(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2019-0112458
(43) 공개일자 2019년10월07일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06N 99/00 (2019.01) *B82Y 10/00* (2017.01)
(52) CPC특허분류
G06N 10/00 (2019.01)
B82Y 10/00 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2018-0034474
(22) 출원일자 2018년03월26일
심사청구일자 2018년03월26일

(71) 출원인
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(72) 발명자
신현동
경기도 수원시 영통구 청명로 132, 323동 501호(영통동, 벽산삼익아파트)
정영민
경기도 성남시 분당구 양현로 507, 313동 305호(야탑동, 매화마을주공3단지아파트)
파쿼 아마드
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732, 경희대학교 국제캠퍼스 전자정보관559호
(74) 대리인
김홍석

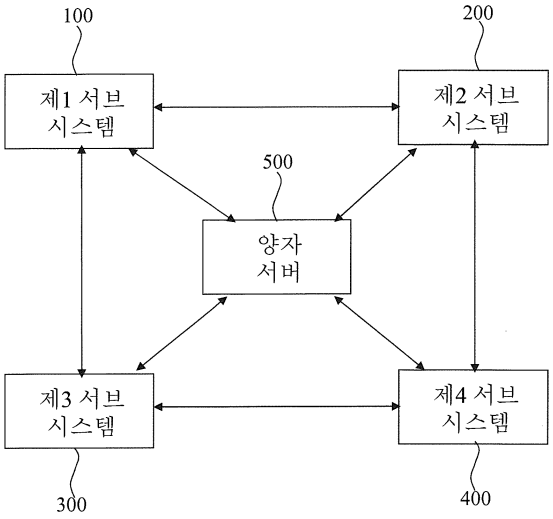
전체 청구항 수 : 총 20 항

(54) 발명의 명칭 **양자 불일치를 이용한 다분 양자얽힘상태 구분 방법 및 이를 수행하는 양자 시스템**

(57) 요 약

본 발명에 따른 양자 불일치(discord)를 이용한 다분 양자얽힘상태 구분 방법은, 이분 양자 상태 (bipartite quantum state)에서 양자 불일치, 양자 얽힘, 또는 양자 엔트로피 중 적어도 하나를 획득하는 양자 상태 정보 획득 과정; 상기 획득된 양자 불일치, 양자 얽힘(entanglement), 또는 양자 엔트로피(entropy) 중 적어도 하나에 기반하여 양자 상관 인자가 포지티브(positive) 값인지를 판단하는 양자 상관 인자 판단 과정; 및 상기 판단된 양자 상관 인자에 기반하여, 다분 양자 시스템을 이분 양자 시스템으로 구분(classify)하는 양자 시스템 구분 과정을 포함하고, 양자 상태의 양자 상관 특성을 이용하여, 높은 차원의 다분 시스템을 낮은 차원의 다분 시스템으로 구분/변환을 제공할 수 있다.

대 표 도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 R0190-15-2030
부처명 미래과학창조부
연구관리전문기관 정보통신기술진흥센터
연구사업명 정보통신방송연구개발사업
연구과제명 양자암호통신망 구축을 통한 신뢰성 검증기술 및 QKD 고도화를 위한 핵심 요소기술 개발
기 여 율 1/2
주관기관 경희대학교 산학협력단
연구기간 2017.07.01 ~ 2018.02.28
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 2016R1A2B2014462
부처명 미래과학창조부
연구관리전문기관 한국연구재단
연구사업명 개인연구지원사업(중견연구)
연구과제명 양자 초얽힘을 이용한 하이브리드 양자통신 핵심기술 연구
기 여 율 1/2
주관기관 경희대학교 산학협력단
연구기간 2017.06.01 ~ 2018.05.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

양자 불일치(discord)를 이용한 다분 양자얽힘상태 구분 방법에 있어서,

이분 양자 상태 (bipartite quantum state)에서 양자 불일치, 양자 얽힘, 또는 양자 엔트로피 중 적어도 하나를 획득하는 양자 상태 정보 획득 과정;

상기 획득된 양자 불일치, 양자 얽힘(entanglement), 또는 양자 엔트로피(entropy) 중 적어도 하나에 기반하여 양자 상관 인자가 포지티브(positive) 값인지를 판단하는 양자 상관 인자 판단 과정; 및

상기 판단된 양자 상관 인자에 기반하여, 다분 양자 시스템을 이분 양자 시스템으로 구분(classify)하는 양자 시스템 구분 과정을 포함하는, 다분 양자얽힘상태 구분 방법.

청구항 2

제1 항에 있어서,

상기 양자 상관 인자(T1)는

$$E^2(\rho_{A_1|A_2\ldots A_n})-E^2(\rho_{A_1A_2})-E^2(\rho_{A_1A_3})-\ldots-E^2(\rho_{A_1A_n})$$

로 주어지고,

E(·)는 상기 양자 얽힘이고, $\rho_{A1|A2,\ \ldots,\ An}$은 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ \ldots,\ An}\rangle$에 대하여 A2, A3, ..., An 상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태이고, ρ_{A1An}은 A1과 An의 상호 정보와 연관된 상태인 것을 특징으로 하는, 다분 양자얽힘상태 구분 방법.

청구항 3

제1 항에 있어서,

상기 양자 상관 인자(T2')는

$$\sum_{i=2}^{n}(-S(\rho_{A_1|A_i}))(-E(\rho_{A_1|A_j})-D(\rho_{A_1|A_i}))$$

로 주어지고,

S(·)는 상기 양자 엔트로피이고, E(·)는 상기 양자 얽힘이고, D(·)는 상기 양자 불일치이고,

$\rho_{A1|Ai}$는 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ \ldots,\ An}\rangle$에 대하여 Ai상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태인 것을 특징으로 하는, 다분 양자얽힘상태 구분 방법.

청구항 4

제1 항에 있어서,

상기 다분 양자얽힘상태 Ψ가 삼분(tripartite) 상태의 2파라미터를 갖는

$$|\psi(p,\epsilon)\rangle=\sqrt{p\epsilon}\,|000\rangle+\sqrt{p(1-\epsilon)}\,|111\rangle+\sqrt{(1-p)/2}\,(|101\rangle+|110\rangle)$$

인 경우,

상기 양자 상관 인자 판단 과정은,

$\mathcal{D}(\rho_{A|BC}) - \frac{1}{2}(\mathcal{D}(\rho_{A|B}) + \mathcal{D}(\rho_{A|C}))$ 에 의해 상기 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단하는 것을 특징으로 하는, 다분 양자얽힘상태 구분 방법.

청구항 5

제1 항에 있어서,

상기 다분 양자얽힘상태 Ψ가 삼분(tripartite) 상태의 일반화된 W 상태로

$|\psi_w\rangle = \sin\theta\cos\phi|011\rangle + \sin\theta\sin\phi|101\rangle + \cos\theta|110\rangle$ 인 경우,

상기 양자 상관 인자 판단 과정은,

$\mathcal{D}(\rho_{A|BC}) - \mathcal{D}(\rho_{A|B}) - \mathcal{D}(\rho_{A|C})$ 에 의해 상기 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단하는 것을 특징으로 하는, 다분 양자얽힘상태 구분 방법.

청구항 6

제1 항 내지 제5 항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 양자 상관 인자 판단 과정에서,

상기 양자 상관 인자 T1 또는 T2'가 포지티브 값을 갖는 것으로 판단되며, 상기 양자 불일치가 모노가미 조건을 만족하는 것으로 판단하고,

상기 구분된 이분 양자 시스템에서 양자 암호화, 또는 양자 통신 중 적어도 하나를 수행하는 양자 암호화/양자 통신 수행 과정을 더 포함하는 것을 특징으로 하는, 다분 양자얽힘상태 구분 방법.

청구항 7

양자 불일치(discord)를 이용한 다분 양자얽힘상태 구분 방법에 있어서,

이분 양자 상태 (bipartite quantum state)에서 양자 엔트로피(S)에 기반하여 양자 불일치(D)를 획득하는 양자 상태 정보 획득 과정;

상기 획득된 양자 불일치에 기반하여 양자 상관 인자가 포지티브(positive) 값인지를 판단하는 양자 상관 인자 판단 과정; 및

상기 판단된 양자 상관 인자에 기반하여, 양자 얽힘(entanglement)을 갖는 다분 양자 시스템을 이분 양자 시스템으로 구분(classify)하는 양자 시스템 구분 과정을 포함하는, 다분 양자얽힘상태 구분 방법.

청구항 8

제7 항에 있어서,

상기 양자 상관 인자(T1)는

$E^2(\rho_{A_1|A_2\ldots A_n}) - E^2(\rho_{A_1A_2}) - E^2(\rho_{A_1A_3}) - \ldots - E^2(\rho_{A_1A_n})$ 로 주어지고,

$E(\cdot)$는 상기 양자 얽힘이고, $\rho_{A1|A2,\ ..,\ An}$은 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ ..,\ An}\rangle$에 대하여 A2, A3, ..., An 상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태이고, ρ_{A1An}은 A1과 An의 상호 정보와 연관된 상태인 것을 특징으로 하는, 다분 양자얽힘상태 구분 방법.

청구항 9

제7 항에 있어서,

상기 양자 상관 인자(T2)는

$$\sum_{i=2}^{n}(-S(\rho_{A_1|A_i}))(-E(\rho_{A_1|A_j})-D(\rho_{A_1|A_i}))$$

로 주어지고,

S(·)는 상기 양자 엔트로피이고, E(·)는 상기 양자 얽힘이고, D(·)는 상기 양자 불일치이고,

$\rho_{A1|Ai}$는 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ ...,\ An}>$에 대하여 Ai상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태인 것을 특징으로 하는, 다분 양자얽힘상태 구분 방법.

청구항 10

제7 항에 있어서,

상기 다분 양자얽힘상태 Ψ가 삼분(tripartite) 상태의 2파라미터를 갖는

$$|\psi(p,\epsilon)\rangle=\sqrt{p\epsilon}\,|000\rangle+\sqrt{p(1-\epsilon)}\,|111\rangle+\sqrt{(1-p)/2}\,(|101\rangle+|110\rangle)$$

인 경우,

상기 양자 상관 인자 판단 과정은,

$\mathcal{D}(\rho_{A|BC})-\frac{1}{2}(\mathcal{D}(\rho_{A|B})+\mathcal{D}(\rho_{A|C}))$ 에 의해 상기 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단하고,

상기 다분 양자얽힘상태 Ψ가 삼분(tripartite) 상태의 일반화된 W 상태로

$$|\psi_w\rangle=\sin\theta\cos\phi\,|011\rangle+\sin\theta\sin\phi\,|101\rangle+\cos\theta\,|110\rangle$$

인 경우,

상기 양자 상관 인자 판단 과정은,

$\mathcal{D}(\rho_{A|BC})-\mathcal{D}(\rho_{A|B})-\mathcal{D}(\rho_{A|C})$ 에 의해 상기 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단하는 것을 특징으로 하는, 다분 양자얽힘상태 구분 방법.

청구항 11

제7 항에 있어서,

상기 양자 엔트로피(S)는 조건부 비측정(unmeasured) 엔트로피 $S(\rho_{A|B})$ 및 측정된 조건부 엔트로피 $\tilde{S}(\rho_{A|B})$ 를 포함하고,

상기 양자 불일치(D)는 상기 측정된 조건부 엔트로피 $\tilde{S}(\rho_{A|B})$ 와 상기 조건부 비측정 엔트로피 $S(\rho_{A|B})$ 를 이용하여 $\mathcal{D}(\rho_{AB})=\tilde{S}(\rho_{A|B})-S(\rho_{A|B})$ 와 같이 표현되는 것을 특징으로 하는, 다분 양자얽힘상태 구분 방법.

청구항 12

양자 불일치(discord)를 이용한 다분 양자얽힘상태를 구분하는 양자 시스템에 있어서,

다수의 양자 서브 시스템으로부터 양자 상태(ρ)를 수신하는 인터페이스부; 및

상기 양자 상태를 이용하여 양자 불일치, 양자 얽힘, 또는 양자 엔트로피 중 적어도 하나를 획득하고, 상기 획득된 양자 불일치, 양자 얽힘(entanglement), 또는 양자 엔트로피(entropy) 중 적어도 하나에 기반하여 양자 상

관 인자가 포지티브(positive) 값인지를 판단하고, 상기 판단된 양자 상관 인자에 기반하여, 다분 양자 시스템을 이분 양자 시스템으로 구분(classify)하는 제어부를 포함하는, 양자 시스템.

청구항 13

제12항에 있어서,

상기 양자 상관 인자(T1)는

$$E^2(\rho_{A_1|A_2\ldots A_n})-E^2(\rho_{A_1A_2})-E^2(\rho_{A_1A_3})-\ldots-E^2(\rho_{A_1A_n})$$ 로 주어지고,

E(·)는 상기 양자 얽힘이고, $\rho_{A1|A2,\ ..,\ An}$은 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ ..,\ An}>$에 대하여 A2, A3, ..., An 상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태이고, ρ_{A1An}은 A1과 An의 상호 정보와 연관된 상태인 것을 특징으로 하는, 양자 시스템.

청구항 14

제12 항에 있어서,

상기 양자 상관 인자(T2)는

$$\sum_{i=2}^{n}(-S(\rho_{A_1|A_i}))(-E(\rho_{A_1|A_j})-D(\rho_{A_1|A_i}))$$ 로 주어지고,

S(·)는 상기 양자 엔트로피이고, E(·)는 상기 양자 얽힘이고, D(·)는 상기 양자 불일치이고,

$\rho_{A1|Ai}$는 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ ..,\ An}>$에 대하여 Ai상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태인 것을 특징으로 하는, 양자 시스템.

청구항 15

제12 항에 있어서,

상기 다분 양자얽힘상태 Ψ가 삼분(tripartite) 상태의 2파라미터를 갖는

$$|\psi(p,\epsilon)\rangle=\sqrt{p\epsilon}\,|000\rangle+\sqrt{p(1-\epsilon)}\,|111\rangle+\sqrt{(1-p)/2}\,(|101\rangle+|110\rangle)$$ 인 경우,

상기 제어부는,

$\mathcal{D}(\rho_{A|BC})-\frac{1}{2}(\mathcal{D}(\rho_{A|B})+\mathcal{D}(\rho_{A|C}))$ 에 의해 상기 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단하고,

상기 다분 양자얽힘상태 Ψ가 삼분(tripartite) 상태의 일반화된 W 상태로

$$|\psi_w\rangle=\sin\theta\cos\phi\,|011\rangle+\sin\theta\sin\phi\,|101\rangle+\cos\theta\,|110\rangle$$ 인 경우,

상기 제어부는,

$\mathcal{D}(\rho_{A|BC})-\mathcal{D}(\rho_{A|B})-\mathcal{D}(\rho_{A|C})$ 에 의해 상기 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단하는 것을 특징으로 하는, 양자 시스템.

청구항 16

양자 불일치(discord)를 이용한 다분 양자얽힘상태를 구분하는 양자 시스템에 있어서,

다수의 양자 서브 시스템으로부터 양자 상태(ρ)를 수신하는 인터페이스부; 및

상기 양자 상태를 이용하여 양자 엔트로피(S)에 기반한 양자 불일치(D)를 획득하고, 상기 획득된 양자 불일치에 기반하여 양자 상관 인자가 포지티브(positive) 값인지를 판단하고, 상기 판단된 양자 상관 인자에 기반하여, 다분 양자 시스템을 이분 양자 시스템으로 구분(classify)하는 제어부를 포함하는, 양자 시스템.

청구항 17

제16 항에 있어서,

상기 양자 상관 인자(T1)는

$$E^2(\rho_{A_1|A_2\ldots A_n})-E^2(\rho_{A_1A_2})-E^2(\rho_{A_1A_3})-\ldots-E^2(\rho_{A_1A_n})$$

로 주어지고,

E(·)는 상기 양자 얽힘이고, $\rho_{A1|A2,\ ..,\ An}$은 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ ..,\ An}>$에 대하여 A2, A3, ..., An 상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태이고, ρ_{A1An}은 A1과 An의 상호 정보와 연관된 상태인 것을 특징으로 하는, 양자 시스템.

청구항 18

제16 항에 있어서,

상기 양자 상관 인자(T2)는

$$\sum_{i=2}^{n}(-S(\rho_{A_1|A_i}))(-E(\rho_{A_1|A_j})-D(\rho_{A_1|A_i}))$$

로 주어지고,

S(·)는 상기 양자 엔트로피이고, E(·)는 상기 양자 얽힘이고, D(·)는 상기 양자 불일치이고,

$\rho_{A1|Ai}$는 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ ..,\ An}>$에 대하여 Ai상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태인 것을 특징으로 하는, 양자 시스템.

청구항 19

제12 항에 있어서,

상기 다분 양자얽힘상태 Ψ가 삼분(tripartite) 상태의 2파라미터를 갖는

$$|\psi(p,\epsilon)\rangle=\sqrt{p\epsilon}\,|000\rangle+\sqrt{p(1-\epsilon)}\,|111\rangle+\sqrt{(1-p)/2}\,(|101\rangle+|110\rangle)$$

인 경우,

상기 제어부는,

$$\mathcal{D}(\rho_{A|BC})-\tfrac{1}{2}(\mathcal{D}(\rho_{A|B})+\mathcal{D}(\rho_{A|C}))$$

에 의해 상기 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단하고,

상기 다분 양자얽힘상태 Ψ가 삼분(tripartite) 상태의 일반화된 W 상태로

$$|\psi_w\rangle=\sin\theta\cos\phi\,|011\rangle+\sin\theta\sin\phi\,|101\rangle+\cos\theta\,|110\rangle$$

인 경우,

상기 제어부는,

$$\mathcal{D}(\rho_{A|BC})-\mathcal{D}(\rho_{A|B})-\mathcal{D}(\rho_{A|C})$$

에 의해 상기 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단하는 것을 특징으로 하는, 양자 시스템.

청구항 20

제16 항에 있어서,

상기 양자 엔트로피(S)는 조건부 비측정(unmeasured) 엔트로피 $S(\rho_{A|B})$ 및 측정된 조건부 엔트로피 $\tilde{S}(\rho_{A|B})$ 를 포함하고,

상기 제어부는,

상기 측정된 조건부 엔트로피 $\tilde{S}(\rho_{A|B})$ 와 상기 조건부 비측정 엔트로피 $S(\rho_{A|B})$ 를 이용하여 상기 양자 불일치 $\mathcal{D}(\rho_{AB}) = \tilde{S}(\rho_{A|B}) - S(\rho_{A|B})$ 를 획득하는 것을 특징으로 하는, 양자 시스템.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 다분 양자얽힘상태 구분 방법 및 양자 시스템에 관한 것이다. 보다 상세하게는, 양자 네트워크에서 양자 불일치를 이용한 다분 양자얽힘상태 구분 방법 및 이를 수행하는 양자 시스템에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 양자 상관(quantum correlation)은 양자 정보 과학의 다양한 잠재적인 응용을 위한 중요한 자원이다. 가장 널리 활용되는 양자 상관은 양자 얽힘(quantum entanglement)이고, 이는 양자 키 양자 기법 등에 활용될 수 있다. 또한, 이분 양자 상태에 대해 양자 상호 정보 및 일반 상관 시에 차이로서 정의되는 일반 개념의 양자 상관으로서 양자 불일치(quantum discord)가 도입되었다.

[0003] 한편, 양자 상관과 달리, 양자 불일치는 특정한 분리 가능한 혼합 상태에 대해서도 비 제로 값을 가질 수 있기 때문에 양자 얽힘 개념을 넘어 다양한 양자 정보 처리 분야에 응용될 수 있다.

[0004] 하지만, 이러한 양자 상태와 관련된 양자 비-국부성(non-localities)은 환경과의 상호 작용에 쉽게 취약해질 수 있다는 문제점이 있다. 즉, 양자 잡음 또는 비-상관(decoherence)에 의해 양자 비-국부성은 쉽게 취약해질 수 있다는 문제점이 있다. 따라서, 양자 통신 및 보안에 있어서, 시간에 따른 양자 채널의 정확한 추정이 요구된다.

[0005] 양자 얽힘(quantum entanglement)은 양자 정보, 양자 키 분배, 고집적 압축 및 양자 트랜스포테이션 등과 같은 다양한 응용에서 활용 가능하다. 양자 얽힘 중 중요한 특징 중 하나는 두 개의 대상이 상호 간에 얽혀 있는 경우 이의 모노가미 행동(monogamy behavior)에 있다. 이들의 제3 대상과의 상관은 제1 및 제2 대상과의 얽힘 량에 의해 한정될 수 있다. 이와 관련하여, 상이한 측정치의 얽힘에 대한 모노가미에 대한 연구가 이루어졌다.

[0006] 초기에는, 양자 시스템이 얽힘 현상으로 인해 고전 시스템(classical system)에 비해 이점을 갖고, 단지 비-국부성(non-locality)은 얽힘 현상으로 인한 것으로 여겨졌다. 하지만, 최근에는, 얽힘 상태가 없는 경우에도 양자 상관 현상이 관측되고 있다. 이러한 양자 상관은 불일치(discord)에 해당한다. 양자 불일치는 국부적으로 액세스 가능하지 않은 양자 상관이다. 고전 시스템에 비해 얽힘 상태 대신에 단지 분리-가능한(separable) 상태를 이용하면 정확성에서 큰 차이가 나타난다는 문제점이 있다.

[0007] 이후에, 양자 분배, 양자 통신 프로토콜 및 양자 정보 처리의 다양한 응용들에서 양자 불일치에 대하여 연구가 이루어지고 있다. 초기에 제시된 양자 불일치는 양자 불일치를 따르지는 않지만, 순수 3분 기하 양자 불일치(pure tri-partite geometry quantum discord), 글로벌 양자 불일치 및 순수 상태에 대한 초기 양자 불일치와 같이 상이한 방식의 표현을 갖는다는 문제점이 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 따라서, 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는, 양자 불일치를 이용한 다분 양자얽힘상태 구분 방법을 제공하는 것을 목표로 한다.

[0009] 또한, 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는, 높은 차원의 다분 시스템을 낮은 차원의 다분 시스템으로 구분/변환하는 방법을 제공하는 것을 목표로 한다.

과제의 해결 수단

[0010] 본 발명의 일 양상에 따른 양자 불일치(discord)를 이용한 다분 양자얽힘상태 구분 방법은, 이분 양자 상태(bipartite quantum state)에서 양자 불일치, 양자 얽힘, 또는 양자 엔트로피 중 적어도 하나를 획득하는 양자 상태 정보 획득 과정; 상기 획득된 양자 불일치, 양자 얽힘(entanglement), 또는 양자 엔트로피(entropy) 중 적어도 하나에 기반하여 양자 상관 인자가 포지티브(positive) 값인지를 판단하는 양자 상관 인자 판단 과정; 및 상기 판단된 양자 상관 인자에 기반하여, 다분 양자 시스템을 이분 양자 시스템으로 구분(classify)하는 양자 시스템 구분 과정을 포함하고, 양자 상태의 양자 상관 특성을 이용하여, 높은 차원의 다분 시스템을 낮은 차원의 다분 시스템으로 구분/변환을 제공할 수 있다.

[0011] 일 실시 예에 따르면, 상기 양자 상관 인자(T1)는 $E^2(\rho_{A_1|A_2\ldots A_n})-E^2(\rho_{A_1A_2})-E^2(\rho_{A_1A_3})-\ldots-E^2(\rho_{A_1A_n})$ 로 주어지고, E(·)는 상기 양자 얽힘이고, $\rho_{A1|A2,\ \ldots,\ An}$은 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ \ldots,\ An}\rangle$에 대하여 A2, A3, ..., An 상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태이고, ρ_{A1An}은 A1과 An의 상호 정보와 연관된 상태일 수 있다.

[0012] 일 실시 예에 따르면, 상기 양자 상관 인자(T2')는 $\sum_{i=2}^{n}(-S(\rho_{A_1|A_i}))(-E(\rho_{A_1|A_j})-D(\rho_{A_1|A_i}))$ 로 주어지고, S(·)는 상기 양자 엔트로피이고, E(·)는 상기 양자 얽힘이고, D(·)는 상기 양자 불일치이고, $\rho_{A1|Ai}$는 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ \ldots,\ An}\rangle$에 대하여 Ai상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태일 수 있다.

[0013] 일 실시 예에 따르면, 상기 다분 양자얽힘상태 Ψ가 삼분(tripartite) 상태의 2파라미터를 갖는 $|\psi(p,\epsilon)\rangle=\sqrt{p\epsilon}\,|000\rangle+\sqrt{p(1-\epsilon)}\,|111\rangle+\sqrt{(1-p)/2}\,(|101\rangle+|110\rangle)$ 인 경우, 상기 양자 상관 인자 판단 과정은, $\mathcal{D}(\rho_{A|BC})-\frac{1}{2}(\mathcal{D}(\rho_{A|B})+\mathcal{D}(\rho_{A|C}))$ 에 의해 상기 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단할 수 있다.

[0014] 일 실시 예에 따르면, 상기 다분 양자얽힘상태 Ψ가 삼분(tripartite) 상태의 일반화된 W 상태로 $|\psi_w\rangle=\sin\theta\cos\phi\,|011\rangle+\sin\theta\sin\phi\,|101\rangle+\cos\theta\,|110\rangle$ 인 경우,상기 양자 상관 인자 판단 과정은, $\mathcal{D}(\rho_{A|BC})-\mathcal{D}(\rho_{A|B})-\mathcal{D}(\rho_{A|C})$ 에 의해 상기 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단할 수 있다.

[0015] 일 실시 예에 따르면, 상기 양자 상관 인자 판단 과정에서, 상기 양자 상관 인자 T1 또는 T2'가 포지티브 값을 갖는 것으로 판단되며, 상기 양자 불일치가 모노가미 조건을 만족하는 것으로 판단하고, 상기 구분된 이분 양자 시스템에서 양자 암호화, 또는 양자 통신 중 적어도 하나를 수행하는 양자 암호화/양자 통신 수행 과정을 더 포함할 수 있다.

[0016] 본 발명의 다른 양상에 따른, 양자 불일치(discord)를 이용한 다분 양자얽힘상태 구분 방법은, 이분 양자 상태(bipartite quantum state)에서 양자 엔트로피(S)에 기반하여 양자 불일치(D)를 획득하는 양자 상태 정보 획득 과정; 상기 획득된 양자 불일치에 기반하여 양자 상관 인자가 포지티브(positive) 값인지를 판단하는 양자 상관 인자 판단 과정; 및 상기 판단된 양자 상관 인자에 기반하여, 양자 얽힘(entanglement)을 갖는 다분 양자 시스템을 이분 양자 시스템으로 구분(classify)하는 양자 시스템 구분 과정을 포함한다.

[0017] 일 실시 예에 따르면, 상기 양자 상관 인자(T1)는 $E^2(\rho_{A_1|A_2\ldots A_n})-E^2(\rho_{A_1A_2})-E^2(\rho_{A_1A_3})-\ldots-E^2(\rho_{A_1A_n})$ 로 주어지고, E(·)는 상기 양자 얽힘이고, $\rho_{A1|A2,\ ..,\ An}$은 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ ..,\ An}>$에 대하여 A2, A3, ..., An 상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태이고, ρ_{A1An}은 A1과 An의 상호 정보와 연관된 상태일 수 있다.

[0018] 일 실시 예에 따르면, 상기 양자 상관 인자(T2)는 $\sum_{i=2}^{n}(-S(\rho_{A_1|A_i}))(-E(\rho_{A_1|A_j})-D(\rho_{A_1|A_i}))$ 로 주어지고, S(·)는 상기 양자 엔트로피이고, E(·)는 상기 양자 얽힘이고, D(·)는 상기 양자 불일치이고, $\rho_{A1|Ai}$는 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ ..,\ An}>$에 대하여 Ai상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태일 수 있다.

[0019] 일 실시 예에 따르면, 상기 다분 양자얽힘상태 Ψ가 삼분(tripartite) 상태의 2파라미터를 갖는 $|\psi(p,\epsilon)\rangle=\sqrt{p\epsilon}\,|000\rangle+\sqrt{p(1-\epsilon)}\,|111\rangle+\sqrt{(1-p)/2}\,(|101\rangle+|110\rangle)$ 인 경우, 상기 양자 상관 인자 판단 과정은, $\mathcal{D}(\rho_{A|BC})-\frac{1}{2}(\mathcal{D}(\rho_{A|B})+\mathcal{D}(\rho_{A|C}))$ 에 의해 상기 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단하고, 상기 다분 양자얽힘상태 Ψ가 삼분(tripartite) 상태의 일반화된 W 상태로 $|\psi_w\rangle=\sin\theta\cos\phi\,|011\rangle+\sin\theta\sin\phi\,|101\rangle+\cos\theta\,|110\rangle$ 인 경우, 상기 양자 상관 인자 판단 과정은, $\mathcal{D}(\rho_{A|BC})-\mathcal{D}(\rho_{A|B})-\mathcal{D}(\rho_{A|C})$ 에 의해 상기 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단할 수 있다.

[0020] 일 실시 예에 따르면, 상기 양자 엔트로피(S)는 조건부 비측정(unmeasured) 엔트로피 $S(\rho_{A|B})$ 및 측정된 조건부 엔트로피 $\tilde{S}(\rho_{A|B})$ 를 포함하고, 상기 양자 불일치(D)는 상기 측정된 조건부 엔트로피 $\tilde{S}(\rho_{A|B})$와 상기 조건부 비측정 엔트로피 $S(\rho_{A|B})$ 를 이용하여 $\mathcal{D}(\rho_{AB})=\tilde{S}(\rho_{A|B})-S(\rho_{A|B})$ 와 같이 표현될 수 있다.

[0021] 본 발명의 또 다른 양상에 따르면, 양자 불일치(discord)를 이용한 다분 양자얽힘상태를 구분하는 양자 시스템은, 다수의 양자 서브 시스템으로부터 양자 상태(ρ)를 수신하는 인터페이스부; 및 상기 양자 상태를 이용하여 양자 불일치, 양자 얽힘, 또는 양자 엔트로피 중 적어도 하나를 획득하고, 상기 획득된 양자 불일치, 양자 얽힘(entanglement), 또는 양자 엔트로피(entropy) 중 적어도 하나에 기반하여 양자 상관 인자가 포지티브(positive) 값인지를 판단하고, 상기 판단된 양자 상관 인자에 기반하여, 다분 양자 시스템을 이분 양자 시스템으로 구분(classify)하는 제어부를 포함할 수 있다.

[0022] 일 실시 예에 따르면, 상기 양자 상관 인자(T1)는 $E^2(\rho_{A_1|A_2\ldots A_n})-E^2(\rho_{A_1A_2})-E^2(\rho_{A_1A_3})-\ldots-E^2(\rho_{A_1A_n})$ 로 주어지고, E(·)는 상기 양자 얽힘이고, $\rho_{A1|A2,\ ..,\ An}$은 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ ..,\ An}>$에 대하여 A2, A3, ..., An 상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태이고, ρ_{A1An}은 A1과 An의 상호 정보와 연관된 상태일 수 있다.

[0023] 일 실시 예에 따르면, 상기 양자 상관 인자(T2)는 $\sum_{i=2}^{n}(-S(\rho_{A_1|A_i}))(-E(\rho_{A_1|A_j})-D(\rho_{A_1|A_i}))$ 로 주어지고, S(·)는 상기 양자 엔트로피이고, E(·)는 상기 양자 얽힘이고, D(·)는 상기 양자 불일치이고, $\rho_{A1|Ai}$는 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ ...,\ An}\rangle$에 대하여 Ai상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태일 수 있다.

[0024] 일 실시 예에 따르면, 상기 다분 양자얽힘상태 Ψ가 삼분(tripartite) 상태의 2파라미터를 갖는 $|\psi(p,\epsilon)\rangle=\sqrt{p\epsilon}\,|000\rangle+\sqrt{p(1-\epsilon)}\,|111\rangle+\sqrt{(1-p)/2}\,(|101\rangle+|110\rangle)$ 인 경우, 상기 제어부는, $\mathcal{D}(\rho_{A|BC})-\frac{1}{2}(\mathcal{D}(\rho_{A|B})+\mathcal{D}(\rho_{A|C}))$ 에 의해 상기 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단하고, 상기 다분 양자얽힘상태 Ψ가 삼분(tripartite) 상태의 일반화된 W 상태로 $|\psi_w\rangle=\sin\theta\cos\phi\,|011\rangle+\sin\theta\sin\phi\,|101\rangle+\cos\theta\,|110\rangle$ 인 경우, 상기 제어부는, $\mathcal{D}(\rho_{A|BC})-\mathcal{D}(\rho_{A|B})-\mathcal{D}(\rho_{A|C})$ 에 의해 상기 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단할 수 있다.

[0025] 본 발명의 또 다른 양상에 따르면, 양자 불일치(discord)를 이용한 다분 양자얽힘상태를 구분하는 양자 시스템은, 다수의 양자 서브 시스템으로부터 양자 상태(ρ)를 수신하는 인터페이스부; 및 상기 양자 상태를 이용하여 양자 엔트로피(S)에 기반한 양자 불일치(D)를 획득하고, 상기 획득된 양자 불일치에 기반하여 양자 상관 인자가 포지티브(positive) 값인지를 판단하고, 상기 판단된 양자 상관 인자에 기반하여, 다분 양자 시스템을 이분 양자 시스템으로 구분(classify)하는 제어부를 포함한다.

[0026] 일 실시 예에 따르면, 상기 양자 상관 인자(T1)는 $E^2(\rho_{A_1|A_1\ldots A_n})-E^2(\rho_{A_1A_2})-E^2(\rho_{A_1A_3})-\ldots-E^2(\rho_{A_1A_n})$ 로 주어지고, E(·)는 상기 양자 얽힘이고, $\rho_{A1|A2,\ ...,\ An}$은 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ ...,\ An}\rangle$에 대하여 A2, A3, ..., An 상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태이고, ρ_{A1An}은 A1과 An의 상호 정보와 연관된 상태일 수 있다.

[0027] 일 실시 예에 따르면, 상기 양자 상관 인자(T2)는 $\sum_{i=2}^{n}(-S(\rho_{A_1|A_i}))(-E(\rho_{A_1|A_j})-D(\rho_{A_1|A_i}))$ 로 주어지고, S(·)는 상기 양자 엔트로피이고, E(·)는 상기 양자 얽힘이고, D(·)는 상기 양자 불일치이고, $\rho_{A1|Ai}$는 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ ...,\ An}\rangle$에 대하여 Ai상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태일 수 있다.

[0028] 일 실시 예에 따르면, 상기 다분 양자얽힘상태 Ψ가 삼분(tripartite) 상태의 2파라미터를 갖는 $|\psi(p,\epsilon)\rangle=\sqrt{p\epsilon}\,|000\rangle+\sqrt{p(1-\epsilon)}\,|111\rangle+\sqrt{(1-p)/2}\,(|101\rangle+|110\rangle)$ 인 경우, 상기 제어부는, $\mathcal{D}(\rho_{A|BC})-\frac{1}{2}(\mathcal{D}(\rho_{A|B})+\mathcal{D}(\rho_{A|C}))$ 에 의해 상기 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단하고, 상기 다분 양자얽힘상태 Ψ가 삼분(tripartite) 상태의 일반화된 W 상태로 $|\psi_w\rangle=\sin\theta\cos\phi\,|011\rangle+\sin\theta\sin\phi\,|101\rangle+\cos\theta\,|110\rangle$ 인 경우, 상기 제어부

는, $\mathcal{D}(\rho_{A|BC}) - \mathcal{D}(\rho_{A|B}) - \mathcal{D}(\rho_{A|C})$ 에 의해 상기 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단할 수 있다.

[0029] 일 실시 예에 따르면, 상기 양자 엔트로피(S)는 조건부 비측정(unmeasured) 엔트로피 $S(\rho_{A|B})$ 및 측정된 조건부 엔트로피 $\tilde{S}(\rho_{A|B})$ 를 포함하고, 상기 제어부는, 상기 측정된 조건부 엔트로피 $\tilde{S}(\rho_{A|B})$ 와 상기 조건부 비측정 엔트로피 $S(\rho_{A|B})$ 를 이용하여 상기 양자 불일치 $\mathcal{D}(\rho_{AB}) = \tilde{S}(\rho_{A|B}) - S(\rho_{A|B})$ 를 획득할 수 있다.

발명의 효과

[0030] 본 발명에 따른 방법은, 양자 불일치의 모노가미를 이용하여 다분 양자얽힘상태 구분 방법을 제공할 수 있다.

[0031] 본 발명에 따른 방법은, 양자 불일치의 상대 엔트로피에 대한 모노가미를 제시하여, 높은 차원의 다분 시스템을 낮은 차원의 다분 시스템으로 구분/변환하는 방법을 제공할 수 있다는 장점이 있다.

도면의 간단한 설명

[0032] 도 1은 본 발명에 따른 양자 채널 예측 방법을 수행하는 양자 시스템을 도시한다.

도 2는 본 발명에 따른 양자 기기 및 양자 서버의 상세 구성을 도시한다.

도 3은 본 발명의 2 파라미터 상태에서 두 가지 형태의 양자 불일치의 모노가미를 비교한 것이다.

도 4는 본 발명에 따른 일반화된 W 상태에 대한 두 가지 형태의 양자 불일치의 모노가미를 비교한 것이다.

도 5 및 도 6은 본 발명에 따른 양자 불일치를 이용한 다분 양자얽힘상태 구분 방법의 흐름도를 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0033] 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 한다. 그러나 이는 본 발명을 특정한 개시형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시 예들을 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다.

[0034] 각 도면을 설명하면서 유사한 참조부호를 유사한 구성요소에 대해 사용한다.

[0035] 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.

[0036] 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 포함한다.

[0037] 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.

[0038] 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.

[0039] 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.

[0040] 이하, 본 발명의 바람직한 실시 예를 첨부한 도면을 참조하여 당해 분야에 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 설명한다. 하기에서 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.

[0041] 이하, 본 발명에 따른 양자 채널 예측 방법 및 양자 채널 예측 시스템에 대해 살펴보기로 하자.

[0042] 이와 관련하여, 도 1은 본 발명에 따른 양자 채널 예측 방법을 수행하는 양자 시스템을 도시한다. 도 1에 도시된 바와 같이, 양자 시스템은 복수의 서브 시스템을 포함하고, 편의상 제1 서브 시스템(100) 내지 제4 서브 시스템(400)이 포함된 것으로 표현할 수 있다. 하지만, 상기 제1 내지 제4 서브 시스템(100 내지 400)에만 한정되는 것이 아니라, 임의의 개수의 서브 시스템 간에도 적용될 수 있다. 한편, 상기 제1 내지 제4 서브 시스템(100 내지 400) 간의 양자 통신 또는 양자 암호화를 수행하는 양자 서버(500)를 더 포함할 수 있다. 이때, 양자 서버(500)는 상기 제1 내지 제4 서브 시스템(100 내지 400)으로부터 다분 양자 상태에 관한 정보를 수신하고, 양자 불일치를 이용하여 다분 양자얽힘상태를 구분할 수 있다. 이때, 양자 서버(500)는 제1 내지 제3 서브 시스템(100 내지 300)으로부터 양자 상태에 관한 정보를 수신하고, 양자 불일치를 이용하여 삼분 양자얽힘상태를 구분할 수 있다. 또한, 양자 서버(500)는 제1 내지 제3 서브 시스템 (100 내지 400)으로부터 양자 상태에 관한 정보를 수신하고, 양자 불일치를 이용하여 사분 양자 양자얽힘상태를 구분할 수 있다. 한편, 양자 서버(500)는 서브 시스템의 개수에 따라 n분 양자얽힘 상태를 구분할 수 있다.

[0043] 또한, 상기 제1 내지 제4 서브 시스템(100-400)은 임의의 양자 기기이거나 이들 간에 통신을 수행하는 양자 서버일 수 있다. 즉, 제1 내지 제4 서브 시스템(100 내지 400)은 각각 송신 기기인 제1 양자 기기와 수신 기기인 제2 양자 기기이거나 이들 간에 통신을 수행하는 양자 서버일 수 있다. 이때, 양자 서버(500) 없이, 제1 내지 제4 서브 시스템(100 내지 400) 중 어느 하나가 양자 서버의 역할을 수행할 수 있다.

[0044] 도 2는 본 발명에 따른 양자 기기 및 양자 서버의 상세 구성을 도시한다. 편의상, 양자 기기들을 제1 내지 제4 양자 기기(100 내지 400)으로, 양자 서버를 양자 서버(500)로 지칭할 수 있다. 한편, 제1 내지 제4 양자 기기(100 내지 400) 중 어느 하나가 양자 서버(500)를 대신하여 양자 서버의 역할을 하는 경우를 포함할 수 있다.

[0045] 양자 서버(500)는 제어부(510), 인터페이스부(520) 및 메모리(530)를 포함한다. 인터페이스부(520)는 다분 양자 상태(ρ)를 다수의 양자 시스템, 즉 제1 내지 제4 양자 기기(100 내지 400)로부터 양자 채널을 통해 수신한다. 이때, 3개의 양자 기기로부터 양자 상태를 수신하는 경우는 삼분 양자 시스템, 4개의 양자 기기로부터 양자 상태를 수신하는 경우는 사분 양자 시스템, n개의 양자 기기로부터 양자 상태를 수신한는 경우는 n분 양자 시스템으로 지칭할 수 있다. 한편, 하나의 양자 기기로부터 다수의 양자 채널,또는 다수의 양자 상태에 관한 정보를 수신할 수 있다. 이때, k개의 양자 기기로부터 n개의 양자 상태($n > k$)에 관한 정보를 수신하는 n분 양자 시스템일 수 있다.

[0046] 제어부(510)는 상기 양자 상태를 이용하여 양자 불일치, 양자 얽힘, 또는 양자 엔트로피 중 적어도 하나를 획득하고, 상기 획득된 양자 불일치, 양자 얽힘(entanglement), 또는 양자 엔트로피(entropy) 중 적어도 하나에 기반하여 양자 상관 인자가 포지티브(positive) 값인지를 판단할 수 있다. 이때, 제어부(510)는 상기 판단된 양자 상관 인자에 기반하여, 다분 양자 시스템을 이분 양자 시스템으로 구분(classify)할 수 있다.

[0047] 또는, 제어부(510)는 상기 양자 상태를 이용하여 양자 엔트로피(S)에 기반한 양자 불일치(D)를 획득하고, 상기 획득된 양자 불일치에 기반하여 양자 상관 인자가 포지티브(positive) 값인지를 판단할 수 있다. 이때, 제어부(510)는 상기 판단된 양자 상관 인자에 기반하여, 다분 양자 시스템을 이분 양자 시스템으로 구분(classify)할 수 있다.

[0048] 한편, 메모리(530)는 양자 시스템 구분 및 상태 정보 전송과 관련하여, 양자 정보 및 일반 정보를 저장하도록 구성될 수 있다.

[0049] 한편, 본 발명에 따른 양자 불일치를 이용한 다분 양자얽힘상태 구분 방법에 관하여, 양자 불일치 및 양자 불일치의 모노가미(monogamy) 측면에서 상세하게 살펴보면 다음과 같다.

[0050] **I. 양자 불일치(quantum discord)**

[0051] 양자 시스템에 대하여 von Neumann 엔트로피가 $S(\rho_{AB}) = -\mathrm{tr}\rho_{AB}\log\rho_{AB}$ 에 의해 정의될 수 있다. 양자 시스템에서, 조건부(conditional) 엔트로피에 대해 두 가지 형태로 정의할 수 있다. 하나는 측정 기반 형태이고,

나머지는 비-측정(unmeasured) 형태이다. 이와 관련하여 측정 기반 조건부 엔트로피는 수학식 1과 같이 정의되고, 비-측정 기반 조건부 엔트로피는 수학식 2와 같이 정의된다.

수학식 1

[0052] $$S\left(\rho_{A|B}\right) = S\left(\rho_{AB}\right) - S\left(\rho_{B}\right)$$

수학식 2

[0053] $$\tilde{S}\left(\rho_{A|B}\right) = \min_{\Pi_j^B} \sum_j p_j S\left(\rho_{A|B_j}\right)$$

[0054] 여기서, 수학식 2의 최소화는 모든 포지티브 연산자 값 측정(POVM: Positive Operator Valued Measurement)를 통해 수행되고, 이러한 측정에 의해 조건부 엔트로피의 최소값을 얻을 수 있다.

[0055] 일반 채널에서는 수학식 1 및 2의 형태는 동일한 형태일 수 있지만, 양자 채널에서는 측정 기반 조건부 엔트로피와 비-측정 기반 조건부 엔트로피가 이용되는 경우에 완전히 다른 결과가 발생할 수 있다. 양자 시스템에서, $\tilde{S}\left(\rho_{A|B}\right)$ 은 시스템 B에 대한 측정을 요구하고, 이로 인해 양자 상관에서 손실이 발생할 수 있다.

[0056] 전술한 이러한 표현들 간의 차이에 기인하여, 두 가지 타입의 상호 정보, 즉 비-측정 및 측정 상호 정보가 정의될 수 있다. 비-측정 상관 정보는 일반적으로 총 상관을 정량화하는 양자 상호 정보에 해당할 수 있고, 아래의 수학식 3과 같이 표현 가능하다.

수학식 3

[0057] $$I\left(\rho_{AB}\right) = S\left(\rho_{A}\right) + S\left(\rho_{B}\right) - S\left(\rho_{AB}\right)$$

[0058] 반면에, 측정된 상호 정보는 총 일반 상관을 정량화하는 일반 상호 정보로 지칭될 수 있고, 아래의 수학식 4와 같이 표현 가능하다.

수학식 4

[0059] $$\tilde{I}\left(\rho_{AB}\right) = S\left(\rho_{A}\right) - \tilde{S}\left(\rho_{A|B}\right)$$

[0060] 이러한 두 가지 상호 상관량 간의 차이를 양자 불일치(discord)라고 지칭할 수 있고, 아래의 수학식 5 또는 간단한 연산을 통해 수학식 6으로 표현 가능하다.

수학식 5

[0061] $$\mathcal{D}\left(\rho_{AB}\right) = I\left(\rho_{AB}\right) - \tilde{I}\left(\rho_{AB}\right)$$

수학식 6

[0062] $$\mathcal{D}(\rho_{AB}) = \tilde{S}(\rho_{A|B}) - S(\rho_{A|B})$$

[0063] 따라서, 양자 엔트로피(S)는 조건부 비측정(unmeasured) 엔트로피 $S(\rho_{A|B})$ 및 측정된 조건부 엔트로피 $\tilde{S}(\rho_{A|B})$ 를 포함함을 알 수 있다. 이때, 제어부(502)는 측정된 조건부 엔트로피 $\tilde{S}(\rho_{A|B})$와 조건부 비측정 엔트로피 $S(\rho_{A|B})$ 를 이용하여 양자 불일치 $\mathcal{D}(\rho_{AB}) = \tilde{S}(\rho_{A|B}) - S(\rho_{A|B})$ 를 획득할 수 있다. 이에 따라, 제어부(502)는 획득된 양자 불일치에 기반하여 양자 상관 인자가 포지티브(positive) 값인지를 판단하고, 상기 판단된 양자 상관 인자에 기반하여, 다분 양자 시스템을 2분 양자 시스템으로 구분(classify)할 수 있다.

[0064] 양자 조건부 엔트로피 및 일반 양자 조건부 엔트로피는 양자 상대 엔트로피를 이용하여 아래의 수학식 7 및 수학식 8과 같이 표현 가능하다.

수학식 7

[0065] $$S(A|B) = \log d_A - D(\rho_{AB} || \pi^A \otimes \rho_B)$$

수학식 8

[0066] $$\tilde{S}(\rho_{A|B}) = \log d_A - \max_{\Pi_j^B} -D(\Phi_B(\rho_{AB}) || \pi^A \otimes (\Phi_B(\mathrm{tr}_A \rho_{AB})))$$

[0067] 조건부 엔트로피 표현을 수학식 6의 양자 불일치에 관한 정의로 대체하면, 양자 불일치는 아래의 수학식 9와 같이 표현 가능하다.

수학식 9

[0068] $$\mathcal{D}(\rho_{AB}) = D(\rho_{AB} || \pi^A \otimes \rho_B) - \min_{\Pi_j^B} \left[D(\Phi_B(\rho_{AB}) || \pi^A \otimes (\Phi_B(\mathrm{tr}_A \rho_{AB}))) \right]$$

[0069] **II. 양자 채널의 모노가미(monogamy)**

[0070] 일반적으로, 양자 불일치로 인해, 일 서브 시스템을 무시(discard)하는 상황인 모노가미를 따르지 않는다. 그러나, 상대 엔트로피 기반 정의로부터 다음과 같이 정리(theorem)를 얻을 수 있다.

[0071] *Theorem 1*: 총 양자 시스템으로부터 임의의 양자 시스템을 추적(trace)할때, 수학식 9에 표현된 양자 불일치는 단조 감소 함수이고, 아래의 수학식 10과 같이 표현 가능하다.

수학식 10

[0072] $$\mathcal{D}\left(\rho_{A|BC}\right) \geq \mathcal{D}\left(\rho_{A|B}\right)$$

[0073] *Proof*: 정리 1에 대한 증명은 상대 엔트로피의 단조성(monotonicity)로부터 직접 이루어질 수 있다. 측정에 의해 양자 시스템의 상대 엔트로피를 감소시킨다는 사실로부터 다음과 같은 양자 불일치의 포지티비티(positivity)가 수반된다.

[0074] $$D\left(\rho||\sigma\right) \geq D\left(\mathcal{M}\left(\rho\right)||\mathcal{M}\left(\sigma\right)\right)$$

[0075] 서브 시스템을 추적하여, 다음과 같이 양자 상대 엔트로피가 감소됨을 알 수 있다.

[0076] $$D\left(\rho^{ABC}||\pi^{A}\otimes\rho^{BC}\right) \geq D\left(\rho^{AB}||\pi^{A}\otimes\rho^{B}\right)$$

[0077] 상대 엔트로피의 단조성을 추적하고 측정하여, 임의의 서브 시스템을 추적하는 경우 상대 엔트로피 형태로 정의된 양자 불일치는 단조 감소 함수임을 알 수 있다.

[0078] **Example 1.** 삼분 혼합 상태 $\rho = p|000\rangle\langle 000| + (1-p)|1+1\rangle\langle 1+1|$를 고려한다. 여기서 $|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$이다. 이러한 상태에 대한 상대 엔트로피 불일치는 $\mathcal{D}_R\left(\rho_{A|BC}\right) = 0$, 및 $\mathcal{D}\left(\rho_{A|C}\right) > 0$이다. 따라서, 수학식 10의 부등호(inequality)는 혼합 상태의 상대 양자 불일치를 따르지않는다 하지만, 최초(original) 양자 불일치는 모두 $\mathcal{D}\left(\rho_{A|B}\right) = \mathcal{D}\left(\rho_{A|C}\right) = 0$이고, 수학식 10의 부등호는 혼합 상태에 대해서도 적용된다.

[0079] *Theorem 2*: 양자 불일치의 모노가미는 이분(bipartite) 상태의 측정된 대상(party)의 나머지 모든 대상들에 대한 양자 불일치의 평균이다. 따라서, 양자 불일치의 모노가미는 아래의 수학식 11과 같이 표현 가능하다.

수학식 11

[0080] $$\mathcal{D}\left(\rho_{A_1|A_2,\cdots,A_n}\right) \geq \frac{1}{n-1}\left(\mathcal{D}\left(\rho_{A_1|A_2}\right) + \mathcal{D}\left(\rho_{A_1|A_3}\right) + \cdots + \mathcal{D}\left(\rho_{A_1|A_n}\right)\right)$$

[0081] *Proof*: 양자 불일치의 단조성으로부터 다음과 같은 관계가 성립한다.

[0082] $$\begin{aligned} \mathcal{D}\left(\rho_{A_1|A_2,\cdots,A_n}\right) &\geq \mathcal{D}\left(\rho_{A_1|A_2}\right) \\ \mathcal{D}\left(\rho_{A_1|A_2,\cdots,A_n}\right) &\geq \mathcal{D}\left(\rho_{A_1|A_3}\right) \\ \vdots \qquad & \qquad \vdots \\ \mathcal{D}\left(\rho_{A_1|A_2,\cdots,A_n}\right) &\geq \mathcal{D}\left(\rho_{A_1|A_n}\right) \end{aligned}$$

[0083] 전술된 모든 식들을 더하여, Theorem 2를 얻을 수 있다.

[0084] 삼분 상태에 대하여, Therom 2는 아래의 수학식 12와 같이 표현 가능하다.

수학식 12

[0085] $$\mathcal{D}\left(\rho_{A|BC}\right) \geq \frac{\mathcal{D}\left(\rho_{A|B}\right)+\mathcal{D}\left(\rho_{A|C}\right)}{2}$$

[0086] **Examplw 2**. 2 파라미터 상태를 고려하면 아래의 수학식 13과 같다.

수학식 13

[0087] $$\begin{aligned}|\psi(p,\epsilon)\rangle = &\sqrt{p\epsilon}\,|000\rangle + \sqrt{p(1-\epsilon)}\,|111\rangle \\ &+\sqrt{(1-p)/2}\,(|101\rangle + |110\rangle)\end{aligned}$$

[0088] 이러한 예에 대해서 아래와 같이 모노가미 부등호 관계는 성립하지 않는다.

[0089] $$\mathcal{D}\left(\rho_{A|BC}\right) \not\geq \mathcal{D}\left(\rho_{A|B}\right)+\mathcal{D}\left(\rho_{A|C}\right).$$

[0090] 하지만, 이러한 예에 대하여 모노가미 관계는 유효하다. 이와 관련하여, 도 3은 본 발명의 2 파라미터 상태에서 두 가지 형태의 양자 불일치의 모노가미를 비교한 것이다. 도 3을 참조하면, 실선으로 표시된 $\mathcal{D}\left(\rho_{A|BC}\right)-\frac{1}{2}\left(\mathcal{D}\left(\rho_{A|B}\right)+\mathcal{D}\left(\rho_{A|C}\right)\right)$ 에 대한 그래프는 모든 p에 대하여 포지티브 값을 가짐을 알 수 있다. 반면에, 점선으로 표시된 $\mathcal{D}\left(\rho_{A|BC}\right)-\mathcal{D}\left(\rho_{A|B}\right)-\mathcal{D}\left(\rho_{A|C}\right)$ 에 대한 그래프는 일부 p 값에 대하여 포지티브 값이 아님을 알 수 있고, 이는 전술된 모노가미 부등화 관계가 성립하지 않기 때문이다. 따라서, 다분 양자얽힘상태 Ψ가 3분(tripartite) 상태의 2파라미터를 갖는 경우, 제어부(502)는 $\mathcal{D}\left(\rho_{A|BC}\right)-\frac{1}{2}\left(\mathcal{D}\left(\rho_{A|B}\right)+\mathcal{D}\left(\rho_{A|C}\right)\right)$ 에 의해 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단할 수 있다.

[0091] Example 3: 일반화된 W 상태는 아래의 수학식 14와 같이 표현 가능하다.

수학식 14

[0092] $$|\psi_w\rangle = \sin\theta\cos\phi\,|011\rangle + \sin\theta\sin\phi\,|101\rangle + \cos\theta\,|110\rangle$$

[0093] 이와 관련하여, 도 4는 본 발명에 따른 일반화된 W 상태에 대한 두 가지 형태의 양자 불일치의 모노가미를 비교한 것이다. 도 4를 참조하면, 실선으로 표시된 $\mathcal{D}\left(\rho_{A|BC}\right)-\frac{1}{2}\left(\mathcal{D}\left(\rho_{A|B}\right)+\mathcal{D}\left(\rho_{A|C}\right)\right)$ 에 대한 그래프는 모든 p에 대하여 네거티브 값임을 알 수 있다. 반면에, 점선으로 표시된 $\mathcal{D}\left(\rho_{A|BC}\right)-\mathcal{D}\left(\rho_{A|B}\right)-\mathcal{D}\left(\rho_{A|C}\right)$ 에 대한 그래프는 모든 p 값에 대하여 포지티브 값임을 알 수 있다. 따라서, 다분 양자얽힘상태 Ψ가 3분(tripartite) 상태의 일반화된 W 상태인 경우,제어부(502)는 $\mathcal{D}\left(\rho_{A|BC}\right)-\mathcal{D}\left(\rho_{A|B}\right)-\mathcal{D}\left(\rho_{A|C}\right)$ 에 의해 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단할 수 있다. 반면에, 모든 p에 대하여 네거티브 값을 갖는 $\mathcal{D}\left(\rho_{A|BC}\right)-\frac{1}{2}\left(\mathcal{D}\left(\rho_{A|B}\right)+\mathcal{D}\left(\rho_{A|C}\right)\right)$ 에 기반하여 양자 상관 인자를 판단할 수도 있다.

[0094] *Theorem 3*: 다분 순수 상태에 대한 제곱 형태의 양자 부조화의 모노가미는 모든 이분 조건부 엔트로피가 포지티브인지 여부 또는 i = j + 1에 대하여 $\sum_{i=2}^{n}(-S(\rho_{A_1|A_i}))(-E(\rho_{A_1A_j})-D(\rho_{A_1|A_i}))$ 를 만족하는지 여부를 항상 확인한다.

[0095] *Proof*: n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ \ldots,\ An}>$에 대하여, 이분 양자 불일치 및 얽힘에 대한 관계는 아래의 수학식 15에 의해 표현 가능하다.

수학식 15

[0096]
$$\mathcal{D}(\rho_{A_1j}) \geq E(\rho_{A_1i}) - S(\rho_{A_1|j})$$

[0097] 이러한 다중 대상 순수 상태에 대한 제곱 형태의 양자 불일치의 모노가미는 아래와 같이 표현 가능하다.

[0098]
$$\begin{aligned}
&\mathcal{D}^2_{A_1|A_2\cdots A_n} - \mathcal{D}^2_{A_1A_2} - \mathcal{D}^2_{A_1|A_3} - \cdots - \mathcal{D}^2_{A_1|A_n} \\
&\geq S^2(\rho_{A_1}) - E^2(\rho_{A_1A_2}) - E^2(\rho_{A_1A_3}) - \cdots - E^2(\rho_{A_1A_n}) \\
&- S^2(\rho_{A_1|A_2}) + 2S(\rho_{A_1|A_2})E(\rho_{A_1A_3}) - S^2(\rho_{A_1|A_3}) \\
&+ 2S(\rho_{A_1|A_3})E(\rho_{A_1A_4}) \cdots S^2(\rho_{A_1|A_n}) \\
&+ 2S(\rho_{A_1|A_n})E(\rho_{A_1A_2}),
\end{aligned}$$

[0099] 이에 따라, 양자 상관 인자 T1 및 T2는 다음과 같이 표현 가능하다.

[0100]
$$\begin{aligned}
T_1 = E^2(\rho_{A_1|A_2\cdots A_n}) - E^2(\rho_{A_1A_2}) - E^2(\rho_{A_1A_3}) - \\
\cdots - E^2(\rho_{A_1A_n}),
\end{aligned}$$

[0101]
$$\begin{aligned}
T_2 = -S^2(\rho_{A_1|A_2}) + 2S(\rho_{A_1|A_2})E(\rho_{A_1A_3}) - S^2(\rho_{A_1|A_3}) \\
+2S(\rho_{A_1|A_3})E(\rho_{A_1A_4}) \cdots S^2(\rho_{A_1|A_n}) \\
+2S(\rho_{A_1|A_n})E(\rho_{A_1A_2}).
\end{aligned}$$

[0102] 이때, 양자 상관 인자 T1, T2가 포지티브함을 증명할 필요가 있다. 이와 관련하여, 임의의 다분 상태에 대해 제곱 형태의 얽힘이 모노가미를 만족하면, 다음의 관계가 성립함을 알 수 있고, 이에 따라 양자 상관 인자 T1이 포지티브함을 알 수 있다.

[0103]
$$\begin{aligned}
E^2(\rho_{A_1|A_2\cdots A_n}) - E^2(\rho_{A_1A_2}) - E^2(\rho_{A_1A_3}) \\
-E^2(\rho_{A_1A_4}) - \cdots - E^2(\rho_{A_1A_n}) \geq 0.
\end{aligned}$$

[0104] 따라서, 양자 상관 인자(T1)는 $E^2(\rho_{A_1|A_2\ldots A_n}) - E^2(\rho_{A_1A_2}) - E^2(\rho_{A_1A_3}) - \ldots - E^2(\rho_{A_1A_n})$ 로 주어짐을 알 수 있다. 여기서, E(·)는 양자 얽힘이고, $\rho_{A1|A2,\ \ldots,\ An}$은 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ \ldots,\ An}>$에 대하여 A2, A3, ..., An 상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태이고, ρ_{A1An}은 A1과 An의 상호 정보와 연관된 상태에 해당한다. 이때, 제어부(502)는 양자 상관 인자(T1)가 포지티브(positive) 값인지를 판단하고, 상기 판단된 양자 상관 인자에 기반하여, 다분 양자 시스템을 2분 양자 시스템으로 구분(classify)한다.

[0105] 한편, 양자 상관 인자 T2에 대하여, 다음의 관계가 성립한다.

$$
\begin{aligned}
T_2 = & -S\left(\rho_{A_1|A_2}\right)\left(S\left(\rho_{A_1|A_2}\right)-2E\left(\rho_{A_1A_3}\right)\right) \\
& -S\left(\rho_{A_1|A_3}\right)\left(S\left(\rho_{A_1|A_3}\right)-2E\left(\rho_{A_1A_4}\right)\right) \\
& \quad \vdots \qquad\quad \vdots \qquad\quad \vdots \\
& -S\left(\rho_{A_1|A_n}\right)\left(S\left(\rho_{A_1|A_n}\right)-2E\left(\rho_{A_1A_2}\right)\right) \\
\geq & -S\left(\rho_{A_1|A_2}\right)\left(E\left(\rho_{A_1A_3}\right)-\mathcal{D}\left(\rho_{A_1|A_2}\right)-2E\left(\rho_{A_1A_3}\right)\right) \\
& -S\left(\rho_{A_1|A_3}\right)\left(E\left(\rho_{A_1A_4}\right)-\mathcal{D}\left(\rho_{A_1|A_3}\right)-2E\left(\rho_{A_1A_4}\right)\right) \\
& \quad \vdots \qquad\quad \vdots \qquad\quad \vdots \qquad\quad \vdots \\
& -S\left(\rho_{A_1|A_n}\right)\left(E\left(\rho_{A_1A_2}\right)-\mathcal{D}\left(\rho_{A_1|A_n}\right)-2E\left(\rho_{A_1A_2}\right)\right) \\
= & -S\left(\rho_{A_1|A_2}\right)\left(-E\left(\rho_{A_1A_3}\right)-\mathcal{D}\left(\rho_{A_1|A_2}\right)\right) \\
& -S\left(\rho_{A_1|A_3}\right)\left(-E\left(\rho_{A_1A_4}\right)-\mathcal{D}\left(\rho_{A_1|A_3}\right)\right) \\
& \quad \vdots \qquad\quad \vdots \qquad\quad \vdots \\
& -S\left(\rho_{A_1|A_n}\right)\left(-E\left(\rho_{A_1A_2}\right)-\mathcal{D}\left(\rho_{A_1|A_n}\right)\right),
\end{aligned}
$$

[0106]

[0107] 여기서, 수학식 15에서의 부등호 관계가 성립함을 알 수 있다. 얽힘 및 양자 불일치는 항상 포지티브하기 때문에, 모든 이분 조건부 엔트로피가 포지티브하면 다분 상태에 대한 제곱 형태의 양자 불일치가 모노가미 조건을 만족함을 알 수 있다. 다분 상태에 대한 제곱 형태의 양자 불일치에 대한 두 번째 경우에 대하여, $\sum_{i=2}^{n}(-S(\rho_{A_1|A_i}))(-E(\rho_{A_1|A_j})-D(\rho_{A_1|A_i}))$ 가 포지티브해야 한다.

[0108] 따라서, 양자 상관 인자(T2)는 $\sum_{i=2}^{n}(-S(\rho_{A_1|A_i}))(-E(\rho_{A_1|A_j})-D(\rho_{A_1|A_i}))$ 로 주어짐을 알 수 있다. 여기서, S(·)는 상기 양자 엔트로피이고, E(·)는 양자 얽힘이고, D(·)는 양자 불일치이고, $\rho_{A1|Ai}$는 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ ...,\ An}\rangle$에 대하여 Ai상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태이다. 이때, 제어부(502)는 양자 상관 인자(T1)가 포지티브(positive) 값인지를 판단하고, 상기 판단된 양자 상관 인자에 기반하여, 다분 양자 시스템을 2분 양자 시스템으로 구분(classify)한다.

[0109] 이상에서는 본 발명의 일 양상에 따른 양자 불일치를 이용한 다분 양자얽힘상태 구분 방법을 수행하는 양자 시스템에 대해 살펴보았다. 아래에서는 본 발명의 다른 양상에 따른 양자 불일치를 이용한 다분 양자얽힘상태 구분 방법에 대해 살펴보기로 한다. 한편, 전술된 양자 시스템에 관한 내용은 후술될 다분 양자얽힘상태 구분 방법과 결합되어 이용될 수 있음은 물론이다.

[0110] 이와 관련하여, 도 5 및 도 6은 본 발명에 따른 양자 불일치를 이용한 다분 양자얽힘상태 구분 방법의 흐름도를 나타낸다. 도 5를 참조하면, 다분 양자얽힘상태 구분 방법은 양자 상태 정보 획득 과정(S110), 양자 상관 인자 판단 과정(S120), 양자 시스템 구분 과정(S130), 및 양자 암호화/양자 통신 수행 과정(S140)을 포함한다.

[0111] 양자 상태 정보 획득 과정(S110)에서, 2분 양자 상태 (bipartite quantum state)에서 양자 불일치, 양자 얽힘, 또는 양자 엔트로피 중 적어도 하나를 획득한다.

[0112] 양자 상관 인자 판단 과정(S120)에서, 상기 획득된 양자 불일치, 양자 얽힘(entanglement), 또는 양자 엔트로피(entropy) 중 적어도 하나에 기반하여 양자 상관 인자가 포지티브(positive) 값인지를 판단한다.

[0113] 이때, 양자 상관 인자(T1)는 $E^2(\rho_{A_1|A_2\ldots A_n})-E^2(\rho_{A_1A_2})-E^2(\rho_{A_1A_3})-\ldots-E^2(\rho_{A_1A_n})$ 로 주어지고, E(·)는 상기 양자 얽힘이고, $\rho_{A1|A2,\ ...,\ An}$은 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ ...,\ An}\rangle$에 대하여 A2, A3, ..., An 상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태이고, ρ_{A1An}은 A1과 An의 상호 정보와 연관된 상태일 수 있다.

[0114] 또는, 양자 상관 인자(T2')는 $\sum_{i=2}^{n}(-S(\rho_{A_1|A_i}))(-E(\rho_{A_1|A_j})-D(\rho_{A_1|A_i}))$ 로 주어지고, S(·)는 상기 양자 엔트로피이고, E(·)는 상기 양자 얽힘이고, D(·)는 상기 양자 불일치이고, $\rho_{A1|Ai}$는 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ ...,\ An}>$에 대하여 Ai상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태일 수 있다.

[0115] 한편, 상기 다분 양자얽힘상태 Ψ가 3분(tripartite) 상태의 2파라미터를 갖는 $|\psi(p,\epsilon)\rangle=\sqrt{p\epsilon}\,|000\rangle+\sqrt{p(1-\epsilon)}\,|111\rangle+\sqrt{(1-p)/2}\,(|101\rangle+|110\rangle)$ 인 경우, 상기 양자 상관 인자 판단 과정(S120)은, $\mathcal{D}(\rho_{A|BC})-\frac{1}{2}(\mathcal{D}(\rho_{A|B})+\mathcal{D}(\rho_{A|C}))$ 에 의해 상기 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단할 수 있다.

[0116] 한편, 상기 다분 양자얽힘상태 Ψ가 3분(tripartite) 상태의 일반화된 W 상태로 $|\psi_W\rangle=\sin\theta\cos\phi\,|011\rangle+\sin\theta\sin\phi\,|101\rangle+\cos\theta\,|110\rangle$ 인 경우, 상기 양자 상관 인자 판단 과정(S120)은, $\mathcal{D}(\rho_{A|BC})-\mathcal{D}(\rho_{A|B})-\mathcal{D}(\rho_{A|C})$ 에 의해 상기 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단할 수 있다.

[0117] 양자 시스템 구분 과정(S130)에서, 상기 판단된 양자 상관 인자에 기반하여, 다분 양자 시스템을 2분 양자 시스템으로 구분(classify)한다.

[0118] 한편, 양자 상관 인자 판단 과정(S120)에서, 상기 양자 상관 인자 T1 또는 T2'가 포지티브 값을 갖는 것으로 판단되며, 상기 양자 불일치가 모노가미 조건을 만족하는 것으로 판단할 수 있다. 이에 따라, 양자 암호화/양자 통신 수행 과정(S140)에서, 상기 구분된 2분 양자 시스템에서 양자 암호화, 또는 양자 통신 중 적어도 하나를 수행할 수 있다.

[0119] 한편, 도 5의 양자 상태 정보 획득 과정(S110) 및 양자 상관 인자 판단 과정(S120)은 양자 불일치에 관한 정보를 토대로 이루어질 수 있다. 이와 관련하여, 도 6은 본 발명의 또 다른 양상에 따른 다분양자얽힘상태 구분방법의 흐름도이다.

[0120] 양자 상태 정보 획득 과정(S110')에서, 2분 양자 상태 (bipartite quantum state)에서 양자 엔트로피(S)에 기반하여 양자 불일치(D)를 획득한다.

[0121] 양자 상관 인자 판단 과정(S120')에서, 상기 획득된 양자 불일치에 기반하여 양자 상관 인자가 포지티브(positive) 값인지를 판단한다.

[0122] 이때, 양자 상관 인자(T1)는 $E^2(\rho_{A_1|A_2\ldots A_n})-E^2(\rho_{A_1A_2})-E^2(\rho_{A_1A_3})-\ldots-E^2(\rho_{A_1A_n})$ 로 주어지고, E(·)는 상기 양자 얽힘이고, $\rho_{A1|A2,\ ...,\ An}$은 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ ...,\ An}>$에 대하여 A2, A3, ..., An 상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태이고, ρ_{A1An}은 A1과 An의 상호 정보와 연관된 상태일 수 있다.

[0123] 또는, 양자 상관 인자(T2')는 $\sum_{i=2}^{n}(-S(\rho_{A_1|A_i}))(-E(\rho_{A_1|A_j})-D(\rho_{A_1|A_i}))$ 로 주어지고, S(·)는 상기 양자 엔트로피이고, E(·)는 상기 양자 얽힘이고, D(·)는 상기 양자 불일치이고, $\rho_{A1|Ai}$는 n분(n-partite) 순수 상태 $|\Psi_{A1|A2,\ ...,\ An}>$에 대하여 Ai상태에 대한 A1의 조건부(conditional) 상태일 수 있다.

[0124] 한편, 상기 다분 양자얽힘상태 Ψ가 3분(tripartite) 상태의 2파라미터를 갖는

$$|\psi(p,\epsilon)\rangle = \sqrt{p\epsilon}\,|000\rangle + \sqrt{p(1-\epsilon)}\,|111\rangle + \sqrt{(1-p)/2}\,(|101\rangle + |110\rangle)$$

인 경우, 상기 양자 상관 인자 판단 과정(S120')은, $\mathcal{D}(\rho_{A|BC}) - \frac{1}{2}(\mathcal{D}(\rho_{A|B}) + \mathcal{D}(\rho_{A|C}))$ 에 의해 상기 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단할 수 있다.

[0125] 한편, 상기 다분 양자얽힘상태 Ψ가 3분(tripartite) 상태의 일반화된 W 상태로 $|\psi_w\rangle = \sin\theta\cos\phi\,|011\rangle + \sin\theta\sin\phi\,|101\rangle + \cos\theta\,|110\rangle$ 인 경우, 상기 양자 상관 인자 판단 과정(S120')은, $\mathcal{D}(\rho_{A|BC}) - \mathcal{D}(\rho_{A|B}) - \mathcal{D}(\rho_{A|C})$ 에 의해 상기 양자 상관 인자가 포지티브 값인지를 판단할 수 있다.

[0126] 양자 시스템 구분 과정(S130)에서, 상기 판단된 양자 상관 인자에 기반하여, 다분 양자 시스템을 2분 양자 시스템으로 구분(classify)한다.

[0127] 한편, 양자 상관 인자 판단 과정(S120)에서, 상기 양자 상관 인자 T1 또는 T2'가 포지티브 값을 갖는 것으로 판단되며, 상기 양자 불일치가 모노가미 조건을 만족하는 것으로 판단할 수 있다. 이에 따라, 양자 암호화/양자 통신 수행 과정(S140)에서, 상기 구분된 2분 양자 시스템에서 양자 암호화, 또는 양자 통신 중 적어도 하나를 수행할 수 있다.

[0128] 이상에서는 본 발명에 따른 양자 불일치(discord)를 이용한 다분 양자얽힘상태를 구분하는 양자 시스템 및 양자 불일치를 이용한 다분 양자얽힘상태 구분 방법 에 대해 살펴보았다.

[0129] 한편, 본 발명의 적어도 일 실시 예에 따르면, 양자 불일치의 모노가미를 이용하여 다분 양자얽힘상태 구분 방법을 제공할 수 있다.

[0130] 또한, 본 발명의 적어도 일 실시 예에 따르면, 양자 불일치의 상대 엔트로피에 대한 모노가미를 제시하여, 높은 차원의 다분 시스템을 낮은 차원의 다분 시스템으로 구분/변환하는 방법을 제공할 수 있다는 장점이 있다.

[0131] 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 프로세서(processor)에 의해 실행될 수 있다.

부호의 설명

[0132] 100, 200, 300, 400: 제1 내지 제4 서브 시스템

100, 200, 300, 400: 제1 내지 제4 양자 기기

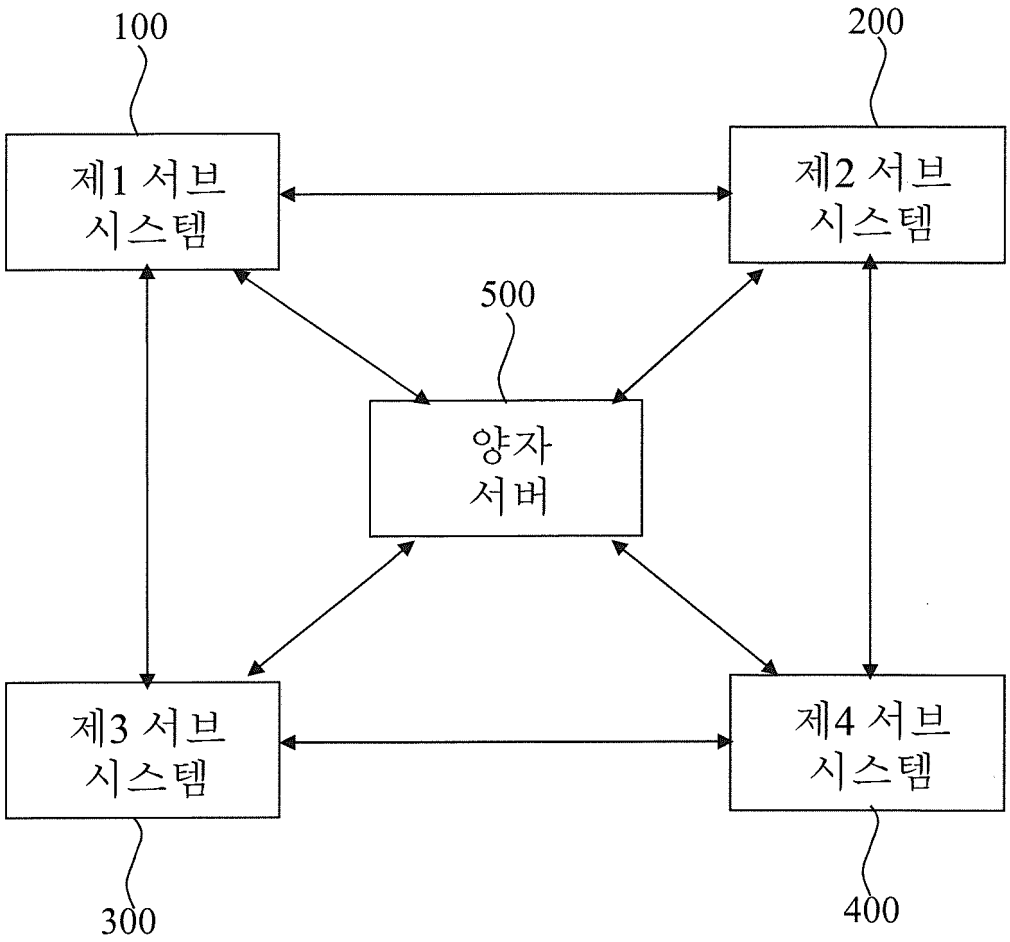
500; 양자 서버

510: 제어부 520: 인터페이스부

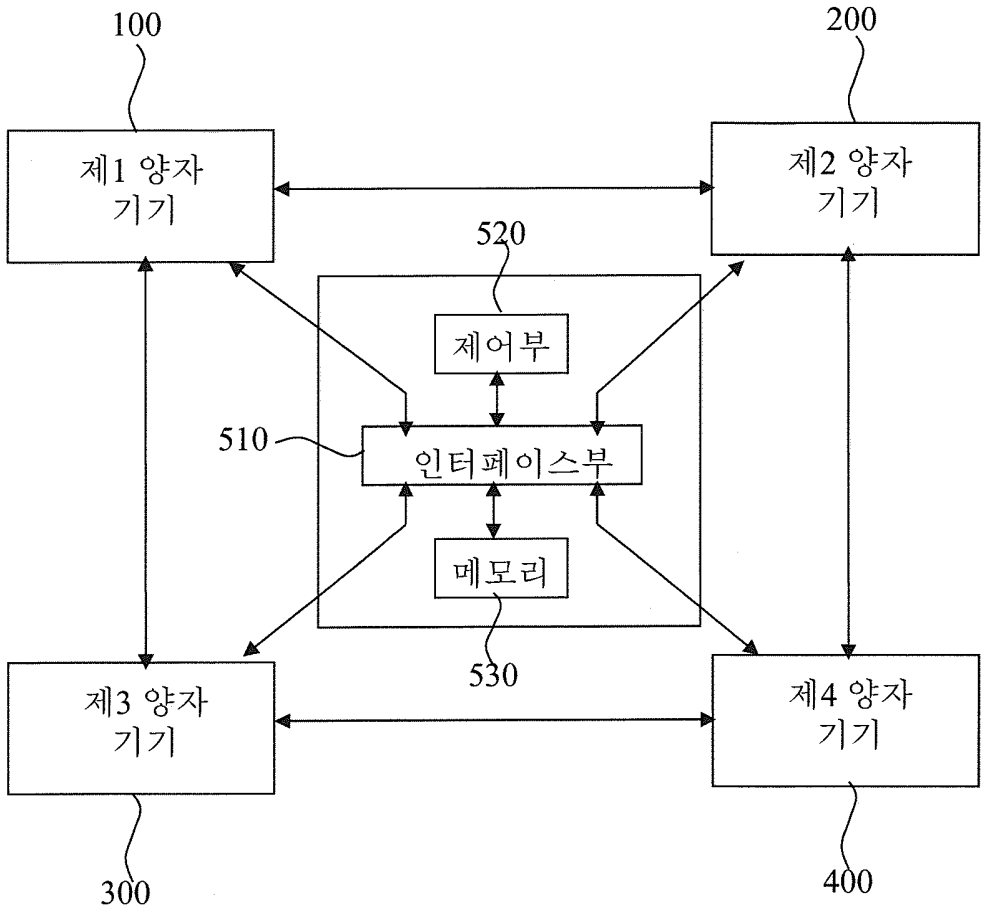
530: 메모리

도면

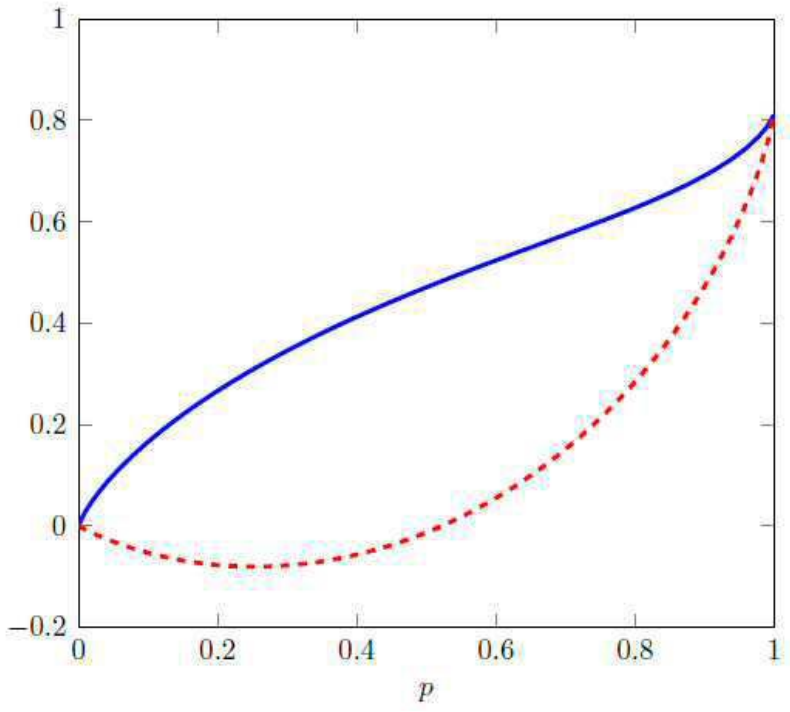
도면1



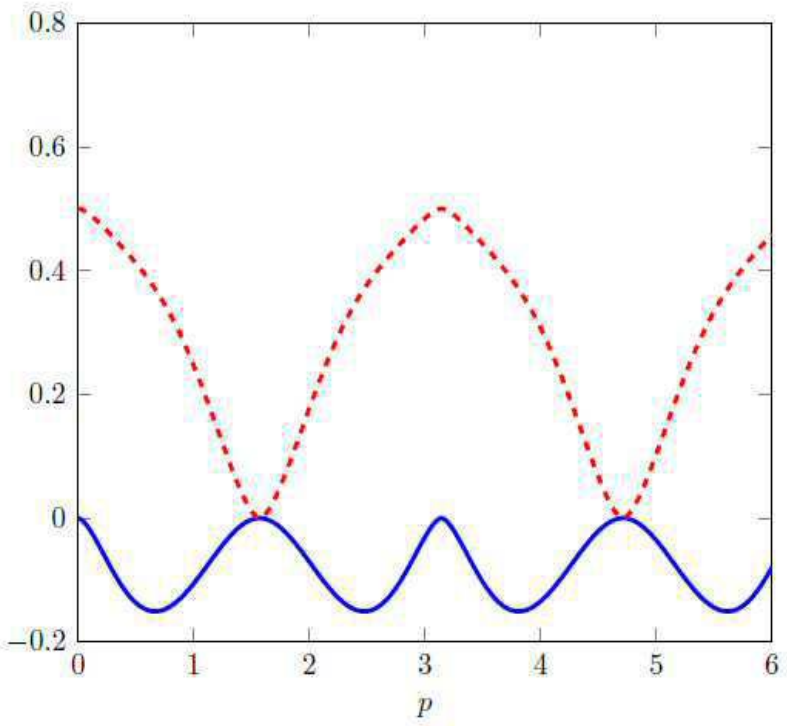
도면2


100
200
제1 양자 기기
제2 양자 기기
520
제어부
510
인터페이스부
메모리
530
제3 양자 기기
제4 양자 기기
300
400

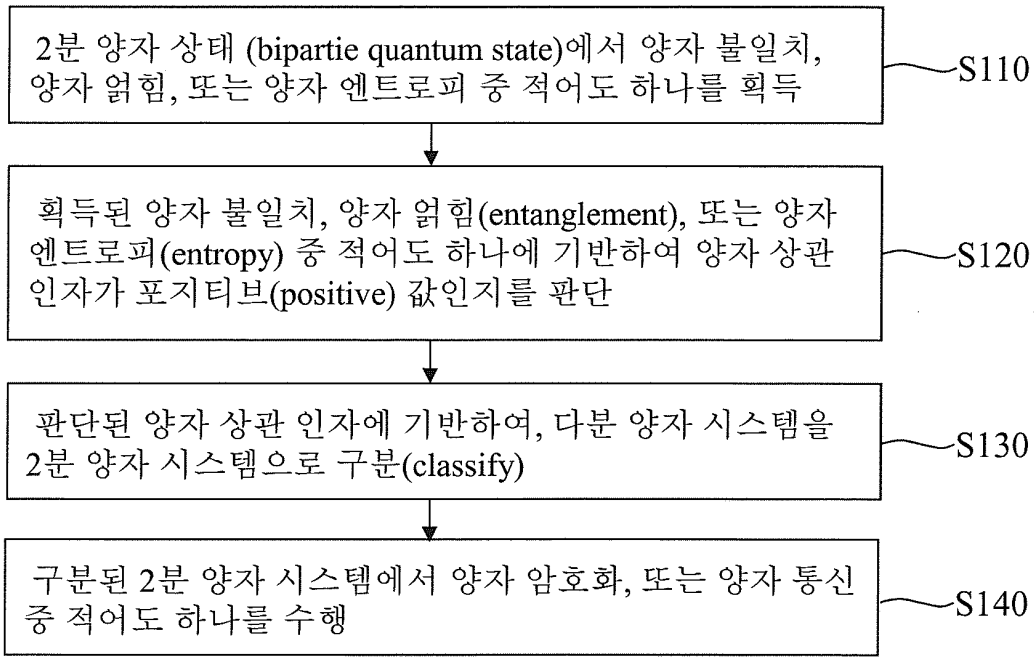
도면3


1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
−0.2
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
p

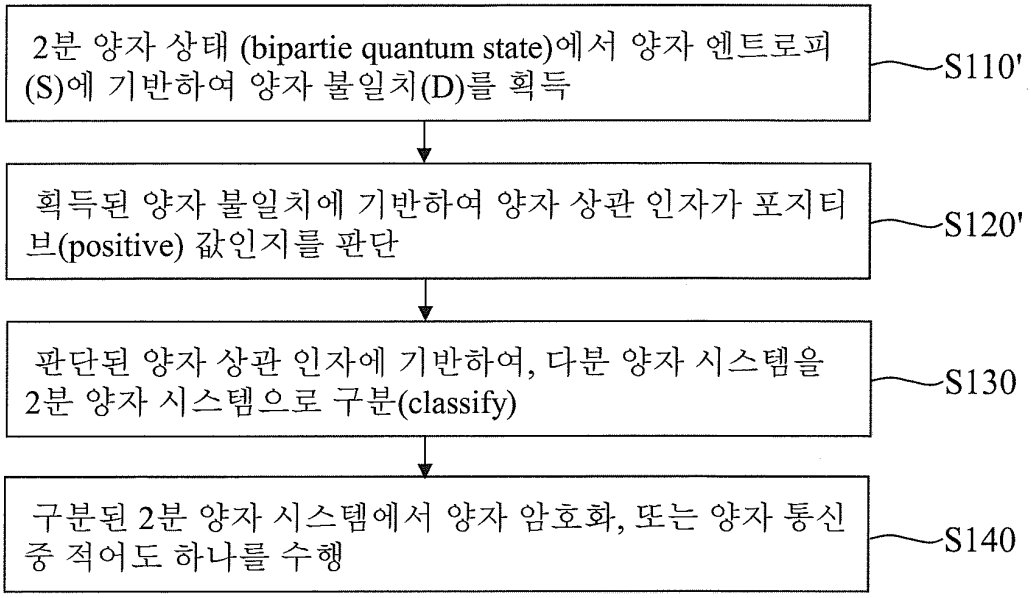
도면4


0.8
0.6
0.4
0.2
0
−0.2
0
1
2
3
4
5
6
p

도면5


2분 양자 상태 (bipartie quantum state)에서 양자 불일치, 양자 얽힘, 또는 양자 엔트로피 중 적어도 하나를 획득
S110
획득된 양자 불일치, 양자 얽힘(entanglement), 또는 양자 엔트로피(entropy) 중 적어도 하나에 기반하여 양자 상관 인자가 포지티브(positive) 값인지를 판단
S120
판단된 양자 상관 인자에 기반하여, 다분 양자 시스템을 2분 양자 시스템으로 구분(classify)
S130
구분된 2분 양자 시스템에서 양자 암호화, 또는 양자 통신 중 적어도 하나를 수행
S140

도면6


2분 양자 상태 (bipartie quantum state)에서 양자 엔트로피 (S)에 기반하여 양자 불일치(D)를 획득
S110'
획득된 양자 불일치에 기반하여 양자 상관 인자가 포지티브(positive) 값인지를 판단
S120'
판단된 양자 상관 인자에 기반하여, 다분 양자 시스템을 2분 양자 시스템으로 구분(classify)
S130
구분된 2분 양자 시스템에서 양자 암호화, 또는 양자 통신 중 적어도 하나를 수행
S140