서, 상기 방법은 양자 수신 기기인 제2 양자 기기에 의해 수행되고, 상기 방법은,

제1 양자 기기가 입력 상태를 인코딩하고, 입력 상태에 잡음이 추가됨에 따른 다분 얽힘 상태로 구성된 입력 상태에 얽힘 분해(entanglement dissociation) 동작을 수행하는 얽힘 분해 단계;

얽힘 분해 동작에 따라 제공되는 출력 상태를 측정하는 측정 단계;

측정된 출력 상태에 기반하여 입력 상태를 추정하는 추정 단계; 및

추정된 입력 상태에 관한 파라미터를 이용하여 제2 양자 기기가 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 정보를 디코딩하는 디코딩 단계를 포함하고,

상기 얽힘 분해 단계에서, N개의 입력 상태 중 적어도 하나의 입력 상태는 출력 상태로 변환되어 분해되는 것을 특징으로 하는, 양자 측정 방법.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 얽힘 분해 단계에서,

입력 상태에 전역 잡음(global noise)이 추가됨에 따라, N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고,

변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작을 수행하는 것을 특징으로 하는, 양자 측정 방법.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 얽힘 분해 단계에서,

입력 상태에 국부 잡음(local noise)이 추가됨에 따라, N개의 입력 상태 중 해당 입력 상태는 출력 상태로 변환되어 얽힘 분해 동작이 수행되고,

N개의 입력 상태 중 나머지 입력 상태는 얽힘 분해 동작 없이 출력 상태로 제공되는, 양자 측정 방법.

청구항 10

제8항에 있어서,

상기 추정 단계에서, 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 상태에 관한 파라미터가 입력 상태로 추정되고,

상기 추정 단계 이후에, 추정된 파라미터를 다른 양자 기기인 제3 양자 기기로 전달하는 추정 파라미터 전달 단계를 더 포함하고,

상기 추정 파라미터 전달 단계에서 전달된 파라미터를 이용하여 제3 양자 기기가 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 정보를 디코딩하는 것을 특징으로 하는, 양자 측정 방법.

청구항 11

제8항에 있어서,

상기 얽힘 분해 단계 내지 상기 추정 단계는 반복적으로 수행되고,

상기 얽힘 분해 단계에서 N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태 중 제1 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작을 수행하고,

제1 출력 상태가 대응하는 제1 입력 상태에만 연관되면, 반복적으로 수행되는 얽힘 분해 단계에서 제1 입력 파라미터를 제외하고 나머지 입력 파라미터에 대해서만 얽힘 분해 동작을 수행하는, 양자 측정 방법.

청구항 12

제8항에 있어서,

상기 얽힘 분해 단계 내지 상기 추정 단계는 반복적으로 수행되고,

상기 얽힘 분해 단계에서 N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작에 따라 얽힘 상태가 아닌 독립 출력 상태들을 제외하고,

독립 출력 상태들을 제외한 해당 출력 상태들에 대응하는 해당 입력 상태들을 조합하여 서브 입출력 그룹을 형성하고,

반복적으로 수행되는 얽힘 분해 단계에서 얽힘 상태인 서브 입출력 그룹에 대해서만 얽힘 분해 동작을 수행하는, 양자 측정 방법.

청구항 13

다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정을 수행하는 양자 기기에 있어서,

정보를 인코딩하는 제1 양자 기기의 상태를 검출할 수 있도록 구성된 양자 프로브; 및

양자 프로브와 동작 가능하게 결합되고, 양자 프로브를 이용하여 제1 양자 기기와 상호 작용할 수 있는 상태를 구성할 수 있는 제어부를 포함하고,

상기 제어부는,

제1 양자 기기가 입력 상태를 인코딩하고, 입력 상태에 잡음이 부가됨에 따른 다분 얽힘 상태로 구성된 입력 상태에 얽힘 분해(entanglement dissociation) 동작을 수행하여 출력 상태가 제공되도록 하고,

얽힘 분해 동작에 따라 제공되는 출력 상태를 측정하고, 측정된 출력 상태에 기반하여 입력 상태를 추정하도록 구성된, 양자 기기.

청구항 14

제13항에 있어서,

상기 제어부는,

입력 상태에 전역 잡음(global noise)이 부가됨에 따라, N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작을 수행하고,

입력 상태에 국부 잡음(local noise)이 부가됨에 따라, N개의 입력 상태 중 해당 입력 상태를 출력 상태로 변환하여 얽힘 분해 동작을 수행하고, N개의 입력 상태 중 나머지 입력 상태는 얽힘 분해 동작 없이 출력 상태로 제공하는, 양자 기기.

청구항 15

제13항에 있어서,

제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 상태에 관한 파라미터가 입력 상태로 추정되고, 상기 제어부는,

추정된 파라미터를 제2 양자 기기으로 전달하고,

전달된 파라미터를 이용하여 제2 양자 기기가 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 정보를 디코딩하도록 제2 양자 기기를 제어하는 것을 특징으로 하는, 양자 측정 방법.

청구항 16

제13항에 있어서,

상기 얽힘 분해 동작 내지 상기 입력 상태 추정 동작을 반복적으로 수행하는 상기 제어부는,

N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작에 따라 얽힘 상태가 아닌 독립 출력 상태들을 제외하고,

독립 출력 상태들을 제외한 해당 출력 상태들에 대응하는 해당 입력 상태들을 조합하여 서브 입출력 그룹을 형성하고,

반복적으로 수행되는 얽힘 분해 단계에서 얽힘 상태인 서브 입출력 그룹에 대해서만 얽힘 분해 동작을 수행하는, 양자 기기.

청구항 17

다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정을 수행하는 양자 기기에 있어서,

양자 정보를 수신하도록 구성된 송수신부; 및

상기 송수신부와 동작 가능하게 결합되고, 제1 양자 기기가 입력 상태를 인코딩하고, 입력 상태에 잡음이 부가됨에 따른 다분 얽힘 상태로 구성된 입력 상태에 얽힘 분해(entanglement dissociation) 동작을 수행하는 제어부를 포함하고,

상기 제어부는,

얽힘 분해 동작에 따라 제공되는 출력 상태를 측정하고, 측정된 출력 상태에 기반하여 입력 상태를 추정하고, 추정된 입력 상태에 관한 파라미터를 이용하여 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 정보를 디코딩하도록 구성되는, 양자 기기.

청구항 18

제17항에 있어서,

상기 제어부는,

입력 상태에 전역 잡음(global noise)이 부가됨에 따라, N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작을 수행하고,

입력 상태에 국부 잡음(local noise)이 부가됨에 따라, N개의 입력 상태 중 해당 입력 상태를 출력 상태로 변환하여 얽힘 분해 동작을 수행하고, N개의 입력 상태 중 나머지 입력 상태를 얽힘 분해 동작 없이 출력 상태로 제공하는, 양자 기기.

청구항 19

제17항에 있어서,

제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 상태에 관한 파라미터가 입력 상태로 추정되고, 상기 제어부는,

추정된 파라미터를 다른 양자 기기인 제3 양자 기기으로 전달하고,

전달된 파라미터를 이용하여 제3 양자 기기가 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 정보를 디코딩하도록 제3 양자 기기를 제어하는 것을 특징으로 하는, 양자 기기.

청구항 20

제17항에 있어서,

상기 얽힘 분해 동작 내지 상기 입력 상태 추정 동작을 반복적으로 수행하는 상기 제어부는,

N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작에 따라 얽힘 상태가 아닌 독립 출력 상태들을 제외하고,

독립 출력 상태들을 제외한 해당 출력 상태들에 대응하는 해당 입력 상태들을 조합하여 서브 입출력 그룹을 형성하고,

반복적으로 수행되는 얽힘 분해 단계에서 얽힘 상태인 서브 입출력 그룹에 대해서만 얽힘 분해 동작을 수행하는, 양자 기기.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 다분 얽힘 측정 방법에 관한 것이다. 보다 상세하게는, 양자 다수-바디 효과 하에서 측정기반 다분 얽힘 측정 방법 및 이를 수행하는 양자 기기에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 얽힘(entanglement)은 양자 계산, 양자 암호화 및 양자 계측 분야에서 놀라운 성과를 달성하는 데 중요한 요소이다. 양자 계측은 풍부한 얽힘을 활용하여 매우 정밀한 측정을 수행하는 과학이다. 전통적으로 양자 계측 프로토콜은 물리적 시스템과 관련된 파라미터의 추정을 취급한다. 추정에는 추정기의 표준 편차 형태와 관련된 고유 불확실성이 있다. 이러한 표준 편차는 양자 Cram'érRao 경계 (QCRB)에 명시된 것처럼 양자 피서 정보 (QFI)의 제곱근의 역에 의해 하한이 된다. QFI는 계측 실험을 통해 측정 가능한 정밀도를 정량화하는 가장 주목할 만한 측정이다.

[0003] 양자 상관 관계는 양자 프로토콜의 정보 처리 능력을 향상시키는데 중요할 수 있다. 더욱이, 양자 정보 이론적 측정은 양자 상관의 정량화를 단순화할 수 있다. 예를 들어, 양자 일관성(QC), 양자 불일치(QD), 국부 양자 불확도(LQU) 및 측정 유도 비국부성(measurement induced non-locality, MIN) 양자 계측 분야에서 광범위하게 활용되었다. 이분자 상태뿐만 아니라 다자 상태에서 얽힘을 정량화하는 다수의 얽힘 척도가 존재한다. 스큐 정보는 다자 양자 시스템에서 얽힘과 계측 성능의 지표로도 표현될 수 있다. 이러한 연구는 측정기반 이니그마(enigma)를 밝혀 낼 수 있는 얽힘에 정보 이론적 의미를 부여한다.

[0004] 선형 양자 계측에서 얽힘 지원은 측정 정밀도가 $N^{-1/2}$ 로 확장되고 N이 입자의 수인 기존 샷 잡음 제한 (표준 양자 제한 (SQL)이라고도 함)을 초과할 수 있다. Heisenberg 한계 (HL)는 N^{-1} 이다. 얽힘 양자 검출은 또한 잡음이 있을 때 측정기반 분리형 검출보다 성능이 뛰어나다. 하지만, 얽힘 저하 잡음의 결과로 다분 양자 검출에서 측정기반 자원이 제한될 수 있다는 문제점이 있다. 따라서 잡음 진화 하에서 관련된 얽힘 구조는 측정기반 자원가용성과 관련하여 식별되어야 한다.

[0005] 비선형 양자 계측에서 다중 입자 양자 프로브에서 입자 간의 상호 작용은 HL을 넘어서는 정밀도를 허용하고 $N^{-\kappa}$ 로 주어진 SHL (super-Heisenberg limit)을 달성한다. 여기서 κ 는 파라미터 인코딩의 비선형성 정도이다. 다분 얽힌 양자 프로브의 강력한 상호 작용은 또한 잡음에 대한 강인성을 제공한다.

[0006] 이러한 양자 시스템은 본질적으로 얽힘을 생성하는 비 국부 상호 작용 Hamiltonian에 의해 설명된다. 이러한 얽힘 생성 연산자를 사용하면 정밀도가 기하급수적으로 향상될 수 있다. 그러나, 이러한 양자 측정 정밀도가 향상됨은 일반적으로 사실이 아니다. 예를 들어, 얽힘의 증가는 항상 QFI의 증가를 보장하지는 않는다. 따라서, HL을 넘어서는 측정기반 정밀도와 관련하여 얽힘의 명시적인 역할이 여전히 모호하다는 문제점이 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 따라서, 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는, 다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정 방법을 제공하는 것을 목표로 한다.

[0008] 또한, 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는, 다분 얽힘 구조에서 측정기반 정밀도를 향상할 수 있는 양자 측정

방법을 제공하는 것을 목표로 한다.

[0009] 또한, 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는, 양자 다수-바디 효과 하에서 측정기반 다분 얽힘 측정 방법 및 이를 수행하는 양자 기기를 제공하는 것을 목표로 한다.

과제의 해결 수단

[0010] 상기와 같은 과제를 해결하기 위한 본 발명에 따른 다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정 방법에 있어서, 상기 방법은 양자 기기에 의해 수행되고, 상기 방법은, 정보를 인코딩하는 제1 양자 기기와 양자 프로브를 이용하여 상호 작용할 수 있는 상태를 구성하는 상태 준비(state preparation) 단계, 제1 양자 기기가 입력 상태를 인코딩하고, 입력 상태에 잡음이 부가됨에 따른 다분 얽힘 상태로 구성된 입력 상태에 얽힘 분해(entanglement dissociation) 동작을 수행하여 출력 상태가 제공되도록 하는 얽힘 분해 단계; 얽힘 분해 동작에 따라 제공되는 출력 상태를 측정하는 측정 단계; 및 측정된 출력 상태에 기반하여 입력 상태를 추정하는 추정 단계를 포함하고, 상기 얽힘 분해 단계에서, N개의 입력 상태 중 적어도 하나의 입력 상태는 출력 상태로 변환되어 분해될 수 있다.

[0011] 일 실시 예에 따르면, 상기 얽힘 분해 단계에서, 입력 상태에 전역 잡음(global noise)이 부가됨에 따라, N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작을 수행할 수 있다.

[0012] 일 실시 예에 따르면, 상기 얽힘 분해 단계에서, 입력 상태에 국부 잡음(local noise)이 부가됨에 따라, N개의 입력 상태 중 해당 입력 상태는 출력 상태로 변환되어 얽힘 분해 동작이 수행되고, N개의 입력 상태 중 나머지 입력 상태는 얽힘 분해 동작 없이 출력 상태로 제공될 수 있다.

[0013] 일 실시 예에 따르면, 상기 추정 단계에서, 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 상태에 관한 파라미터가 입력 상태로 추정되고, 상기 추정 단계 이후에, 추정된 파라미터를 제2 양자 기기 전달하는 추정 파라미터 전달 단계를 더 포함하고, 상기 추정 파라미터 전달 단계에서 전달된 파라미터를 이용하여 제2 양자 기기가 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 정보를 디코딩할 수 있다.

[0014] 일 실시 예에 따르면, 상기 얽힘 분해 단계 내지 상기 추정 단계는 반복적으로 수행되고, 상기 얽힘 분해 단계에서 N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태 중 제1 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작을 수행하고, 제1 출력 상태가 대응하는 제1 입력 상태에만 연관되면, 반복적으로 수행되는 얽힘 분해 단계에서 제1 입력 파라미터를 제외하고 나머지 입력 파라미터에 대해서만 얽힘 분해 동작을 수행할 수 있다.

[0015] 일 실시 예에 따르면, 상기 얽힘 분해 단계 내지 상기 추정 단계는 반복적으로 수행되고, 상기 얽힘 분해 단계에서 N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작에 따라 얽힘 상태가 아닌 독립 출력 상태들을 제외하고, 독립 출력 상태들을 제외한 해당 출력 상태들에 대응하는 해당 입력 상태들을 조합하여 서브 입출력 그룹을 형성하고, 반복적으로 수행되는 얽힘 분해 단계에서 얽힘 상태인 서브 입출력 그룹에 대해서만 얽힘 분해 동작을 수행할 수 있다.

[0016] 본 발명의 다른 양상에 따른 다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정 방법에 있어서, 상기 방법은 양자 수신 기기인 제2 양자 기기에 의해 수행되고, 상기 방법은, 제1 양자 기기가 입력 상태를 인코딩하고, 입력 상태에 잡음이 부가됨에 따른 다분 얽힘 상태로 구성된 입력 상태에 얽힘 분해(entanglement dissociation) 동작을 수행하는 얽힘 분해 단계; 얽힘 분해 동작에 따라 제공되는 출력 상태를 측정하는 측정 단계; 측정된 출력 상태에 기반하여 입력 상태를 추정하는 추정 단계; 및 추정된 입력 상태에 관한 파라미터를 이용하여 제2 양자 기기가 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 정보를 디코딩하는 디코딩 단계를 포함하고, 상기 얽힘 분해 단계에서, N개의 입력 상태 중 적어도 하나의 입력 상태는 출력 상태로 변환되어 분해될 수 있다.

[0017] 일 실시 예에 따르면, 상기 얽힘 분해 단계에서, 입력 상태에 전역 잡음(global noise)이 부가됨에 따라, N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작을 수행할 수 있다.

[0018] 일 실시 예에 따르면, 상기 얽힘 분해 단계에서, 입력 상태에 국부 잡음(local noise)이 부가됨에 따라, N개의 입력 상태 중 해당 입력 상태는 출력 상태로 변환되어 얽힘 분해 동작이 수행되고, N개의 입력 상태 중 나머지 입력 상태는 얽힘 분해 동작 없이 출력 상태로 제공될 수 있다.

[0019] 일 실시 예에 따르면, 상기 추정 단계에서, 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 상태에 관한 파라미터가 입력

상태로 추정되고, 상기 추정 단계 이후에, 추정된 파라미터를 다른 양자 기기인 제3 양자 기기로 전달하는 추정 파라미터 전달 단계를 더 포함하고, 상기 추정 파라미터 전달 단계에서 전달된 파라미터를 이용하여 제3 양자 기기가 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 정보를 디코딩할 수 있다.

[0020] 일 실시 예에 따르면, 상기 얽힘 분해 단계 내지 상기 추정 단계는 반복적으로 수행되고, 상기 얽힘 분해 단계에서 N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태 중 제1 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작을 수행하고, 제1 출력 상태가 대응하는 제1 입력 상태에만 연관되면, 반복적으로 수행되는 얽힘 분해 단계에서 제1 입력 파라미터를 제외하고 나머지 입력 파라미터에 대해서만 얽힘 분해 동작을 수행할 수 있다.

[0021] 일 실시 예에 따르면, 상기 얽힘 분해 단계 내지 상기 추정 단계는 반복적으로 수행되고, 상기 얽힘 분해 단계에서 N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작에 따라 얽힘 상태가 아닌 독립 출력 상태들을 제외하고, 독립 출력 상태들을 제외한 해당 출력 상태들에 대응하는 해당 입력 상태들을 조합하여 서브 입출력 그룹을 형성하고, 반복적으로 수행되는 얽힘 분해 단계에서 얽힘 상태인 서브 입출력 그룹에 대해서만 얽힘 분해 동작을 수행할 수 있다.

[0022] 본 발명의 또 다른 양상에 따른 다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정을 수행하는 양자 기기가 제공된다. 상기 양자 기기는 정보를 인코딩하는 제1 양자 기기의 상태를 검출할 수 있도록 구성된 양자 프로브; 및 양자 프로브와 동작 가능하게 결합되고, 양자 프로브를 이용하여 제1 양자 기기와 상호 작용할 수 있는 상태를 구성할 수 있는 제어부를 포함하고, 상기 제어부는 제1 양자 기기가 입력 상태를 인코딩하고, 입력 상태에 잡음이 추가됨에 따른 다분 얽힘 상태로 구성된 입력 상태에 얽힘 분해(entanglement dissociation) 동작을 수행하여 출력 상태가 제공되도록 하고, 얽힘 분해 동작에 따라 제공되는 출력 상태를 측정하고, 측정된 출력 상태에 기반하여 입력 상태를 추정하도록 구성될 수 있다.

[0023] 일 실시 예에 따르면, 상기 제어부는 입력 상태에 전역 잡음(global noise)이 추가됨에 따라, N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작을 수행하고, 입력 상태에 국부 잡음(local noise)이 추가됨에 따라, N개의 입력 상태 중 해당 입력 상태를 출력 상태로 변환하여 얽힘 분해 동작을 수행하고, N개의 입력 상태 중 나머지 입력 상태는 얽힘 분해 동작 없이 출력 상태로 제공할 수 있다.

[0024] 일 실시 예에 따르면, 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 상태에 관한 파라미터가 입력 상태로 추정되고, 상기 제어부는 추정된 파라미터를 제2 양자 기기로 전달하고, 전달된 파라미터를 이용하여 제2 양자 기기가 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 정보를 디코딩하도록 제2 양자 기기를 제어할 수 있다.

[0025] 일 실시 예에 따르면, 상기 얽힘 분해 동작 내지 상기 입력 상태 추정 동작을 반복적으로 수행하는 상기 제어부는, N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작에 따라 얽힘 상태가 아닌 독립 출력 상태들을 제외하고, 독립 출력 상태들을 제외한 해당 출력 상태들에 대응하는 해당 입력 상태들을 조합하여 서브 입출력 그룹을 형성하고, 반복적으로 수행되는 얽힘 분해 단계에서 얽힘 상태인 서브 입출력 그룹에 대해서만 얽힘 분해 동작을 수행할 수 있다.

[0026] 본 발명의 또 다른 양상에 따른 다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정을 수행하는 양자 기기가 제공된다. 상기 양자 기기는 양자 정보를 수신하도록 구성된 송수신부; 및 상기 송수신부와 동작 가능하게 결합되고, 제1 양자 기기가 입력 상태를 인코딩하고, 입력 상태에 잡음이 추가됨에 따른 다분 얽힘 상태로 구성된 입력 상태에 얽힘 분해(entanglement dissociation) 동작을 수행하는 제어부를 포함하고, 상기 제어부는 얽힘 분해 동작에 따라 제공되는 출력 상태를 측정하고, 측정된 출력 상태에 기반하여 입력 상태를 추정하고, 추정된 입력 상태에 관한 파라미터를 이용하여 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 정보를 디코딩하도록 구성될 수 있다.

[0027] 일 실시 예에 따르면, 상기 제어부는 입력 상태에 전역 잡음(global noise)이 추가됨에 따라, N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작을 수행하고, 입력 상태에 국부 잡음(local noise)이 추가됨에 따라, N개의 입력 상태 중 해당 입력 상태를 출력 상태로 변환하여 얽힘 분해 동작을 수행하고, N개의 입력 상태 중 나머지 입력 상태를 얽힘 분해 동작 없이 출력 상태로 제공할 수 있다.

[0028] 일 실시 예에 따르면, 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 상태에 관한 파라미터가 입력 상태로 추정되고, 상기 제어부는, 추정된 파라미터를 다른 양자 기기인 제3 양자 기기로 전달하고, 전달된 파라미터를 이용하여 제3 양자 기기가 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 정보를 디코딩하도록 제3 양자 기기를 제어할 수 있다.

[0029] 일 실시 예에 따르면, 상기 얽힘 분해 동작 내지 상기 입력 상태 추정 동작을 반복적으로 수행하는 상기 제어부는, N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작에 따라 얽

힘 상태가 아닌 독립 출력 상태들을 제외하고, 독립 출력 상태들을 제외한 해당 출력 상태들에 대응하는 해당 입력 상태들을 조합하여 서브 입출력 그룹을 형성하고, 반복적으로 수행되는 얽힘 분해 단계에서 얽힘 상태인 서브 입출력 그룹에 대해서만 얽힘 분해 동작을 수행할 수 있다.

발명의 효과

- [0030] 본 발명에 따르면, 다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정 방법에서 측정기반 정밀도를 향상시킬 수 있다..
- [0031] 또한, 본 발명에 따르면, 다분 얽힘 구조에서 측정기반 정밀도를 향상하면서도 양자 시스템에 미치는 영향을 최소화할 수 있다.
- [0032] 또한, 본 발명에 따르면, 양자 다수-바다 효과 하에서 측정기반 다분 얽힘 측정 방법의 측정기반 정밀도를 향상시키면서도 양자 시스템에 미치는 영향을 최소화할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0033] 도 1a는 본 발명에 따른 양자 측정 방법을 수행하는 양자 시스템을 도시한다.
- 도 1b는 본 발명에 따른 나노 머신의 상세 구성을 도시한다.
- 도 2a 및 도 2b는 본 발명에 따른 다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정 방법을 수행하는 양자 시스템을 나타낸다.
- 도 3은 본 발명에 따른 양자 계측 프로토콜의 구성도를 나타낸다.
- 도 4는 본 발명에 따른 전역 잡음 및 국부 잡음 하에서 얽힘 분해 구성을 나타낸다.
- 도 5는 본 발명에 따른 싱글 샷 측정을 위한 양자 Cramer-Rao 경계를 나타낸 것이다.
- 도 6은 본 발명에 따른 양자 파라미터에 따른 다분 얽힘 측정 결과를 나타낸다.
- 도 7 및 도 8은 본 발명에 따른 국부적 탈분극(depolarizing) 잡음 파라미터의 함수로서 다분 얽힘 측정 결과를 나타낸다.
- 도 9는 본 발명에 따른 국부 잡음 하에서 얽힘 분해 블록 (EDB)을 순차적으로 적용하여 실현된 얽힘 분해 과정의 개념도를 나타낸다.
- 도 10a 및 도 10b는 본 발명의 서로 다른 실시 예에 따른 다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정 방법의 흐름도를 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0034] 상술한 본 발명의 특징 및 효과는 첨부된 도면과 관련한 다음의 상세한 설명을 통하여 보다 분명해 질 것이며, 그에 따라 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 본 발명의 기술적 사상을 용이하게 실시할 수 있을 것이다. 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 형태를 가질 수 있는바, 특정 실시 예들을 도면에 예시하고 본문에 상세하게 설명하고자 하다. 그러나 이는 본 발명을 특정한 개시형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 하다. 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시 예들을 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다.
- [0035] 각 도면을 설명하면서 유사한 참조부호를 유사한 구성요소에 대해 사용하다.
- [0036] 제1, 제2등의 용어는 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 상기 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다.
- [0037] 예를 들어, 본 발명의 권리 범위를 벗어나지 않으면서 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소도 제1 구성요소로 명명될 수 있다. "및/또는" 이라는 용어는 복수의 관련된 기재된 항목들의 조합 또는 복수의 관련된 기재된 항목들 중의 어느 항목을 포함하다.
- [0038] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이

속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미가 있다.

- [0039] 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않아야 한다.
- [0040] 이하의 설명에서 사용되는 구성요소에 대한 접미사 "모듈", "블록" 및 "부"는 명세서 작성의 용이함만이 고려되어 부여되거나 혼용되는 것으로서, 그 자체로 서로 구별되는 의미 또는 역할을 갖는 것은 아니다.
- [0041] 이하, 본 발명의 바람직한 실시 예를 첨부한 도면을 참조하여 당해 분야에 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 설명한다. 하기에 본 발명의 실시 예를 설명함에 있어, 관련된 공지의 기능 또는 공지의 구성에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명을 생략한다.
- [0042] 이하, 본 발명에 따른 다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정 방법 및 이를 수행하는 양자 기기에 대해 설명한다.
- [0043] 이와 관련하여, 도 1a는 본 발명에 따른 양자 측정 방법을 수행하는 양자 시스템을 도시한다. 도 1a에 도시된 바와 같이, 분자 시스템은 복수의 서브 시스템을 포함하고, 편의상 제1 서브 시스템(100)과 제2 서브 시스템(200)이 포함된 것으로 표현할 수 있다. 하지만, 상기 제1 및 제2 서브 시스템(100, 200)에만 한정되는 것이 아니라, 임의의 개수의 서브 시스템 간에도 적용될 수 있다. 한편, 상기 제1 및 제2 서브 시스템(100, 200)은 임의의 나노 머신일 수 있다. 즉, 제1 및 제2 서브 시스템(100, 200)은 각각 송신 기기인 제1(분자) 기기와 수신 기기인 제2(분자) 기기일 수 있다. 한편, 상기 제1(분자) 기기(100)와 제2(분자) 기기(200)는 어느 한 기기가 송신 기기이면 나머지 기기는 수신 기기일 수 있다. 한편, 상기 제1(분자) 기기(100)가 복수의 제2(분자) 기기(200)들을 제어하는 제어 머신인 경우도 포함된다.
- [0044] 도 1b는 본 발명에 따른 나노 머신의 상세 구성을 도시한다. 편의상, 송신 기기(나노 전송 머신)를 제1 기기(100)로, 그리고 수신 기기(나노 수신 머신)를 제2 기기(200)로 지칭할 수 있다. 하지만, 이에 한정되는 것은 아니고, 전송된 바와 같이 그 역도 성립하고, 또한 송신/수신 기기로 동시에 동작할 수 있다.
- [0045] 제1 기기(100)는 (나노) 송수신부(110), (나노) 제어부(120) 및 (나노) 메모리(130)를 포함한다. 마찬가지로, 제2 기기(200)도 (나노) 송수신부(210), (나노) 제어부(220) 및 (나노) 메모리(230)를 포함한다. 여기서, 송수신부(110, 210)는 분자(양자) 채널을 통해 분자(양자) 데이터를 송수신하므로 분자(양자) 송수신부라고 지칭될 수 있다. 또한, 송수신부(110, 210)는 일부 제어 데이터 또는 관련된 정보를 일반 채널(classical channel)을 통해 송수신할 수 있으므로, 일반 송수신부로도 지칭될 수 있다. 즉, 송수신부(110, 210)는 물리적으로 구분된 분자(양자) 송수신부와 일반 송수신부를 구비하거나, 또는 논리적으로 구분된 분자(양자) 송수신부와 일반 송수신부를 구비할 수 있다. 따라서, 송수신부(110)는 일반 채널(classical channel)과 양자 채널(quantum channel)을 통해 수신 기기인 제2 기기(200)로 양자 정보를 송신하도록 구성된다. 여기서, 양자 정보는 채널 상태(state) 및/또는 채널 확산(예컨대, 양자 상태)에 관한 정보를 포함한다. 또한, 송수신부(110)는 일반 채널을 통해 상기 제2 기기(200)로부터 피드백 정보(예컨대, 양자 채널 정보, 상관 피드백)를 수신할 수 있다.
- [0046] 다른 예로, 이러한 채널 상태(state) 및/또는 채널 확산에 대한 정보는 직접 전달되는 것이 아니라 수신 양자 기기에 의해 추정되거나 또는 다른 별도의 양자 검출 기기에 의해 검출될 수도 있다. 이와 관련하여, 도 2a 및 도 2b는 본 발명에 따른 다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정 방법을 수행하는 양자 시스템을 나타낸다. 구체적으로, 도 2a는 별도의 양자 기기(300)가 송신 기기인 제1 양자 기기(100)의 양자(상태)를 측정한다. 반면에, 도 2b는 수신 기기인 제2 양자 기기(200)가 송신 기기인 제1 양자 기기(100)의 양자(상태)를 측정한다.
- [0047] 도 2a를 측정하면, 양자 기기(300)가 측정한 측정 결과에 따른 추정된 양자 상태 정보를 제2 양자 기기(200)로 전달할 수 있다. 이에 따라, 송신 기기인 제1 양자 기기(100)와 수신 기기인 제2 양자 기기(200) 간에 다분 얽힘을 고려한 신뢰성 높은 양자 통신을 수행할 수 있다.
- [0048] 도 2b를 측정하면, 수신 기기인 제2 양자 기기(200)가 측정한 측정 결과에 따른 추정된 양자 상태 정보를 이용하여, 송신 기기인 제1 양자 기기(100)와 다분 얽힘을 고려한 신뢰성 높은 양자 통신을 수행할 수 있다. 한편, 동일 또는 유사한 다분 얽힘 현상이 발생된 채널을 공유하는 다른 양자 기기인 제3 양자 기기(300)으로 추정된 양자 상태 정보를 전달할 수 있다. 이에 따라, 다른 양자 기기인 제3 양자 기기(300)도 제1 양자 기기(100) 간

에 다분 얽힘을 고려한 신뢰성 높은 양자 통신을 수행할 수 있다.

[0049] 본 발명에 따른 다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정 방법과 관련하여, 기술적 특징에 대해 간단히 요약하면 다음과 같다. 전통적인 양자 계측 프로토콜에서 초기 다분 얽힌 순수 양자 프로브는 격리된 것으로 간주된다. 즉, 양자 다 물체 효과가 없다. 여기에서 본 명세서에서는 초기 혼합 양자 프로브의 측정기반의 자원이 풍부한 다분 얽힘에 대한 잡음 환경과의 상호 작용 및 입자 간의 비 국지적 상호 작용과 같은 고유한 다 물체 효과의 영향을 연구한다. 이와 관련하여 본 명세서에서는 정보 이론의 다분 얽힘 측정을 장점으로 사용한다. 잡음 환경과의 불가피한 상호 작용은 계측 이점을 제한하는 다중 입자 양자 프로브에서 얽힘을 초래한다. 이를 위해 본 명세서에서는 얽힘 분해를 사용하여 전역 및 국부 잡음 진화에서 관련 얽힘 구조를 식별할 수 있는 다분 얽힘 측정에 대한 경계를 유도한다. 또한, 본 명세서에서는 다자 양자 검출에서의 얽힘 능력 측면에서 비 국부적 상호 작용을 조사한다. 본 명세서에서는 이러한 비 국부 상호 작용이 혼합 상태 양자 계측에서 더 나은 정밀도 확장을 나타내는 중요한 리소스로 악용될 수 있음을 나타낸다. 또한 GHZ-W 등급 상태에 대해 이러한 결과를 수치적으로 관찰한다.

[0050] 본 명세서에서는 먼저 다분 얽힘 상태에 대한 측정기반 성능 지수로서 왜곡 정보 기반 얽힘 측정을 조사한다. 본 명세서에서는 얽힘 분해를 사용하여 국부 및 전역 잡음 진화 모두에서 얽힘 구조를 정량적으로 식별한다. 그런 다음 비선형 양자 계측에 대한 이전 기여의 범위를 확대하여 반목(frustrated) 및 비 반목(non-frustrated) 양자 시스템의 관점에서 계측 성능에 대한 비 국부(non-local) 상호 작용의 영향을 제거할 수 있다.

[0051] 도 3은 본 발명에 따른 양자 계측 프로토콜의 구성도를 나타낸다. 도 3을 참조하면, 양자 계측 프로토콜은 4 단계로 구성될 수 있다 첫 번째는 얽힌 양자 프로브가 준비되는 준비 단계이다. 이 양자 프로브는 시스템과 상호 작용하여 물리적 시스템에 기인한 파라미터 Θ 에 대한 정보를 인코딩한다. 무잡음 상호 작용은 $\rho^{\Theta}_{in} = U^{\Theta} \rho_{in} U^{\Theta\dagger}$ 와 같은 단일 진화로 표시된다. 여기서 $U^{\Theta} = \exp\{i\Theta H\}$ 이고 H 는 양자 프로브의 역학을 제어하는 Hamiltonian이다. 상호 작용 단계의 잡음 맵은 다음과 같이 단일화 이후 순차적으로 진행된다. $[\varepsilon \circ U^{\Theta}](\rho_{in}) \rightarrow \rho^{\Theta}_{out}$ 으로 양자 프로브의 순도가 $\text{tr}(\rho_{in})^2 = \text{tr}(\rho^{\Theta}_{in})^2 > \text{tr}(\rho^{\Theta}_{out})^2$ 로 감소한다. 이러한 진화된 양자 프로브 상태는 획득된 측정 데이터를 기반으로 최종적으로 추정될 수 있다.

[0052] 1. Preliminaries

[0053] 1.1 다분 얽힘

[0054] 본 명세서에서는 왜곡 정보 기반 다분 얽힘 측정을 설명한다. Hamiltonian H 하에서 진화하는 양자 상태 ρ 의

Wigner-Yanase skew 정보는 $I(\rho, H) = -\frac{1}{2} \text{tr}[\rho^{\frac{1}{2}}, H]^2$ 과 같이 주어진다.

[0055] 여기서 $[\circ, \circ]$ 는 교환자(commutator)이다. 이러한 정보 측정은 Fisher 정보의 양자 유사체로 간주될 수 있다./ 더욱이 그것은 상태와 Hamiltonian에 대한 비대칭적 강조와 함께 ρ 와 H 사이의 비교 환성의 척도로 해석

될 수 있다. 최대 왜곡 정보는 $I(\rho) = \sup_{H_L} I(\rho, H_L)$ 과 같이 표시된다.

[0056] 여기서, $H_L = \sum_i H_L^{(i)}$ with $H_L^{(i)} = I_2^{\otimes i-1} \otimes h^{(i)} \otimes I_2^{\otimes N-i}$ 가 성립하고, I_2 는 차수 2의 단일 연산자(identity operator)이고, $h^{(i)} = \vec{v}^{(i)} \cdot \vec{\sigma}$ 는 파울리 벡터를 갖는 번째 큐비트에 작용하는 일반 국부 스핀 관측 항목(generic local spin observables)을 나타낸다. N 큐비트의 순수 양자 검출 상태 $|\phi\rangle$ 에 대해 왜곡 정보 기반 다분 얽힘 측정은 아래의 수학적식 1과 같이 제공될 수 있다.

수학적식 1

[0057] $E(|\phi\rangle) = [I(|\phi\rangle\langle\phi|) - N]^+$

[0058] 수학적식 1의 convex-roof extension은 아래의 수학적식 2와 같이 제공될 수 있다.

수학식 2

$$E(\rho) = \min_{\{p_i, |\phi_i\rangle\}} \sum_i p_i E(|\phi_i\rangle \langle \phi_i|)$$

[0059]

[0060]

한편, 도 4는 본 발명에 따른 전역 잡음 및 국부 잡음 하에서 얽힘 분해 구성을 나타낸다. 구체적으로 도 4(a) 및 (b)는 각각 전역 잡음 및 국부 잡음 하에서 얽힘 분해 구성을 도식적으로 나타낸 것이다. 입력은 N 입자의 얽힌 프로브이고 출력 상태는 얽힌 하위 그래프로 구성된 곱 상태이다. 얽힘 분해 맵은 두 부분으로 나뉠 수 있다 (i) 수직 직사각형 블록은 선형 Hermitian 맵 $\mathcal{E}$ 을 나타내고 (ii) 수평 직사각형 블록은 얽힘 분해 (측정 및 준비) 작업 Φ^{EB} 를 나타낸다.

[0061]

1.2. 얽힘 분해 (entanglement dissociation)

[0062]

얽힘 분해는 분산 진화를 겪은 다자 얽힌 양자 상태의 얽힘 구조 변환을 추적할 수 있다. 얽힘 분해 맵 Φ^{DE} 는 도 4와 같이 선형 Hermitian 맵 $\mathcal{E}$ 과 얽힘 분리 연산 Φ^{EB} 의 연결로 구성된다. 선형 맵 $\mathcal{E}$ 은 입력 밀도 행렬 ρ_N 을 Hermitian 블록 양성 연산자 $\mathcal{E}(\rho)$ 로 변환한다. (측정 및 준비) 연산 Φ^{EB} 는 해당 Choi 연산자 Ω_N s | N-Ns가 입력 얽힌 프로브 상태 ρ_N 에 대한 파티션 $N_s|N-N_s$ 에 대해 분리 가능한 경우 얽힘 끊김이다. 이는 단위 순위 Kraus 연산자 $A_u \propto |\psi_u\rangle\langle\phi_u|$ 에 대한 표현이 있음을 의미한다. Holevo 형식에서 이러한 확률 맵은 $\Phi^{\text{EB}}(\rho_{\text{in}}) = \sum_u \rho_u \text{tr}(F_u \rho_{\text{in}})$ 로 표현된다. 여기서 각 출력 밀도 행렬 ρ_u 는 1 차원 투영(projection)이고 측정 연산자 $\{F_u\}$ 는 정보적으로 완전한 양의 값을 갖는 대칭 측정을 형성한다. (SIC-POVM).

[0063]

얽힘 역학은 전역 및 국부 잡음에서 다르게 동작한다. 국부 잡음 하에서의 얽힘 분해는 $\rho^N \rightarrow \rho_2^{N-1} \otimes \rho_1$ 와 같이 얽힌 입력 상태에서 단일 큐비트를 분리하여 단계적으로 얽힘을 저하시킨다. 반대로, 변환의 명백한 형태 $\rho^N \rightarrow \bigotimes_{s=1}^k \rho_s^{N_s}$ 로 전역 잡음의 경우 여러 중간 단계의 얽힘 클러스터링이 형성된다. 파라미터 k 및 N_s 는 출력 상태에서 분리 가능한 분할된 하위 시스템의 수와 해당 특정 분할에 있는 얽힌 입자의 수를 나타낸다.

[0064]

2. 결과

[0065]

본 절에서는 먼저 측정기반 자원가용성의 유효한 수량 자로 수학식 (2)의 다분 얽힘 측정을 설정한다. 그런 다음, 잡음이 있는 진화 하에서 다자 얽힘 구조를 식별하는 수학식 2의 다자 얽힘 측정에 대한 경계를 설정한다. 이와 관련하여, 도 5는 본 발명에 따른 싱글 샷 측정을 위한 양자 Cramer-Rao 경계를 나타낸 것이다. 도 5를 참조하면, 큐비트 수 N의 함수로서 달성 가능한 불확실성 한계 (표준 편차로 특성화)를 나타낸다. 마지막으로, 본 명세서에서는 잡음이 있는 진화 하에서 얽힘 저하에도 불구하고 결합 상호 작용이 중요한 측정기반 자원임을 나타낸다.

[0066]

2.1. 다분 얽힘의 자원가용성 (resourcefulness of multipartite entanglement)

[0067]

수학식 2의 다자 얽힘 측정은 수학식 3과 같은 자원의 기본 계층을 따르는 다자 얽힘 상태에 대한 유효한 측정기반 성능 지수이다.

수학식 3

$$F_Q(\rho) \geq E(\rho)$$

[0068]

[0069]

여기서, $F_Q(\rho)$ 는 선형 Hamiltonian HL과 관련된 모든 국부 일반 스핀 관측 항목에 대한 최대 QFI이다. 이를 위해 먼저 다분 얽힘 측정의 특성을 조사한다. 이러한 quantity는 유효한 얽힘 측정의 세 가지 중요한 속성을 충족하므로 유효한 얽힘 측정이다.

[0070]

1. 모든 분리 가능 상태에 대해 $E(\rho) = 0$, N 큐비트 분리 가능 상태 ρ 에 대해 $I(\rho) \leq N$ 이므로 무시할 수 있다.

[0071]

2. $E(\rho)$ 는 국부 단일 변환에서 변하지 않는다. 이는 그러한 변환에서 왜곡 정보의 불변성에서 비롯된다.

[0072] 3. $E(\rho)$ 는 LOCC(Local Operations and Classic Communication)맵, $\Lambda_{\text{LOCC}}(\rho) = \sum_j K_j \rho K_j^\dagger$ 에서 단일톤(monotone)이다. 여기서 K_j 는 product Kraus 연산자이다. 이러한 속성의 전제 조건은 얽힘 측정의 불복성이다. 스큐 정보는 (순수 상태 분해(decomposition)를 통해 획득된) 상태들의 리전(legion of states)에서 불복하고, 즉 $I(\sum_i p_i \rho_i) \leq \sum_i p_i I(\rho_i)$ with $0 \leq p_i \leq 1, \sum_i p_i = 1$ 이고 함수 $[\circ]^+$ 는 불복성을 유지하므로 다분 얽힘 측정은 불복성 $E\left(\sum_i p_i \rho_i\right) \leq \sum_i p_i E(\rho_i)$ 을 만족한다.

[0073] 스큐 정보는 LOCC에서 평균적으로 비-증가(non-increasing)한다. 얽힘 측정의 불복함과 결합하여 $E(\rho)$ 는 LOCC 맵에서 다음과 같이 비-증가한다.

[0074] 여기서, $\rho_j = \frac{1}{p_j} K_j \rho K_j^\dagger$ and $p_j = \text{tr}(K_j \rho K_j^\dagger)$ 이다.

[0075] 둘째, 다자 얽힘 양자 프로브의 최대화 된 QFI에 대한 하한을 다자 얽힘 측면에서 설정한다. 추정된 모수의 최소 오차는 모든 지역 Hamiltonian에 대해 최대화 된 QFI에 해당한다. 따라서 아래의 수학적 4가 성립한다.

수학적 4

[0076] $2I(\rho) \geq F_Q(\rho) \geq I(\rho)$

[0077] 전술한 다분 얽힘 측정은 수학적 5와 같이 표현될 수 있다.

수학적 5

[0078] $F_Q(\rho) \geq \min_{\{p_i, |\phi_i\rangle\}} \sum_i p_i [I(|\phi_i\rangle\langle\phi_i|) - N]^+$

[0079] 수학적 2의 다분 얽힘 측정은 수학적 6과 같이 최대화된 QFI에 의해 주요하게 표현(majorize)될 수 있다.

수학적 6

[0080] $F_Q(\rho) \geq I(\rho) \geq E(\rho)$

[0081] 또는, 수학적 4로부터 $[F_Q(\rho)/2 - N]^+ \leq E(\rho)$ 가 획득된다. 따라서, N분 (N partite) 얽힘 양자 프로브에 대해 수학적 3이 성립될 수 있다.

[0082] 한편, 도 6은 본 발명에 따른 양자 파라미터에 따른 다분 얽힘 측정 결과를 나타낸다. 도 6을 참조하면, (a) $F_Q(\rho)$ 및 (b) $E(\rho)$ 는 파라미터가 $(N, \alpha) = (3, 1)$ 인 수학적 15의 양자 상태에 대한 (p, β) 의 함수이다.

[0083] 2.2. 얽힘 구조의 정량적 특성 (quantitative characterization of entanglement structure)

[0084] 얽힘(entanglement)은 선형 Hamiltonian 역학에 대한 SQL 이상의 최대 정밀도를 담당한다. 그러나 양자 프로브에 작용하는 잡음은 얽힘 저하를 초래한다. Entanglement dissociation은 전역 잡음과 국부 잡음 모두에서 얽힘 산출성의 개념을 기반으로 다분 얽힘의 보다 일반적인 분류를 제공한다. 다음에서 본 명세서에서는 수학적 2를 확장하여 얽힘 산출성(producibility)을 통합하여 다분 얽힘의 실제 본질을 포착할 뿐만 아니라 측정기반 자원 가용성을 활용한다. 다음 정리는 관련 다분 얽힘 구조의 정량적 식별과 잡음 진화 하에서 자원가용성이 얽힘 얽힘을 제공한다.

[0085] Theorem 1: 잡음 진화를 경험한 N-partite 양자 프로브의 다분 얽힘은 수학적 7과 같다.

수학식 7

$$E(\varepsilon(\rho^N)) \begin{cases} \stackrel{(a_1)}{\leq} (N - nr)^2 - (N - nr^2) \stackrel{(a_2)}{\leq} N(r - 1), \text{ (Global Noise),} \\ \stackrel{(b)}{\leq} r^2 - r, \text{ (Local Noise),} \end{cases}$$

[0086]

[0087] 여기서 r 은 양자 상태 $\varepsilon(\rho^N)$ 이다.

[0088] 전역 잡음의 경우 얽힘 분해 맵의 경우, 생성 가능한 출력 프로브 상태는 도 4(a)에 표시된 것처럼 각각 Ns 얽힌 입자를 갖는 입자 클러스터 k 개의 곱이다. 이러한 출력 상태의 경우, 출력 상태가 r 큐비트의 n GHZ 상태와 $N - nr$ 큐비트의 1 GHZ 상태의 곱인 경우 달성되는 최대 스큐 정보는 $I(\rho_{(r)\text{prod}}) \leq (N - nr)^2 + nr^2 \leq rN$ 과 같다.

[0089] 수학식 2에 대입하면 수학식 7의 (a1)과 (a2)가 $n = N / r$ 에 대해 (a2)의 등식으로 확증된다. 그러나 국부 잡음 하에서 얽힘 분해 맵은 도 4 (b)에 도시된 바와 같이 r 산출성을 갖고 모든 $N - r$ 입자가 제품 형태로 남아있는 단 하나의 클러스터로 출력 프로브 상태를 생성한다. 스큐 정보는 $I(\rho_{(r)\text{prod}}) \leq r^2 + N - r$ 가 된다.

[0090] 수학식 2에 대입하면 수학식 7의 부등식 (b)가 충족된다.

[0091] 따라서 얽힘 저하로 인해 최대 측정기반 정밀도가 감소한다. Theorem 1의 인스턴스는 진정한 다분 얽힘 (genuine multipartite entanglement, GME)을 보유한 양자 프로브이다. 이러한 양자 프로브는 분할할 수 없으며 $E(\rho_{\text{GME}}) > (N - 1)^2 - (N - 1)$ 과 같은 부등식을 통해 감지된다.

[0092] 2.3. 측정기반 자원으로서의 상호 작용 (interactions as a metrological resource)

[0093] 다자 양자 검출에서 비 국부 상호 작용은 H_L 을 넘어서는 정밀 스케일링을 담당한다. 더욱이, 얽힘은 또한 다중 입자 양자 검출에서 입자 간의 제어 된 상호 작용을 실현함으로써 생성될 수 있다. 이후에 본 명세서에서는 양자 프로브와 관련된 측정기반 자원으로서 결합 상호 작용을 분석한다. 이를 위해 N partite 양자 프로브에서 κ partite 상호 작용을 상징하는 상호 작용 Hamiltonian은 선형 Hamiltonian에 선형으로 통합된다. $H_F = \alpha H_L + \beta H_I$ 형식의 전체 Hamiltonian은 수학식 8과 같다.

수학식 8

$$H_F = \alpha \sum_{i=1}^N H_i^{(i)} + \beta \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_\kappa \leq N} H_{\text{int}}^{(i_1, \dots, i_\kappa)}$$

[0094]

[0095] 요약하면, 양자 시스템의 상호 작용은 다음과 같다. $\beta < 0$ 의 경우 강자성 유형 (시스템이 반목되지 않음), $\beta > 0$ 의 경우 반 강자성 유형 (시스템이 반목됨), $\beta = 0$ 인 경우 사라지게 된다. 다음 theorem은 수학식 8에 언급된 해밀턴 역학에 대한 측정기반 정밀도에 대한 달성 가능한 한계를 제공한다.

[0096] Theorem 2: 수학식 8의 해밀턴 역학에 대해 다자 양자 프로브의 상호 작용은 수학식 9와 같은 최대 정밀도를 갖도록 구성될 수 있다.

수학식 9

$$(\delta\theta_F)_{\min} \geq \frac{1}{\left| \frac{2\alpha\kappa!}{N^{\kappa-1}} + 2\beta \right|} \frac{\kappa!}{N^\kappa}.$$

[0097]

[0098] 한편, QFI와 관련하여, 아래의 수학식 10 내지 13을 만족하도록 구성될 수 있다.

수학식 10

$$F_Q(\rho, H_F) \leq 4(\Delta H_F)^2 \leq \|H_F\|^2,$$

수학식 11

$$\|H_F\|^2 \leq (\alpha\|H_L\| + \beta\|H_I\|)^2$$

수학식 12

$$F_Q(\rho) \leq \left(\alpha N \|H_I^{(i)}\|_{\max} + \beta \binom{N}{\kappa} \|H_{int}^{(i_1, \dots, i_\kappa)}\|_{\max} \right)^2$$

수학식 13

$$\frac{N^\kappa}{\kappa^\kappa} \leq \binom{N}{\kappa} \leq \frac{N^\kappa}{\kappa!}.$$

추론 (Corollary) 1: 수학식 6과 수학식 12를 사용하여 수학식 2에 의해 측정된 상호 작용 양자 시스템의 다분 얽힘은 수학식 14와 같이 한정(bound)될 수 있다.

수학식 14

$$E(U_F^\theta(\rho^N)) \leq [(2\alpha N + 2\beta \frac{N^\kappa}{\kappa!})^2 - N]^+$$

여기서, 수학식 9에서 도출된 정밀도 한계와 다른 주목할만한 결과의 비교가 도 3에 나와 있다. 측정기반 정밀도의 증가는 사용된 상호 작용 Hamiltonian의 얽힘 생성 능력에 기인한다. 따라서 위의 정리는 HL의 스케일링을 담당하는 양자 계측을 위한 자원으로서 양자 프로브 간의 상호 작용을 검증한다. 선형 Hamiltonian에 대한 지역적 기여를 포함하여 양자 계측에서 HL을 증가하는 것이 불가능하다는 결과가 그대로 유지된다.

한편, 도 7 및 도 8은 본 발명에 따른 국부적 탈분극(depolarizing) 잡음 파라미터의 함수로서 다분 얽힘 측정 결과를 나타낸다. 도 7을 참조하면, (N, α, p) = (3, 1, 0.9)인 국부적 탈분극(depolarizing) 잡음 파라미터 pg의 함수로 (a) FQ(p) 및 (b) E(p)를 나타낸다. 한편, 도 8을 참조하면, (N, α, p) = (3, 1, 0.9)인 국부적 탈분극(depolarizing) 잡음 파라미터 pl의 함수로 (a) FQ(p) 및 (b) E(p)를 나타낸다.

3. 수치 예제(Numerical example)

본 절에서는 수학식 8로 언급된 전체 해밀턴 역학 하에서 혼합된 삼자 GHZ-W 클래스 양자 상태에 대해 달성 가능한 정밀도를 결정하는 데 상호 작용이 수행하는 역할을 수치적으로 설명한다. 이를 위해 수학식 15와 같은 상태가 고려될 수 있다.

수학식 15

$$\rho = p |\Phi\rangle \langle \Phi| + (1-p) |\Psi\rangle \langle \Psi|, p \in [0, 1]$$

여기서, $|\Phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0^{\otimes 3}\rangle + |1^{\otimes 3}\rangle)$ 및 $|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}(|100\rangle + |010\rangle + |001\rangle)$ 는 각각 GHZ 상태 및 W 상태이다. 파라미터 p

는 혼합물(mixture)에서 순수한 GHZ 및 W 상태의 상대적 함량을 나타낸다. 비대칭 정보의 불복성을 사용함으로써 다분 얽힘 측정은 수학적 16과 같이 계산적으로 저렴한 타이트 하한에 의해 수치적으로 근사된다.

수학적 16

[0111] $[I(\rho) - N]^+ \approx E(\rho)$

[0112] 먼저, 도 6과 같이 반목 및 비 반목 시스템에 대한 다분 얽힘 및 QFI의 동작을 설명한다. QFI의 감소는 상호 작용 유형보다는 양자 상태의 얽힘뿐만 아니라 순도에 의존한다는 것이 분명하다.

[0113] 이제 본 명세서에서는 전역 및 국부 탈분극 잡음 하에서 수학적 15에 언급된 양자 시스템에 대한 잡음에 대해 강력한 측정기반 도구로서 상호 작용을 수치적으로 demist한다. 상태의 잡음 개선(noisy evolution)은 아래의 수학적 17과 같이 표현될 수 있다.

수학적 17

[0114] $\rho \rightarrow \rho' = \varepsilon(\rho_F) = \varepsilon(U_F^\theta \rho U_F^{\theta \dagger})$

[0115] 전역 탈분극 잡음의 경우 결과 상태는 수학적 18과 같이 표현될 수 있다.

수학적 18

[0116] $\rho' = \frac{p_g}{2^N} \mathbf{I} + (1 - p_g) \rho_F, p_g \in [0, 1]$

[0117] 여기서, 파라미터 p_g 는 전역 잡음의 강도이다. 또한, 국부 잡음 하에서 결과 상태의 연산자 합산 표현은 수학적 19와 같다.

수학적 19

[0118] $\rho' = \sum_{u_1 u_2 \dots u_N} K_{u_1 u_2 \dots u_N} \rho_F K_{u_1 u_2 \dots u_N}^\dagger$

[0119] 여기서, $K_{u_1 u_2 \dots u_N} = K_{u_1}^{(1)} \otimes \dots \otimes K_{u_N}^{(N)}$ 는 $\sum_j K_{u_j}^\dagger K_{u_j} = \mathbf{I}$ 와 같은 국부 하위 시스템에서 작동하는 Kraus 연산자를 나타낸다. 예를 들어, 단일 큐비트 탈분극 잡음에 대한 Kraus 연산자는 수학적 20과 같다.

수학적 20

[0120] $K_1 = \sqrt{1 - p_l/3} \mathbf{I}, K_2 = \sqrt{p_l/3} \sigma_x, K_3 = \sqrt{p_l/3} \sigma_y, K_4 = \sqrt{p_l/3} \sigma_z$

[0121] 도 9는 본 발명에 따른 국부 잡음 하에서 얽힘 분해 블록 (EDB)을 순차적으로 적용하여 실현된 얽힘 분해 과정의 개념도를 나타낸다. 도 9를 참조하면, 스칼라 상수 t_1, t_2 및 t_3 는 각각 $N-r, N-r+1$ 및 $N-1$ 이다. 매핑 작업은 N partite 양자 프로브의 얽힘 생성 가능성을 $\rho(N)_{\text{prod}} \rightarrow \rho(N-1)_{\text{prod}} \dots \rightarrow \rho(r)_{\text{prod}} \dots \rightarrow \rho(0)_{\text{prod}}$ 로 변환된다.

[0122] 상호 작용하는 양자 시스템은 도 7 및 도 8에 표시된 것처럼 비 상호 작용 시스템과 비교하여 국부 및 전역 탈분극 잡음에 대해 상대적으로 저항력이 있다. 수학적 (16)의 대략적인 하한은 관련 다중 파트 식별에서 QFI의 효율적인 대안인 것으로 보인다. 얽힘 구조는 잡음 진화를 거쳤다. 그러나 이 경계는 국부 잡음보다 전역 탈분

극 잡음에 더 민감하다.

[0123] 4. 논의

[0124] 본 절에서는 결과의 다양한 측면과 의미에 대해 설명한다.

[0125] 4.1. 얽힘 분해에서의 자원가용성(Resourcefulness under entanglement dissociation)

[0126] 수학적 3에 제시된 계층 구조는 $E(\rho_{(r)\text{prod}}) \leq F_Q(\rho_{(r)\text{prod}})$ 과 같은 얽힘 분해 하에서 확장될 수 있고, 여기서 그러한 다중 상태의 최대 QFI는 $F_Q(\rho_{(r)\text{prod}}) \leq (N - nr)^2 + nr^2 \leq rN$ 과 같이 표현될 수 있다.

[0127] 국부 잡음 하에서 분해 맵을 N-1회 반복하여 도 9와 같이 얽힘 소멸 맵의 출력과 유사한 완전히 분리 가능한 상태를 생성한다. 즉, 얽힘 소멸은 얽힘의 N-1 실현으로 간주할 수 있다.

[0128] 4.2. (α, β) 및 (N, κ) 값의 경우

[0129] $\kappa \ll N$ 에 대한 파라미터 $\alpha \in [0, 1]$ 및 $\beta \in [-1, 1]$ 범위에서 경계점, 변곡점 및 전이선에 대한 최대 QFI의 동작을 논의한다. (α, β) = (0, 0) 교환 관계 $[\phi_i, \phi_j] = 0$ 에 기인하여, QFI는 해당 지점에서 사라지게 된다. (α, β) = (0, ±1) 및 (1, ±1)과 같은 경계점에 대해 반목 및 비-반목 영역과 관계없이 HL을 초과하는 배율을 관찰할 수 있다. Heisenberg 스케일링은 시스템이 선형 Hamiltonian에 의해서만 구동되기 때문에 전이선 (β = 0)에서 나타난다. N이 충분히 큰 경우 정밀도 스케일링은 Hamiltonian 상호 작용에 의해서만 결정된다. 그러나 N에 대한 연결성 κ의 상당한 증가는 커플링 상호 작용을 통해 달성 할 수 있는 다분 얽힘과 함께 측정 기반 이점을 감소시킬 수 있다.

[0130] 4.3. 얽힘 기능

[0131] 얽힌 양자 상태는 비 국부 상호 작용 Hamiltonian을 사용하여 제품 상태에서 생성 될 수 있다. 연관된 단일 진화의 얽힘 능력은 단일 연산자의 얽힘 측면에서 파생된다. 단일 진화의 얽힘 능력은 국부적 해밀턴 HL이 얽힘을 변경할 수 없기 때문에 전체 해밀턴 HF에 관련된 비 국부 상호 작용 해밀턴 HI에 의해 제어될 수 있다. 이 경우, 유효 얽힘 유니터리(effective entangling unitary)는 수학적 21과 같이 표현될 수 있다.

수학적 21

[0132]
$$U_I = \exp\{i\theta' H_I\} = \cos \theta' I_2^{\otimes N} + i \sin \theta' \sigma_z^{\otimes N}$$

[0133] 4.4. 적용 (Application)

[0134] 본 절에서는 상호 작용을 측정기반 리소스로 표현되는 예로서 특정 프로토콜을 논의한다. 프로토콜은 상호 작용 모델이 알려진 경우 차원, 즉 2N의 정확한 추정치를 제공할 수 있다. 수학적 8에서 고려한 상호 작용 모델에 대해 N-partite 큐비트 시스템의 차원 추정 프로토콜을 적용한다. 프로토콜은 함수 $N = f(|G|)$ 으로 주어진 반복 관계에 의존한다. 여기서 |G|는 액세스 가능한 집합의 카디널리티(cardinality)이고 $d|G|/dN > 0$ 이다. 액세스 가능한 집합은 수학적 22와 같은 같은 반복 절차를 통해 파생될 수 있다.

수학적 22

[0135]
$$G_i = G_{i-1} \cup [[G_{i-1}, \Gamma]]$$

[0136] 여기서, $[[G_{i-1}, \Gamma]] \equiv \{O_i | \text{tr}(O_i^\dagger [g, \xi]) \neq 0, g \in G_{i-1}, \xi \in \Gamma\}$ 가 성립하고, 연산자 O_i 는 Pauli 행렬과 Identity 행렬의 텐서 곱이다.

[0137] 이제 앞서 언급한 strategy를 적용하여 수학적 23과 같이 Hamiltonian에 대한 시스템 차원을 결정한다.

수학식 23

$$H_F = \sum_{i=1}^N H_{l,(z)}^{(i)} + \sum_{1 \leq i_1 < i_2 \leq N} H_{l,(x)}^{(i_1)} H_{l,(x)}^{(i_2)},$$

여기서, $H_{l,(z)}^{(i)} = I_2^{\otimes i-1} \otimes \sigma_z^{(i)} \otimes I_2^{\otimes N-i}$ 이다. 수학식 23에 대한 연산자 세트는 수학식 24와 같다.

수학식 24

$$\Gamma = \left\{ H_{l,(z)}^{(1)}, \dots, H_{l,(z)}^{(N)}, H_{l,(x)}^{(1)} H_{l,(x)}^{(2)}, \dots, H_{l,(x)}^{(1)} H_{l,(x)}^{(N)}, H_{l,(x)}^{(2)} H_{l,(x)}^{(3)}, \dots, \right. \\ \left. H_{l,(x)}^{(2)} H_{l,(x)}^{(N)}, \dots, H_{l,(x)}^{(N-1)} H_{l,(x)}^{(N)} \right\},$$

엑세스 가능한 집합은 수학식 25와 같이 표현될 수 있다.

수학식 25

$$G = \left\{ H_{l,(x)}^{(1)}, H_{l,(y)}^{(2)}, H_{l,(z)}^{(1)} H_{l,(x)}^{(2)}, \dots, H_{l,(x)}^{(1)} \dots H_{l,(z)}^{(N-1)} H_{l,(x)}^{(N)}, H_{l,(z)}^{(1)} H_{l,(y)}^{(2)}, \right. \\ \left. \dots, H_{l,(z)}^{(1)} \dots H_{l,(z)}^{(N-1)} H_{l,(y)}^{(N)} \right\},$$

여기서 $|G| = 2^N$ 이다. 반복 관계는 $N = \log_2(|G|)$ 로 평가된다. 따라서 시스템 차원은 간단히 엑세스 가능한 집합의 카디널리티에 의해 $\dim(H) = |G|$ 가 성립한다.

전술한 기술적 특징을 참조하여, 본 발명의 일 실시 예에 따른 다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정 방법을 설명하면 다음과 같다. 이와 관련하여, 도 10a 및 도 10b는 본 발명의 서로 다른 실시 예에 따른 다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정 방법의 흐름도를 나타낸다. 이와 관련하여, 도 10a는 도 2a와 같이 양자 송신 기기인 제1 양자 기기(100) 및 양자 수신 기기인 제2 양자 기기(200)가 아닌 별도의 양자 기기(300)에 의해 수행될 수 있다. 한편, 도 10b는 도 2b와 같이 양자 수신 기기인 제2 양자 기기(200)에 의해 수행될 수 있다.

도 2a, 도 3 내지 도 9 및 도 10a를 참조하면, 다분 얽힘 양자 측정 방법은 양자 기기(300)에 의해 수행될 수 있다. 다분 얽힘 양자 측정 방법은 상태 준비(state preparation) 단계(S110), 얽힘 분해 단계(S120), 측정 단계(S130) 및 추정 단계(S140)를 포함하도록 구성될 수 있다.

상태 준비 단계(S110)에서, 정보를 인코딩하는 제1 양자 기기와 양자 프로브를 이용하여 상호 작용할 수 있는 상태를 구성할 수 있다. 얽힘 분해 단계(S120)에서, 제1 양자 기기가 입력 상태를 인코딩하고, 입력 상태에 잡음이 추가됨에 따른 다분 얽힘 상태로 구성된 입력 상태에 얽힘 분해(entanglement dissociation) 동작을 수행하여 출력 상태가 제공되도록 할 수 있다. 한편, 측정 단계(S130)에서, 얽힘 분해 동작에 따라 제공되는 출력 상태를 측정할 수 있다. 또한, 추정 단계(S140)에서, 측정된 출력 상태에 기반하여 입력 상태를 추정할 수 있다.

얽힘 분해 단계(S120)에서, N개의 입력 상태 중 적어도 하나의 입력 상태는 출력 상태로 변환되어 분해될 수 있다. 도 4(a) 및 도 10a를 참조하면, 얽힘 분해 단계(S120)에서, 입력 상태에 전역 잡음(global noise)이 추가됨에 따라, N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환될 수 있다. 이 경우, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작을 수행할 수 있다. 한편, 도 4(b) 및 도 10a를 참조하면, 얽힘 분해 단계(S120)에서, 입력 상태에 국부 잡음(local noise)이 추가됨에 따라, N개의 입력 상태 중 해당 입력 상태는 출력 상태로 변환되어 얽힘 분해 동작이 수행될 수 있다. 이 경우, N개의 입력 상태 중 나머지 입력 상태는 얽힘 분해 동작 없이 출력 상태로 제공될 수 있다.

추정 단계(S140)에서, 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 상태에 관한 파라미터가 입력 상태로 추정될 수

있다. 추정 단계(S140) 이후, 상기 방법은 추정된 파라미터를 제2 양자 기기로 전달하는 추정 파라미터 전달 단계(S150)를 더 포함할 수 있다. 추정 파라미터 전달 단계(S150)에서 전달된 파라미터를 이용하여 제2 양자 기기가 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 정보를 디코딩할 수 있다.

[0149] 전술한 얽힘 분해 단계(S120) 내지 추정 단계(S140)는 반복적으로 수행될 수 있다. 얽힘 분해 단계(S120)에서 N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태 중 제1 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작을 수행할 수 있다. 한편, 제1 출력 상태가 대응하는 제1 입력 상태에만 연관되면, 반복적으로 수행되는 얽힘 분해 단계에서 제1 입력 파라미터를 제외하고 나머지 입력 파라미터에 대해서만 얽힘 분해 동작을 수행할 수 있다.

[0150] 전술한 바와 같이, 얽힘 분해 단계(S120) 내지 추정 단계(S140)는 반복적으로 수행될 수 있다. 얽힘 분해 단계(S120)에서 N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작에 따라 얽힘 상태가 아닌 독립 출력 상태들을 제외할 수 있다. 이에 따라, 독립 출력 상태들을 제외한 해당 출력 상태들에 대응하는 해당 입력 상태들을 조합하여 서브 입출력 그룹을 형성할 수 있다. 따라서, 반복적으로 수행되는 얽힘 분해 단계에서 얽힘 상태인 서브 입출력 그룹에 대해서만 얽힘 분해 동작을 수행할 수 있다.

[0151] 도 2b, 도 3 내지 도 9 및 도 10b를 참조하면, 다분 얽힘 양자 측정 방법은 양자 수신 기기인 제2 양자 기기(200)에 의해 수행될 수 있다. 다분 얽힘 양자 측정 방법은 제2 양자 기기가 이미 제1 양자 기기와 통신 채널이 형성되어 상태 준비(state preparation) 단계(S110) 없이도 다분 얽힘 양자 측정 방법을 수행할 수도 있다. 다분 얽힘 양자 측정 방법은 얽힘 분해 단계(S220), 측정 단계(S230), 추정 단계(S240) 및 디코딩 단계(250)를 포함하도록 구성될 수 있다.

[0152] 얽힘 분해 단계(S220)에서, 제1 양자 기기가 입력 상태를 인코딩하고, 입력 상태에 잡음이 부가됨에 따른 다분 얽힘 상태로 구성된 입력 상태에 얽힘 분해(entanglement dissociation) 동작을 수행할 수 있다. 한편, 측정 단계(S230)에서, 얽힘 분해 동작에 따라 제공되는 출력 상태를 측정할 수 있다. 또한, 추정 단계(S140)에서, 측정된 출력 상태에 기반하여 입력 상태를 추정할 수 있다.

[0153] 얽힘 분해 단계(S220)에서, N개의 입력 상태 중 적어도 하나의 입력 상태는 출력 상태로 변환되어 분해될 수 있다. 도 4(a) 및 도 10b를 참조하면, 얽힘 분해 단계(S220)에서, 입력 상태에 전역 잡음(global noise)이 부가됨에 따라, N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환될 수 있다. 이 경우, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작을 수행할 수 있다. 한편, 도 4(b) 및 도 10a를 참조하면, 얽힘 분해 단계(S220)에서, 입력 상태에 국부 잡음(local noise)이 부가됨에 따라, N개의 입력 상태 중 해당 입력 상태는 출력 상태로 변환되어 얽힘 분해 동작이 수행될 수 있다. 이 경우, N개의 입력 상태 중 나머지 입력 상태는 얽힘 분해 동작 없이 출력 상태로 제공될 수 있다.

[0154] 추정 단계(S240)에서, 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 상태에 관한 파라미터가 입력 상태로 추정될 수 있다. 추정 단계(S140) 이후에, 상기 방법은 추정된 파라미터를 다른 양자 기기인 제3 양자 기기로 전달하는 추정 파라미터 전달 단계(250b)를 더 포함할 수 있다. 추정 파라미터 전달 단계(250b)에서 전달된 파라미터를 이용하여 제3 양자 기기가 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 정보를 디코딩할 수 있다.

[0155] 전술한 얽힘 분해 단계(S220) 내지 추정 단계(S240)는 반복적으로 수행될 수 있다. 얽힘 분해 단계(S220)에서 N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태 중 제1 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작을 수행할 수 있다. 한편, 제1 출력 상태가 대응하는 제1 입력 상태에만 연관되면, 반복적으로 수행되는 얽힘 분해 단계에서 제1 입력 파라미터를 제외하고 나머지 입력 파라미터에 대해서만 얽힘 분해 동작을 수행할 수 있다.

[0156] 전술한 바와 같이, 얽힘 분해 단계(S220) 내지 추정 단계(S240)는 반복적으로 수행될 수 있다. 얽힘 분해 단계(S220)에서 N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작에 따라 얽힘 상태가 아닌 독립 출력 상태들을 제외할 수 있다. 이에 따라, 독립 출력 상태들을 제외한 해당 출력 상태들에 대응하는 해당 입력 상태들을 조합하여 서브 입출력 그룹을 형성할 수 있다. 따라서, 반복적으로 수행되는 얽힘 분해 단계에서 얽힘 상태인 서브 입출력 그룹에 대해서만 얽힘 분해 동작을 수행할 수 있다.

[0157] 본 발명의 다른 양상에 따른 다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정을 수행하는 양자 기기(300)가 제공될 수 있다. 도 2a, 도 3 내지 도 9 및 도 10a를 참조하면, 양자 기기(300)는 양자 프로브(310) 및 제어부(320)를 포함하도록 구성될 수 있다.

[0158] 양자 프로브(310)는 정보를 인코딩하는 제1 양자 기기의 상태를 검출할 수 있도록 구성될 수 있다. 제어부(320)

0)는 양자 프로브(310)와 동작 가능하게 결합되고, 양자 프로브(310)를 이용하여 제1 양자 기기와 상호 작용할 수 있는 상태를 구성할 수 있다. 제어부(320)는 제1 양자 기기가 입력 상태를 인코딩하고, 입력 상태에 잡음이 부가됨에 따른 다분 얽힘 상태로 구성된 입력 상태에 얽힘 분해(entanglement dissociation) 동작을 수행하여 출력 상태가 제공되도록 제어할 수 있다. 제어부(320)는 얽힘 분해 동작에 따라 제공되는 출력 상태를 측정하고, 측정된 출력 상태에 기반하여 입력 상태를 추정하도록 구성될 수 있다.

[0159] 제어부(320)는 입력 상태에 전역 잡음(global noise)이 부가됨에 따라, N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작을 수행할 수 있다. 제어부(320)는 입력 상태에 국부 잡음(local noise)이 부가됨에 따라, N개의 입력 상태 중 해당 입력 상태를 출력 상태로 변환하여 얽힘 분해 동작을 수행하고, N개의 입력 상태 중 나머지 입력 상태는 얽힘 분해 동작 없이 출력 상태로 제공할 수 있다.

[0160] 한편, 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 상태에 관한 파라미터가 입력 상태로 추정될 수 있다. 이와 관련하여, 제어부(320)는 추정된 파라미터를 제2 양자 기기기로 전달하고, 전달된 파라미터를 이용하여 제2 양자 기기가 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 정보를 디코딩하도록 제2 양자 기기를 제어할 수 있다.

[0161] 한편, 얽힘 분해 동작 내지 입력 상태 추정 동작을 반복적으로 수행하는 제어부(320)는 N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작에 따라 얽힘 상태가 아닌 독립 출력 상태들을 제외할 수 있다. 제어부(320)는 독립 출력 상태들을 제외한 해당 출력 상태들에 대응하는 해당 입력 상태들을 조합하여 서브 입출력 그룹을 형성할 수 있다. 제어부(320)는 반복적으로 수행되는 얽힘 분해 단계에서 얽힘 상태인 서브 입출력 그룹에 대해서만 얽힘 분해 동작을 수행할 수 있다.

[0162] 본 발명의 다른 양상에 따른 다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정을 수행하는 양자 기기(300)가 제공될 수 있다. 도 2b, 도 3 내지 도 9 및 도 10b를 참조하면, 양자 기기(200)는 송수신부(210) 및 제어부(220)를 포함하도록 구성될 수 있다.

[0163] 송수신부(210)는 양자 정보를 수신하도록 구성될 수 있다. 제어부(220)는 송수신부(210)와 동작 가능하게 결합되고, 제1 양자 기기가 입력 상태를 인코딩하고, 입력 상태에 잡음이 부가됨에 따른 다분 얽힘 상태로 구성된 입력 상태에 얽힘 분해(entanglement dissociation) 동작을 수행할 수 있다. 제어부(220)는 얽힘 분해 동작에 따라 제공되는 출력 상태를 측정하고, 측정된 출력 상태에 기반하여 입력 상태를 추정하고, 추정된 입력 상태에 관한 파라미터를 이용하여 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 정보를 디코딩하도록 구성될 수 있다.

[0164] 제어부(220)는 입력 상태에 전역 잡음(global noise)이 부가됨에 따라, N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작을 수행할 수 있다. 제어부(220)는 입력 상태에 국부 잡음(local noise)이 부가됨에 따라, N개의 입력 상태 중 해당 입력 상태를 출력 상태로 변환하여 얽힘 분해 동작을 수행하고, N개의 입력 상태 중 나머지 입력 상태는 얽힘 분해 동작 없이 출력 상태로 제공할 수 있다.

[0165] 한편, 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 상태에 관한 파라미터가 입력 상태로 추정될 수 있다. 이와 관련하여, 제어부(320)는 추정된 파라미터를 다른 양자 기기인 제3 양자 기기기로 전달하고, 전달된 파라미터를 이용하여 제3 양자 기기가 제1 양자 기기로부터 전달되는 양자 정보를 디코딩하도록 제3 양자 기기를 제어할 수 있다.

[0166] 한편, 얽힘 분해 동작 내지 입력 상태 추정 동작을 반복적으로 수행하는 제어부(220)는 N개의 입력 상태를 K개의 출력 상태로 변환하고, 변환된 K개의 출력 상태에 대한 얽힘 분해 동작에 따라 얽힘 상태가 아닌 독립 출력 상태들을 제외할 수 있다. 제어부(320)는 독립 출력 상태들을 제외한 해당 출력 상태들에 대응하는 해당 입력 상태들을 조합하여 서브 입출력 그룹을 형성할 수 있다. 제어부(320)는 반복적으로 수행되는 얽힘 분해 단계에서 얽힘 상태인 서브 입출력 그룹에 대해서만 얽힘 분해 동작을 수행할 수 있다.

[0167] 본 발명에서는 다중 입자 얽힘의 본질적인 이상 현상에 의해 다중 입자 양자 프로브의 측정기반 성능에 부과된 제약을 해결했다. 본 발명에서는 계측에 대한 양자 프로브의 유용성이 선형 해밀턴 역학하에서 얽힘 산출성과 같은 다분 얽힘 속성과 관련이 있음을 보여주었다. 조사된 측정기반 성능 지수는 잡음이 있는 진화에서 다자 양자 시스템의 관련 얽힘 구조를 정량적으로 감지하도록 확장되었다.

[0168] 본 발명에서는 또한 상호 작용하는 양자 프로브는 잡음이 있는 진화에서 측정기반 중요성 측면에서 상호 작용하지 않는 양자 프로브보다 성능이 뛰어나다. 그러나 얽힘을 방해하는 결합 상호 작용은 비선형 양자 계측에서 중요하지 않다. 본 발명은 실제 양자 계측의 자원 분석을 위한 양자 정보 이론적 측정의 적용 가능성을 강조한다.

[0169] 이상에서는 본 발명에 따른 양자 다수-바디 효과 하에서 측정기반 다분 얽힘 측정 방법 및 이를 수행하는 양자

기기에 대해 설명하였다. 이러한 양자 다수-바다 효과 하에서 측정기반 다분 얽힘 측정 방법 및 이를 수행하는 양자 기기의 기술적 효과는 다음과 같다.

[0170] 본 발명에 따르면, 다분 얽힘(multipartite entanglement) 양자 측정 방법에서 측정기반 정밀도를 향상시킬 수 있다..

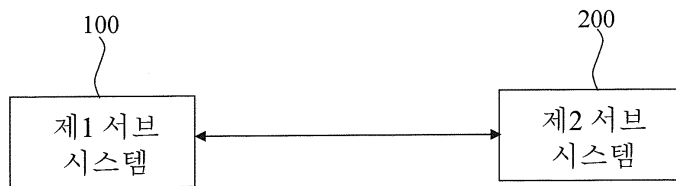
[0171] 또한, 본 발명에 따르면, 다분 얽힘 구조에서 측정기반 정밀도를 향상하면서도 양자 시스템에 미치는 영향을 최소화할 수 있다.

[0172] 또한, 본 발명에 따르면, 양자 다수-바다 효과 하에서 측정기반 다분 얽힘 측정 방법의 측정기반 정밀도를 향상시키면서도 양자 시스템에 미치는 영향을 최소화할 수 있다.

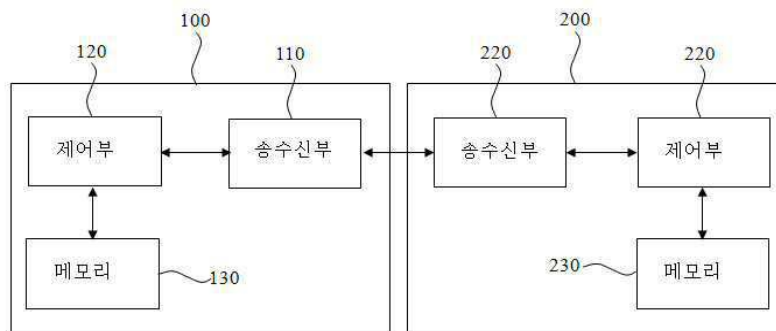
[0173] 소프트웨어적인 구현에 의하면, 본 명세서에서 설명되는 절차 및 기능뿐만 아니라 각각의 구성 요소들은 별도의 소프트웨어 모듈로도 구현될 수 있다. 상기 소프트웨어 모듈들 각각은 본 명세서에서 설명되는 하나 이상의 기능 및 작동을 수행할 수 있다. 적절한 프로그램 언어로 쓰여진 소프트웨어 어플리케이션으로 소프트웨어 코드가 구현될 수 있다. 상기 소프트웨어 코드는 메모리에 저장되고, 제어부(controller) 또는 제어부(processor)에 의해 실행될 수 있다.

도면

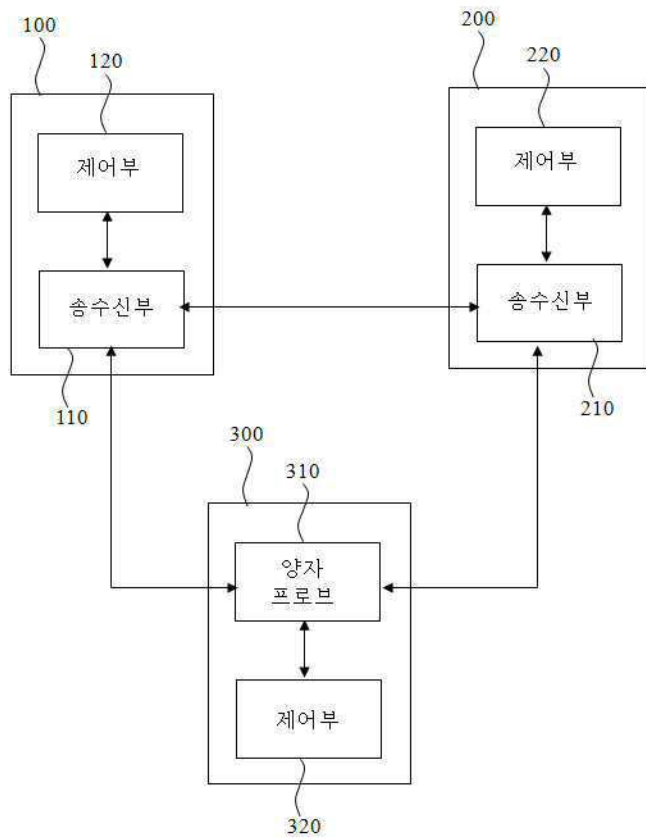
도면1a



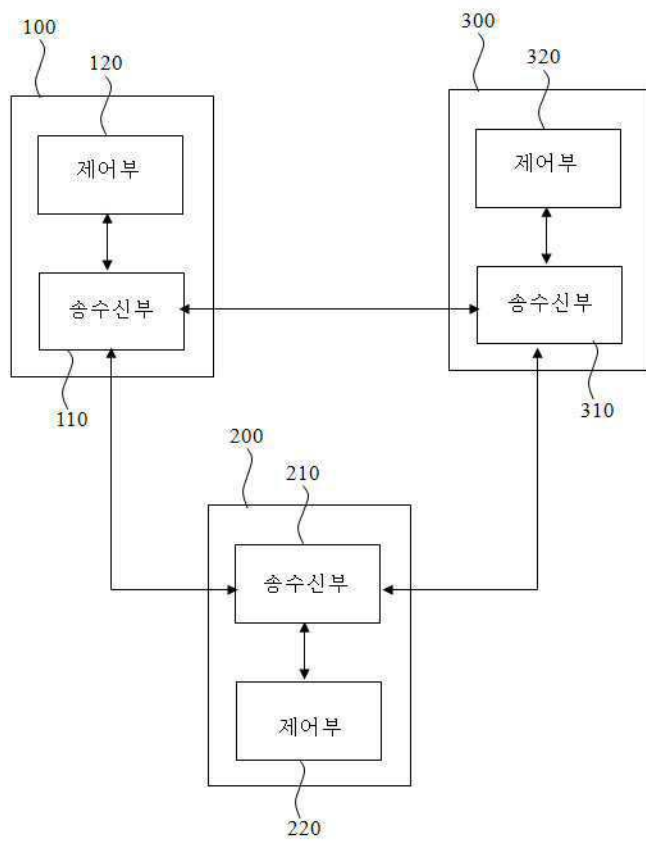
도면1b



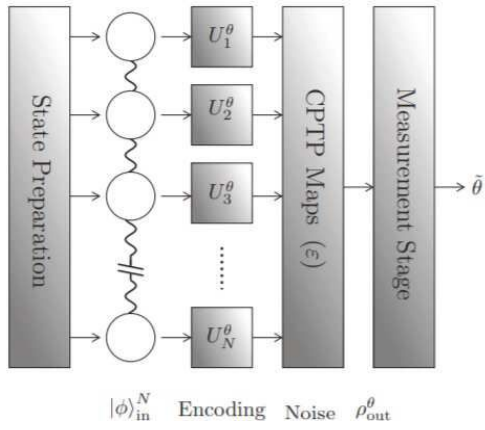
도면2a



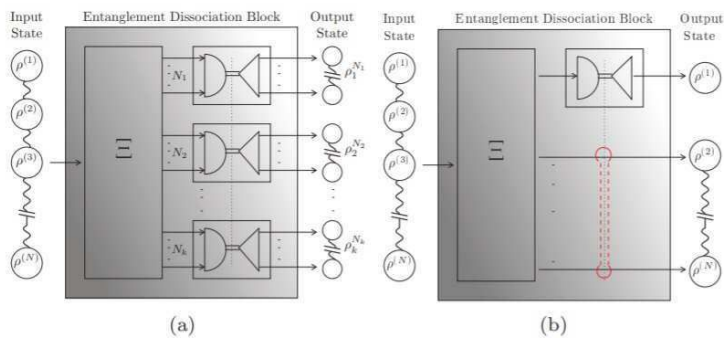
도면2b



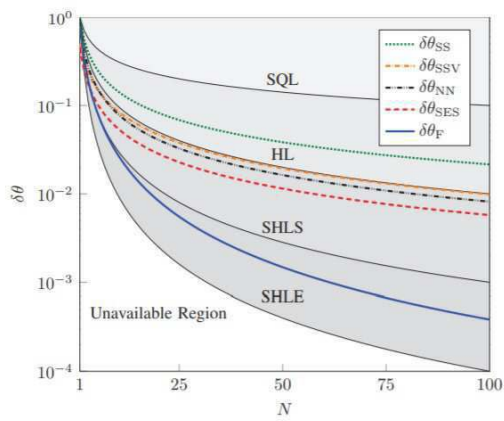
도면3



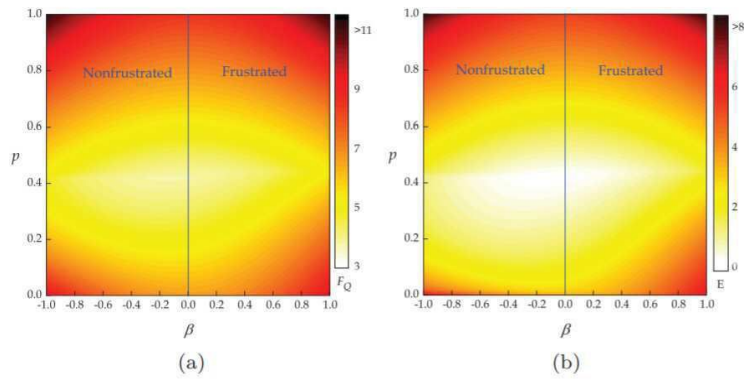
도면4



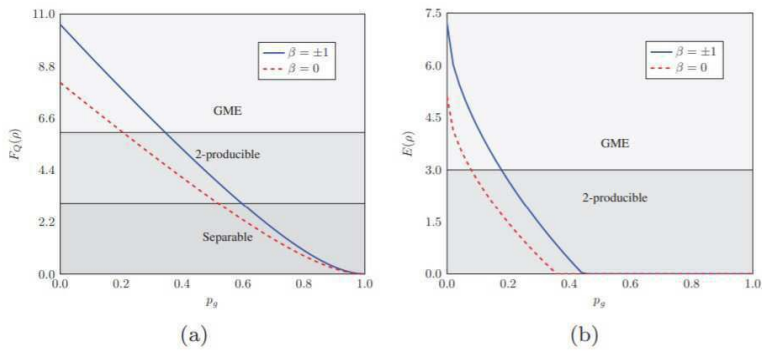
도면5



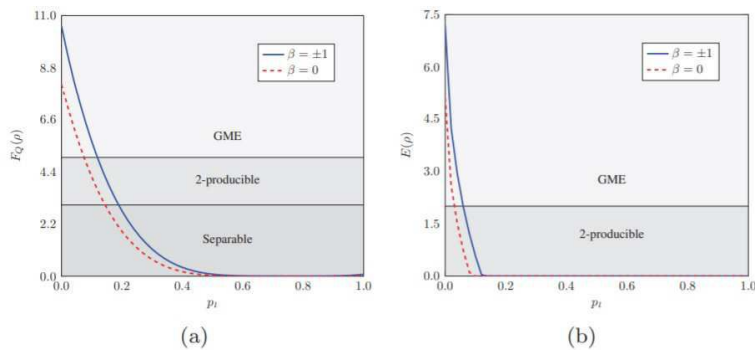
도면6



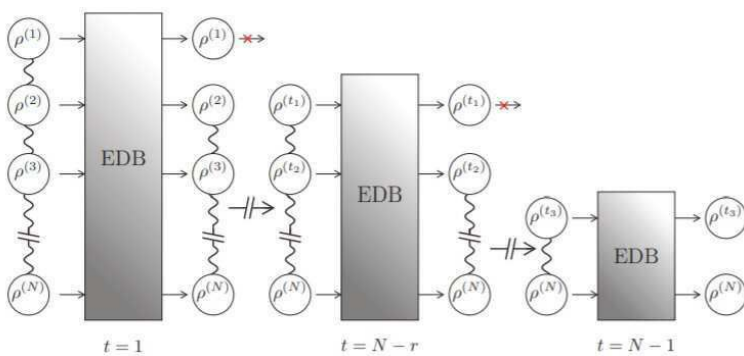
도면7



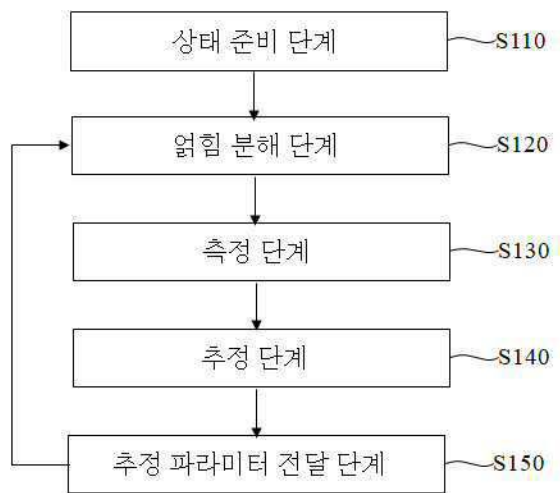
도면8



도면9



도면10a



도면10b

