(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2020년06월09일
(11) 등록번호 10-2120663
(24) 등록일자 2020년06월03일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H04B 10/70 (2013.01)
(52) CPC특허분류
H04B 10/70 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0049558
(22) 출원일자 2019년04월29일
심사청구일자 2019년04월29일
(56) 선행기술조사문헌
KR101953720 B1
KR1020160079924 A
KR1020190027215 A
US8788450 B2

(73) 특허권자
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 중원구 도촌북로 78, 501동 402호
우만 칼리드
경기도 수원시 영통구 청명남로60번길 24,B04호
(74) 대리인
김홍석

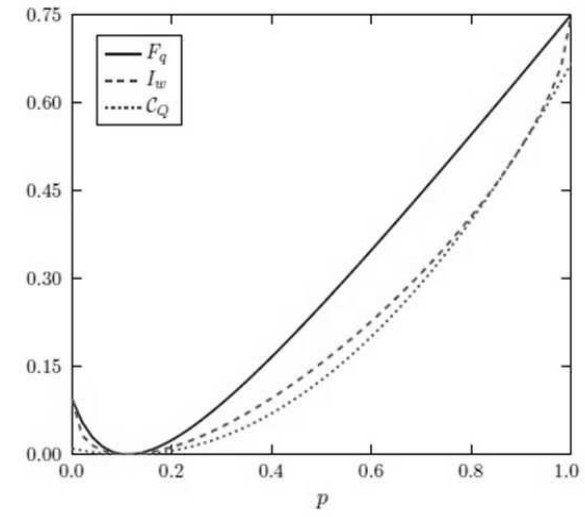
전체 청구항 수 : 총 22 항 심사관 : 신상길

(54) 발명의 명칭 **혼합 상태 양자 계측에서 측정 기반 양자 상관 측정 방법**

(57) 요 약

본 발명에 따른 혼합 상태 양자 측정 방법이 제공된다. 상기 방법은 다분 큐빗 시스템(multipartie qubit system)을 구성하는 양자 기기에 의해 수행되고, 상기 다분 큐빗 시스템의 제1 양자 기기와 제2 양자 기기와의 양자 상관(quantum correlation) $Q(\rho_{AB})$을 측정하는 측정 기반 양자 상관 (MbQC: measurement-based quantum correlations) 측정 단계; 상기 양자 상관 측정의 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$의 임계치 초과 여부를 판단하는 양자 상관 최대치 판단 단계; 및 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 상기 임계치를 초과하면, 상기 양자 상관 측정에 의해 유도되는 교란에 대하여 혼합 상태의 교란 민감도(perturbation sensitivity)에 관한 정보를 획득하는 교란 민감도 획득 단계를 포함하여, 혼합-상태 양자 계측(mixed-state quantum metrology)에서 측정-기반 양자 상관(measurement-based quantum correlation)을 이용한 혼합 상태 양자 측정 방법을 제공할 수 있다.

대 표 도 - 도3



이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711088552
부처명 과학기술정보통신부
연구관리전문기관 한국연구재단
연구사업명 이공분야기초연구사업/중견연구자지원사업
연구과제명 양자 초얽힘을 이용한 하이브리드 양자통신 핵심기술 연구
기 여 율 1/2
주관기관 경희대학교 산학협력단
연구기간 2016.06.01 ~ 2019.05.31
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1345281569
부처명 교육부
연구관리전문기관 한국연구재단
연구사업명 개인기초연구
연구과제명 반사실적 통신 핵심기술 연구
기 여 율 1/2
주관기관 경희대학교 산학협력단
연구기간 2018.06.01 ~ 2021.05.31

공지예외적용 : 있음

명 세 서

청구범위

청구항 1

혼합 상태 양자 측정 방법에 있어서, 상기 방법은 다분 큐빗 시스템(multipartie qubit system)을 구성하는 양자 기기에 의해 수행되고,

상기 다분 큐빗 시스템의 제1 양자 기기와 제2 양자 기기와의 양자 상관(quantum correlation) $Q(\rho_{AB})$을 측정하는 측정 기반 양자 상관 (MbQC: measurement-based quantum correlations) 측정 단계;

상기 양자 상관 측정의 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$의 임계치 초과 여부를 판단하는 양자 상관 최대치 판단 단계;

상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 상기 임계치를 초과하면, 상기 양자 상관 측정에 의해 유도되는 교란에 대하여 혼합 상태의 교란 민감도(perturbation sensitivity)에 관한 정보를 획득하는 교란 민감도 획득 단계를 포함하는, 혼합 상태 양자 측정 방법.

청구항 2

제1 항에 있어서,

상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 상기 임계치를 초과하지 않으면, 상기 양자 상관의 bona fide 측정 요구사항 만족 여부를 판단하는 bona fide 측정 판단 단계를 더 포함하는, 혼합 상태 양자 측정 방법.

청구항 3

제2 항에 있어서,

상기 bona fide 측정 판단 단계에서,

상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 0이면, 상기 제1 양자 기기와 상기 제2 양자 기기를 서로 독립된 제1 서브시스템 및 제2 서브 시스템으로 분리 가능한 곱 상태(product state)라고 판단하는, 혼합 상태 양자 측정 방법.

청구항 4

제3 항에 있어서,

상기 bona fide 측정 판단 단계에서,

$C_Q((U_A \otimes U_B)\rho_{AB}(U_A \otimes U_B)) = C_Q(\rho_{AB})$를 만족하면, 로컬 유니터리 연산 하에서 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템을 불변(invariant) 시스템으로 판단하고, 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 상기 분리 가능한 곱 상태(product state)가 지속되는 것으로 판단하고,

여기서 $U_A \otimes U_A$는 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 로컬 유니터리 연산자인 것을 특징으로 하는, 혼합 상태 양자 측정 방법.

청구항 5

제3 항에 있어서,

상기 측정된 양자 상관으로부터 상기 교란 민감도를 보정하여, 실제 양자 상관을 추정하는 실제 양자 상관 추정 단계를 더 포함하고,

상기 실제 양자 상관 추정 단계에서, 상기 교란 민감도와 연관된 스큐 정보인 $I_\omega(\rho_{AB})$를 이용하여 로컬 quantum Fisher information (QFI)를 추정하는, 혼합 상태 양자 측정 방법.

청구항 6

제5 항에 있어서,

상기 로컬 quantum Fisher information (QFI) Fq(ρ_{AB})는

$I_w(\rho_{AB}) \leq \frac{F_Q(\rho_{AB})}{4} \leq 2I_w(\rho_{AB})$ 및 $F_q(\rho_{AB}) \overset{(a)}{\geq} I_w\left(\rho_{AB}^{\phi}\right) \overset{(b)}{=} I_w(\rho_{AB}) \overset{(c)}{\geq} C_Q(\rho_{AB}), \quad \forall \rho_{AB}$ 를 이용하여 추정되고,

여기서 ρ^{ϕ}_{AB}는 $_{AB}$에 유니터리 연산(U^{ϕ})을 적용하여 $\rho^{\phi}_{AB} = U^{\phi}\ \rho_{AB}\ U^{\phi}$로 연산되는, 혼합 상태 양자 측정 방법.

청구항 7

제5 항에 있어서,

상기 추정된 로컬 quantum Fisher information (QFI) Fq(ρ_{AB}) 및 상기 스큐 정보 $I_\omega(\rho_{AB})$를 이용하여, 상기 제1 및 제2 서브 시스템의 분리 가능 여부를 판단하는 서브 시스템 분리 가능 여부 판단 단계를 더 포함하고,

상기 서브 시스템 분리 가능 여부 판단 단계에서, 상기 추정된 QFI Fq(ρ_{AB})가 제2 임계치 이하이면, 상기 제1 및 제2 서브 시스템이 분리 가능한 것으로 판단하는, 혼합 상태 양자 측정 방법.

청구항 8

제7 항에 있어서,

상기 제1 및 제2 서브 시스템이 분리 가능한 것으로 판단되면, 이후의 상기 실제 양자 상관 추정 단계에서 다시 추정되는 상기 QFI Fq(ρ_{AB})에 대해,

상기 스큐 정보 $I_\omega(\rho_{AB})$를 고려하지 않고 $Fq\ (\rho_A \otimes \rho_B, H) = Fq\ (\rho_A) + Fq\ (\rho_B)$에 의해, 상기 제1 서브시스템의 QFI와 상기 제2 서브 시스템의 QFI의 합으로 결정하고,

여기서, $\otimes$는 로컬 측정에 의해 유도되는 상기 스큐 정보를 생성하기 위한 연산자이고, H는 N개의 큐빗에 작용하는 Pauli x, y, z 연산자의 합을 나타내는, 혼합 상태 양자 측정 방법.

청구항 9

혼합 상태 양자 측정 방법에 있어서, 상기 방법은 다분 큐빗 시스템(multipartie qubit system)을 구성하는 양자 기기에 의해 수행되고,

상기 다분 큐빗 시스템의 제1 서브 시스템과 제2 서브 시스템 간의 양자 상관(quantum correlation) Q(ρ_{AB})을 측정하는 측정 기반 양자 상관 (MbQC: measurement-based quantum correlations) 측정 단계;

상기 양자 상관 측정에 의해 유도되는 교란에 대하여 혼합 상태의 교란 민감도(perturbation sensitivity)에 관한 정보를 획득하는 교란 민감도 획득 단계;

상기 측정된 양자 상관으로부터 상기 교란 민감도를 보정하여, 실제 양자 상관을 추정하는 실제 양자 상관 추정 단계; 및

상기 추정된 실제 양자 상관을 이용하여, 상기 제1 및 제2 서브 시스템의 분리 가능 여부를 판단하는 서브 시스템 분리 가능 여부 판단 단계를 포함하는, 혼합 상태 양자 측정 방법.

청구항 10

제9 항에 있어서,

상기 양자 상관 측정 단계 이후, 상기 양자 상관 측정의 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$의 임계치 초과 여부를 판단하는 양자 상관 최대치 판단 단계를 더 포함하고,

상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 상기 임계치를 초과하지 않으면, 상기 양자 상관의 bona fide 측정 요구사항 만족 여부를 판단하는 bona fide 측정 판단 단계를 더 포함하는, 혼합 상태 양자 측정 방법.

청구항 11

제10 항에 있어서,

상기 bona fide 측정 판단 단계에서,

상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 0이면, 제1 양자 기기와 제2 양자 기기를 서로 독립된 제1 서브시스템 및 제2 서브 시스템으로 분리 가능한 곱 상태(product state)라고 판단하고,

$C_Q((U_A \otimes U_B)\rho_{AB}(U_A \otimes U_B)) = C_Q(\rho_{AB})$를 만족하면, 로컬 유니터리 연산 하에서 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템을 불변(invariant) 시스템으로 판단하고, 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 상기 분리 가능한 곱 상태(product state)가 지속되는 것으로 판단하고,

여기서 $U_A \otimes U_A$는 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 로컬 유니터리 연산자인 것을 특징으로 하는, 혼합 상태 양자 측정 방법.

청구항 12

다분 큐빗 시스템(multipartie qubit system) 기반 양자 시스템에서 혼합 상태 양자 측정을 수행하는 양자 기기에 있어서,

상기 다분 큐빗 시스템의 제1 양자 기기 및 제2 양자 기기와 양자 정보를 송수신하도록 구성된 인터페이스부;

상기 제1 양자 기기와 상기 제2 양자 기기와의 양자 상관(quantum correlation) $Q(\rho_{AB})$을 측정하는 측정 기반 양자 상관 (MbQC: measurement-based quantum correlations)을 수행하고,

상기 양자 상관 측정의 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$의 임계치 초과 여부를 판단하고,

상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 상기 임계치를 초과하면, 상기 양자 상관 측정에 의해 유도되는 교란에 대하여 혼합 상태의 교란 민감도(perturbation sensitivity)에 관한 정보를 획득하도록 구성된 제어부를 포함하는, 양자 기기.

청구항 13

제12 항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 상기 임계치를 초과하지 않으면, 상기 양자 상관의 bona fide 측정 요구사항 만족 여부를 판단하도록 더 구성되는, 양자 기기.

청구항 14

제13 항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 0이면, 상기 제1 양자 기기와 상기 제2 양자 기기를 서로 독립된 제1 서브시스템 및 제2 서브 시스템으로 분리 가능한 곱 상태(product state)라고 판단하는, 양자 기기.

청구항 15

제14 항에 있어서,

상기 제어부는,

$C_Q((U_A \otimes U_B)\rho_{AB}(U_A \otimes U_B)) = C_Q(\rho_{AB})$를 만족하면, 로컬 유니터리 연산 하에서 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템을 불변(invariant) 시스템으로 판단하고, 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 상기

분리 가능한 곱 상태(product state)가 지속되는 것으로 판단하고,

여기서 $U_A \otimes U_A$는 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 로컬 유니터리 연산자인 것을 특징으로 하는, 양자 기기.

청구항 16

제14 항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 측정된 양자 상관으로부터 상기 교란 민감도를 보정하여, 실제 양자 상관을 추정하도록 더 구성되고,

상기 실제 양자 상관을 추정하는 경우, 상기 교란 민감도와 연관된 스큐 정보인 $I_\omega(\rho_{AB})$를 이용하여 로컬 quantum Fisher information (QFI)를 추정하는, 양자 기기.

청구항 17

제16 항에 있어서,

상기 제어부는,

$I_w(\rho_{AB}) \leq \frac{F_Q(\rho_{AB})}{4} \leq 2I_w(\rho_{AB})$ 및 $F_q(\rho_{AB}) \overset{(a)}{\geq} I_w\left(\rho_{AB}^{\phi}\right) \overset{(b)}{=} I_w(\rho_{AB}) \overset{(c)}{\geq} C_Q(\rho_{AB}), \quad \forall \rho_{AB}$를 이용하여 상기 로컬 quantum Fisher information (QFI) $F_q(\rho_{AB})$를 추정하고,

여기서 ρ^{ϕ}_{AB}는 ρ_{AB}에 유니터리 연산(U^{ϕ})을 적용하여 $\rho^{\phi}_{AB} = U^{\phi} \rho_{AB} U^{\phi\dagger}$로 연산되는, 양자 기기.

청구항 18

제16 항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 추정된 로컬 quantum Fisher information (QFI) $F_q(\rho_{AB})$ 및 상기 스큐 정보 $I_\omega(\rho_{AB})$를 이용하여, 상기 제1 및 제2 서브 시스템의 분리 가능 여부를 판단하도록 더 구성되고,

상기 추정된 QFI $F_q(\rho_{AB})$가 제2 임계치 이하이면, 상기 제1 및 제2 서브 시스템이 독립적으로 동작하도록 상기 제1 및 제2 서브 시스템을 분리하여 제어하는, 양자 기기.

청구항 19

제18 항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 제1 및 제2 서브 시스템이 분리 가능한 것으로 판단되면, 이후의 상기 실제 양자 상관 추정을 통해 다시 추정되는 상기 QFI $F_q(\rho_{AB})$에 대해,

상기 스큐 정보 $I_\omega(\rho_{AB})$를 고려하지 않고 $F_q(\rho_A \otimes \rho_B, H) = F_q(\rho_A) + F_q(\rho_B)$에 의해, 상기 제1 서브시스템의 QFI와 상기 제2 서브 시스템의 QFI의 합으로 결정하고,

여기서, $\otimes$는 로컬 측정에 의해 유도되는 상기 스큐 정보를 생성하기 위한 연산자이고, H는 N개의 큐빗에 작용하는 Pauli x, y, z 연산자의 합을 나타내는, 양자 기기.

청구항 20

다분 큐빗 시스템(multipartie qubit system) 기반 양자 시스템에서 혼합 상태 양자 측정을 수행하는 양자 기기에 있어서,

상기 다분 큐빗 시스템의 제1 서브 시스템 및 제2 서브 시스템 간의 양자 정보를 송수신하도록 구성된 인터페이스부;

상기 제1 서브 시스템과 상기 제2 서브 시스템 간의 양자 상관(quantum correlation) $Q(\rho_{AB})$을 측정하는 측정 기반 양자 상관 (MbQC: measurement-based quantum correlations)을 수행하고,

상기 양자 상관 측정에 의해 유도되는 교란에 대하여 혼합 상태의 교란 민감도(perturbation sensitivity)에 관한 정보를 획득하고,

상기 측정된 양자 상관으로부터 상기 교란 민감도를 보정하여, 실제 양자 상관을 추정하고,

상기 추정된 실제 양자 상관을 이용하여, 상기 제1 및 제2 서브 시스템의 분리 가능 여부를 판단하도록 구성된 제어부를 포함하는, 양자 기기.

청구항 21

제20 항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 양자 상관 측정 이후, 상기 양자 상관 측정의 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$의 임계치 초과 여부를 판단하고,

상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 상기 임계치를 초과하지 않으면, 상기 양자 상관의 bona fide 측정 요구사항 만족 여부를 판단하도록 구성된, 양자 기기.

청구항 22

제21 항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 0이면, 제1 양자 기기와 제2 양자 기기를 서로 독립된 제1 서브시스템 및 제2 서브 시스템으로 분리 가능한 곱 상태(product state)라고 판단하고,

$C_Q((U_A \otimes U_B)\rho_{AB}(U_A \otimes U_B)) = C_Q(\rho_{AB})$를 만족하면, 로컬 유니터리 연산 하에서 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템을 불변(invariant) 시스템으로 판단하고, 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 상기 분리 가능한 곱 상태(product state)가 지속되는 것으로 판단하도록 구성되고,

여기서 $U_A \otimes U_A$는 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 로컬 유니터리 연산자인 것을 특징으로 하는, 양자 기기.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 혼합 상태 양자 계측에서 측정 기반 양자 상관 측정 방법에 관한 것이다. 보다 상세하게는, 혼합-상태 양자 계측(mixed-state quantum metrology)에서 측정-기반 양자 상관(measurement-based quantum correlation)을 이용한 혼합 상태 양자 측정 방법 및 이를 이용한 양자통신 시스템에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 양자 상관은 코어 양자 기술의 근간을 형성한다. 기존 상관의 계층 간에, 얽힘(entanglement)은 양자 계측, 양자 암호화 및 양자 정보 처리 분야에서 발전을 위하여 매우 중요하다. 하지만, 얽힘은 혼합 상태의 분리 가능 이슈에 기인하는 혼합 상태의 역할을 완전히 설명할 수 없다는 문제점이 있다. 또한, 얽힘 없이도 비-국부성(nonlocality)가 존재할 수 있다. 모든 상태들이 얽혀 있지는 않지만, 거의 모든 양자 상태들이 교란(disturb)되어 불일치(discord)와 같은 비-일반 효과(nonclassical effects)를 나타낼 수 있다. 양자 불일치는 양자 가속 및 혼합-상태 계측에 중요한 역할을 한다.

[0003] 한편, 양자 계측은 양자 상관을 자원으로 활용하는 높은-정확도의 측정 분야이다. 양자 계측은 일반적으로 4단

계 과정이고, 여기서 양자 프로브가 이분 상태(bipartite state) ρ_{AB}로 준비된다. 한편, QFI(quantum Fisher information)는 계측을 통한 임의의 양자 프로브를 통해 달성 가능한 정확도의 허용 가능한 정량자(quantifier)이다.

[0004] 한편, 분리 가능한 양자 상태는 비-소멸 QFI를 나타내기 때문에, 얽힘은 계측(metrology)에서 양자 상관의 역할을 완전히 설명할 수 없다는 문제점이 있다. 또한, 분리 가능한 상태의 양자 상관으로 인해, 프로브에 의해 나타나는 최소 민감도를 포착(capture)하도록 얽힘의 응용 가능성을 제한한다는 문제점이 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 따라서, 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는, 혼합 상태 양자 측정 방법 및 이를 이용한 양자통신 시스템을 제공하는 것이다.

[0006] 또한, 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는, 혼합-상태 양자 계측(mixed-state quantum metrology)에서 측정-기반 양자 상관(measurement-based quantum correlation)을 이용한 혼합 상태 양자 측정 방법 및 이를 이용한 양자통신 시스템을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0007] 상기와 같은 과제를 해결하기 위한 본 발명에 따른 혼합 상태 양자 측정 방법이 제공된다. 상기 방법은 다분 큐빗 시스템(multipartie qubit system)을 구성하는 양자 기기에 의해 수행되고, 상기 다분 큐빗 시스템의 제1 양자 기기와 제2 양자 기기와의 양자 상관(quantum correlation) $Q(\rho_{AB})$을 측정하는 측정 기반 양자 상관 (MbQC: measurement-based quantum correlations) 측정 단계; 상기 양자 상관 측정의 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$의 임계치 초과 여부를 판단하는 양자 상관 최대치 판단 단계; 및 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 상기 임계치를 초과하면, 상기 양자 상관 측정에 의해 유도되는 교란에 대하여 혼합 상태의 교란 민감도(perturbation sensitivity)에 관한 정보를 획득하는 교란 민감도 획득 단계를 포함하여, 혼합-상태 양자 계측(mixed-state quantum metrology)에서 측정-기반 양자 상관(measurement-based quantum correlation)을 이용한 혼합 상태 양자 측정 방법을 제공할 수 있다.

[0008] 일 실시 예에서, 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 상기 임계치를 초과하지 않으면, 상기 양자 상관의 bona fide 측정 요구사항 만족 여부를 판단하는 bona fide 측정 판단 단계를 더 포함할 수 있다.

[0009] 일 실시 예에서, 상기 bona fide 측정 판단 단계에서, 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 0이면, 상기 제1 양자 기기와 상기 제2 양자 기기를 서로 독립된 제1 서브시스템 및 제2 서브 시스템으로 분리 가능한 곱 상태(product state)라고 판단할 수 있다.

[0010] 일 실시 예에서, 상기 bona fide 측정 판단 단계에서, $C_Q((U_A \otimes U_B)\rho_{AB}(U_A \otimes U_B)) = C_Q(\rho_{AB})$를 만족하면, 로컬 유니터리 연산 하에서 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템을 불변(invariant) 시스템으로 판단하고, 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 상기 분리 가능한 곱 상태(product state)가 지속되는 것으로 판단할 수 있다. 여기서 $U_A \otimes U_B$는 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 로컬 유니터리 연산자이다.

[0011] 일 실시 예에서, 상기 측정된 양자 상관으로부터 상기 교란 민감도를 보정하여, 실제 양자 상관을 추정하는 실제 양자 상관 추정 단계를 더 포함하고, 상기 실제 양자 상관 추정 단계에서, 상기 교란 민감도와 연관된 스큐 정보인 $I_\omega(\rho_{AB})$를 이용하여 로컬 quantum Fisher information (QFI)를 추정할 수 있다.

[0012] 일 실시 예에서, 상기 로컬 quantum Fisher information (QFI) $Fq(\rho_{AB})$는 $I_w(\rho_{AB}) \le \frac{F_Q(\rho_{AB})}{4} \le 2I_w(\rho_{AB})$ 및 $F_q(\rho_{AB}) \overset{(a)}{\ge} I_w\left(\rho_{AB}^{\phi}\right) \overset{(b)}{=} I_w(\rho_{AB}) \overset{(c)}{\ge} C_Q(\rho_{AB}), \quad \forall \rho_{AB}$를 이용하여 추정되고, 여기서 ρ^{ϕ}_{AB}는 ρ_{AB}에 유니터리 연산(U^{ϕ})을 적용하여 $\rho^{\phi}_{AB} = U^{\phi}\rho_{AB}U^{\phi}$로 연산될 수 있다.

[0013] 일 실시 예에서, 상기 추정된 로컬 quantum Fisher information (QFI) Fq(ρ_{AB}) 및 상기 스큐 정보 Iω(ρ_{AB})를 이용하여, 상기 제1 및 제2 서브 시스템의 분리 가능 여부를 판단하는 서브 시스템 분리 가능 여부 판단 단계를 더 포함하고, 상기 서브 시스템 분리 가능 여부 판단 단계에서, 상기 추정된 QFI Fq(ρ_{AB})가 제2 임계치 이하이면, 상기 제1 및 제2 서브 시스템이 분리 가능한 것으로 판단할 수 있다.

[0014] 일 실시 예에서, 상기 제1 및 제2 서브 시스템이 분리 가능한 것으로 판단되면, 이후의 상기 실제 양자 상관 추정 단계에서 다시 추정되는 상기 QFI Fq(ρ_{AB})에 대해, 상기 스큐 정보 Iω(ρ_{AB})를 고려하지 않고 Fq ($\rho_A \otimes \rho_B$, H) = Fq (ρ_A) + Fq (ρ_B)에 의해, 상기 제1 서브시스템의 QFI와 상기 제2 서브 시스템의 QFI의 합으로 결정할 수 있다. 여기서, $\otimes$는 로컬 측정에 의해 유도되는 상기 스큐 정보를 생성하기 위한 연산자이고, H는 N개의 큐빗에 작용하는 Pauli x, y, z 연산자의 합을 나타낸다.

[0015] 본 발명의 다른 양상에 따른 혼합 상태 양자 측정 방법에 있어서, 상기 방법은 다분 큐빗 시스템(multipartie qubit system)을 구성하는 양자 기기에 의해 수행되고, 상기 다분 큐빗 시스템의 제1 서브 시스템과 제2 서브 시스템 간의 양자 상관(quantum correlation) Q(ρ_{AB})을 측정하는 측정 기반 양자 상관 (MbQC: measurement-based quantum correlations) 측정 단계를 수행한다.또한, 상기 방법은, 상기 양자 상관 측정에 의해 유도되는 교란에 대하여 혼합 상태의 교란 민감도(perturbation sensitivity)에 관한 정보를 획득하는 교란 민감도 획득 단계; 기 측정된 양자 상관으로부터 상기 교란 민감도를 보정하여, 실제 양자 상관을 추정하는 실제 양자 상관 추정 단계; 및 상기 추정된 실제 양자 상관을 이용하여, 상기 제1 및 제2 서브 시스템의 분리 가능 여부를 판단하는 서브 시스템 분리 가능 여부 판단 단계를 더 포함한다.

[0016] 일 실시 예에서, 상기 양자 상관 측정 단계 이후, 상기 양자 상관 측정의 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$의 임계치 초과 여부를 판단하는 양자 상관 최대치 판단 단계를 더 포함하고, 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 상기 임계치를 초과하지 않으면, 상기 양자 상관의 bona fide 측정 요구사항 만족 여부를 판단하는 bona fide 측정 판단 단계를 더 포함할 수 있다.

[0017] 일 실시 예에서, 상기 bona fide 측정 판단 단계에서, 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 0이면, 상기 제1 양자 기기와 상기 제2 양자 기기를 서로 독립된 제1 서브시스템 및 제2 서브 시스템으로 분리 가능한 곱 상태(product state)라고 판단하고, $C_Q((U_A \otimes U_B)\rho_{AB}(U_A \otimes U_B)) = C_Q(\rho_{AB})$를 만족하면, 로컬 유니터리 연산 하에서 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템을 불변(invariant) 시스템으로 판단하고, 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 상기 분리 가능한 곱 상태(product state)가 지속되는 것으로 판단할 수 있다. 여기서 UA$\otimes$UA는 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 로컬 유니터리 연산자이다.

[0018] 본 발명에 또 다른 양상에 따른 다분 큐빗 시스템(multipartie qubit system) 기반 양자 시스템에서 혼합 상태 양자 측정을 수행하는 양자 기기가 제공된다. 상기 양자 기기는 상기 다분 큐빗 시스템의 제1 양자 기기 및 제2 양자 기기와 양자 정보를 송수신하도록 구성된 인터페이스부를 구비한다. 또한, 상기 양자 기기는, 상기 제1 양자 기기와 상기 제2 양자 기기와의 양자 상관(quantum correlation) Q(ρ_{AB})을 측정하는 측정 기반 양자 상관 (MbQC: measurement-based quantum correlations)을 수행하고, 상기 양자 상관 측정의 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$의 임계치 초과 여부를 판단하고, 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 상기 임계치를 초과하면, 상기 양자 상관 측정에 의해 유도되는 교란에 대하여 혼합 상태의 교란 민감도(perturbation sensitivity)에 관한 정보를 획득하도록 구성된 제어부를 더 포함한다.

[0019] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 상기 임계치를 초과하지 않으면, 상기 양자 상관의 bona fide 측정 요구사항 만족 여부를 판단하도록 더 구성될 수 있다.

[0020] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 0이면, 상기 제1 양자 기기와 상기 제2 양자 기기를 서로 독립된 제1 서브시스템 및 제2 서브 시스템으로 분리 가능한 곱 상태(product state)라고 판단할 수 있다.

[0021] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, $C_Q((U_A \otimes U_B)\rho_{AB}(U_A \otimes U_B)) = C_Q(\rho_{AB})$를 만족하면, 로컬 유니터리 연산 하에서 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템을 불변(invariant) 시스템으로 판단하고, 상기 제1 서브시스템

및 상기 제2 서브 시스템 간 상기 분리 가능한 곱 상태(product state)가 지속되는 것으로 판단할 수 있다. 여기서 $U_A \otimes U_A$는 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 로컬 유니터리 연산자이다.

[0022] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 상기 측정된 양자 상관으로부터 상기 교란 민감도를 보정하여, 실제 양자 상관을 추정하도록 더 구성되고, 상기 실제 양자 상관을 추정하는 경우, 상기 교란 민감도와 연관된 스큐 정보인 $I_\omega(\rho_{AB})$를 이용하여 로컬 quantum Fisher information (QFI)를 추정할 수 있다.

[0023] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, $I_w(\rho_{AB}) \le \frac{F_Q(\rho_{AB})}{4} \le 2I_w(\rho_{AB})$ 및 $F_q(\rho_{AB}) \overset{(a)}{\ge} I_w\left(\rho_{AB}^{\phi}\right) \overset{(b)}{=} I_w(\rho_{AB}) \overset{(c)}{\ge} \mathcal{C}_Q(\rho_{AB}), \quad \forall \rho_{AB}$를 이용하여 상기 로컬 quantum Fisher information (QFI) $Fq(\rho_{AB})$를 추정하고, 여기서 ρ^{ϕ}_{AB}는 $_{AB}$에 유니터리 연산(U^{ϕ})을 적용하여 $\rho^{\phi}_{AB} = U^{\phi}\ \rho_{AB}\ U^{\phi}$로 연산될 수 있다.

[0024] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 상기 추정된 로컬 quantum Fisher information (QFI) $Fq(\rho_{AB})$ 및 상기 스큐 정보 $I_\omega(\rho_{AB})$를 이용하여, 상기 제1 및 제2 서브 시스템의 분리 가능 여부를 판단하도록 더 구성될 수 있다. 한편, 상기 추정된 QFI $Fq(\rho_{AB})$가 제2 임계치 이하이면, 상기 제1 및 제2 서브 시스템이 독립적으로 동작하도록 상기 제1 및 제2 서브 시스템을 분리하여 제어할 수 있다.

[0025] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 상기 제1 및 제2 서브 시스템이 분리 가능한 것으로 판단되면, 이후의 상기 실제 양자 상관 추정을 통해 다시 추정되는 상기 QFI $Fq(\rho_{AB})$에 대해, 상기 스큐 정보 $I_\omega(\rho_{AB})$를 고려하지 않고 $Fq(\rho_A \otimes \rho_B, H) = Fq(\rho_A) + Fq(\rho_B)$에 의해, 상기 제1 서브시스템의 QFI와 상기 제2 서브 시스템의 QFI의 합으로 결정할 수 있다. 여기서, $\otimes$는 로컬 측정에 의해 유도되는 상기 스큐 정보를 생성하기 위한 연산자이고, H는 N개의 큐빗에 작용하는 Pauli x, y, z 연산자의 합을 나타낸다.

[0026] 본 발명의 또 다른 양상에 따른 다분 큐빗 시스템(multipartie qubit system) 기반 양자 시스템에서 혼합 상태 양자 측정을 수행하는 양자 기기가 제공된다. 상기 양자 기기는 상기 다분 큐빗 시스템의 제1 서브 시스템 및 제2 서브 시스템 간의 양자 정보를 송수신하도록 구성된 인터페이스부를 구비한다. 또한, 상기 양자 기기는 상기 제1 서브 시스템과 상기 제2 서브 시스템 간의 양자 상관(quantum correlation) $Q(\rho_{AB})$을 측정하는 측정 기반 양자 상관 (MbQC: measurement-based quantum correlations)을 수행하고, 상기 양자 상관 측정에 의해 유도되는 교란에 대하여 혼합 상태의 교란 민감도(perturbation sensitivity)에 관한 정보를 획득하고, 상기 측정된 양자 상관으로부터 상기 교란 민감도를 보정하여, 실제 양자 상관을 추정하고, 상기 추정된 실제 양자 상관을 이용하여, 상기 제1 및 제2 서브 시스템의 분리 가능 여부를 판단하도록 구성된 제어부를 더 포함한다.

[0027] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 상기 양자 상관 측정 이후, 상기 양자 상관 측정의 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$의 임계치 초과 여부를 판단하고, 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 상기 임계치를 초과하지 않으면, 상기 양자 상관의 bona fide 측정 요구사항 만족 여부를 판단하도록 구성될 수 있다.

[0028] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 0이면, 상기 제1 양자 기기와 상기 제2 양자 기기를 서로 독립된 제1 서브시스템 및 제2 서브 시스템으로 분리 가능한 곱 상태(product state)라고 판단하고, $\mathcal{C}_Q((U_A \otimes U_B)\rho_{AB}(U_A \otimes U_B)) = \mathcal{C}_Q(\rho_{AB})$를 만족하면, 로컬 유니터리 연산 하에서 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템을 불변(invariant) 시스템으로 판단하고, 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 상기 분리 가능한 곱 상태(product state)가 지속되는 것으로 판단하도록 구성될 수 있다. 여기서 $U_A \otimes U_A$는 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 로컬 유니터리 연산자이다.

발명의 효과

[0029] 본 발명의 적어도 일 실시예에 따르면, 측정-기반 양자 상관(measurement-based quantum correlation)을 이용한 혼합 상태 양자 측정 방법을 제공하여, 임의의 양자 상태에 대하여 정확한 측정을 수행할 수 있다는 장점이 있다.

[0030] 또한, 본 발명의 적어도 일 실시예에 따르면, MbQC의 자원 이용을 통해 로컬 von Neumann 측정에 의해 유발되는 교란에 대하여 혼합 상태의 계측 민감도에 대하여 직관성을 제공할 수 있다는 장점이 있다.

도면의 간단한 설명

[0031] 도 1은 본 발명에 따른 다분 큐빗 시스템 기반 양자 시스템을 도시한다.

도 2는 본 발명에 따른 서브 시스템 (또는 양자 기기)의 상세 구성을 도시한다.

도 3은 본 발명의 일 실시 예에 따른 d = 3으로 파리미터화된 등방 상태에 대하야. p의 변화에 따른 Fq, C_Q 및 Iw를 나타낸다.

도 4는 본 발명의 다를 실시예에 따른 d = 3으로 파리미터화된 Werner 상태에 대하여, p의 변화에 따른 Fq, C_Q 및 Iw를 나타낸다.

도 5는 본 발명의 일 실시 예에 따른 Bell-대각 상태에 대한 파리마터 p의 함수로서 F_Q, C_Q 및 I_ω를 나타낸다.

도 6은 본 발명의 다른 실시 예에 따른 비-선형 커플링 Hamiltonian에 대하여 Fq (ρ)가 SQL을 초과하는 경우, 곱 상태에 대한 k의 함수로서 QFI를 나타낸다.

도 7은 본 발명에 따른 혼합 상태 양자 측정 방법의 흐름도를 나타낸다.

도 8은 본 발명의 다른 실시 예에 따른 혼합 상태 양자 측정 방법의 흐름도를 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0032] 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.

[0033] 각 도면을 설명하면서 유사한 참조부호를 유사한 구성요소에 대해 사용한다.

[0034] 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.

[0035] 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.

[0036] 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.

[0037] 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.

[0038] 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.

[0039] 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.

[0040] 이하, 본 발명에 따른 혼합 상태 양자 측정 방법 및 이를 이용한 양자통신 시스템에 대해 살펴보기로 하자. 보

다 상세하게는, 혼합-상태 양자 계측(mixed-state quantum metrology)에서 측정-기반 양자 상관(measurement-based quantum correlation)을 이용한 혼합 상태 양자 측정 방법 및 이를 이용한 양자통신 시스템에 대해 살펴보기로 하자.

[0041] 도 1은 본 발명에 따른 다분 큐빗 시스템 기반 양자 시스템을 도시한다. 도 1(a)에 도시된 바와 같이, 양자 시스템은 복수의 서브 시스템을 포함하고, 편의상 제1 서브 시스템(100), 제2 서브 시스템(200) 및 제3 서브 시스템(300)이 포함된 것으로 표현할 수 있다. 하지만, 상기 제1 내지 제3 서브 시스템(100 내지 300)에만 한정되는 것이 아니라, 임의의 개수의 서브 시스템 간에도 적용될 수 있다.

[0042] 또한, 도 1(b)에 도시된 바와 같은, 양자 시스템은 복수의 양자 기기를 포함하고, 편의상 제1 양자 기기(100)와 제2 양자 기기(200) 및 및 제3 양자 기기(300)가 포함된 것으로 표현할 수 있다. 여기서, 제1 양자 기기(100)와 제2 양자 기기(200)는 송신 기기와 수신 기기일 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다. 이때, 제2 양자 기기(200)가 제1 양자 기기(100)로 송신하는 경우, 제1 양자 기기(100)와 제2 양자 기기(200)는 각각 수신 기기와 송신 기기로 동작할 수 있다. 한편, 제3 양자 기기(300)는 제1 및 제2 양자 기기(200)를 제어하는 양자 기기일 수 있다.

[0043] 한편, 도 2는 본 발명에 따른 서브 시스템 (또는 양자 기기)의 상세 구성을 도시한다. 여기서, 제1 서브 시스템(100)과 제2 서브 시스템(200) 이외에 제3 서브 시스템(300)도 동일/유사하게 구성될 수 있다.

[0044] 도 2에 도시된 바와 같이, 제1 서브 시스템(100)은 인터페이스부(110), 제어부(120) 및 메모리(130)를 포함한다. 또한, 제2 서브 시스템(200)은 인터페이스부(210), 제어부(220) 및 메모리(230)를 포함한다. 또한, 제3 서브 시스템(300)은 인터페이스부(310), 제어부(320) 및 메모리(330)를 포함한다. 여기서, 인터페이스부(110, 210, 310)는 양자 채널(quantum channel)을 이용하는 양자 인터페이스부일 수 있다. 또한, 인터페이스부((110, 210, 310)는 일반 채널(classical channel)을 이용하는 일반 인터페이스부를 포함할 수 있다. 한편, 메모리(130, 230)는 양자 정보를 저장하는 양자 메모리일 수 있다. 또한, 메모리(130, 230, 330)는 일반 정보를 제정하는 일반 메모리를 포함할 수 있다.

[0045] 한편, 도 1(b)에 도시된 제1 내지 제3 양자 기기(100 내지 300)의 경우에도, 도 2에 도시된 바와 같이 인터페이스부(110 내지 310), 제어부(120 내지 320) 및 메모리(130 내지 333)를 포함하도록 구성될 수 있다.

[0046] 이하에서는 본 발명에 따른 혼합 상태 양자 측정 방법, 보다 상세하게는 양자 계측의 측정-기반 양자 상관 방법에 대해 살펴보기로 한다.

[0047] 이와 관련하여, 분리 가능한 상태는 비-소멸 QFI를 나타내기 때문에, 얽힘은 계측(metrology)에서 양자 상관의 역할을 완전히 설명할 수 없다는 문제점이 있다. 또한, 분리 가능한 상태의 양자 상관으로 인해, 프로브에 의해 나타나는 최소 민감도를 포착(capture)하도록 얽힘의 응용 가능성을 제한한다는 문제점이 있다. 이에 따라, 본 발명에서는 코히어런스(coherence)와 불일치(discord)와 같은 대안적인 측정을 통해 계측의 최소 달성 가능한 정확도를 보장할 수 있다. 유사하게, 정확도 면에서 직교 양자 향상(quadratic quantum enhancement)은 상태 준비(state preparation)에 대한 특정 양자 전략을 채택하여 얽힘 없이도 계측을 계속할 수 있다. 한편, 최근의 측정(state-of-the-art measures)과 차이를 나타내는 로컬 von Neumann 측정의 결과로서 비-대상 상태들(non-commuting states)에 기반하는 상관 측정을 고려할 수 있다. 따라서, 본 발명에서는 계측 중요도를 위한 자원으로서 이러한 상관의 결합(link)를 수립하고 연구할 필요가 있다.

[0048] 접근법 및 성능 지수(figure of merit)는 이분 상태 ρ_{AB}의 로컬 측정 $K = \Pi_A^k \otimes I_B$ 에 의해 유도되는 불확실성으로 정의되는 스큐 정보(skew information)로, 수학식 1로 정의될 수 있다.

수학식 1

[0049] $$I_w(\rho_{AB}, K) = -\frac{1}{2}\mathrm{Tr}\left(\left[\sqrt{\rho_{AB}}, K\right]^2\right)$$

[0050] 이는 $\rho_{AB} = \sum_i p_i |i\rangle\langle i|_A \otimes \rho_B^{(i)}$ 의 형태의 일반(classical)-일반 또는 일반-양자 상태에 대해 소멸(vanish)되는 양자 상관 측정(quantum coherence measure)으로도 지칭된다. 여기서,

$\rho_{AB} = \sum_i p_i |i\rangle\langle i|_A \otimes \rho_B^{(i)}$ 는 A의 정규직교 기저(orthonormal basis)로서 $\{i\rangle_A\}$ 및 B의 임의의 상태로서 $\rho_B^{(i)}$를 갖는다. 이러한 상태는 더 엄격하게 분리가능한 상태들의 서브세트, 즉 $\rho_{AB} = \sum_i p_i \rho_A^{(i)} \otimes \rho_B^{(i)}$ 로서 곱 상태의 컨벡스 조합(convex combination of product states)를 형성한다. 또한, 컨커런스의 스큐 정보-기반 측정, 컨커런스, 불일치(discord) 및 측정-유도 비국부성(measurement-induced nonlocality)이 양자 계측 분야에 광범위하게 활용될 수 있다. 스큐 정보 및 QFI는 일반 Fisher 정보의 양자 확장이다. 관련된 계측 성능 지수는 수학식 2에 의해 판단될 수 있다.

수학식 2

[0051]
$$I_w(\rho_{AB}) \leq \frac{F_Q(\rho_{AB})}{4} \leq 2I_w(\rho_{AB})$$

[0052] 로컬 QFI는 $F_q(\rho_{AB}, H) = F_Q(\rho_{AB})/4$ 와 같이 QFI에 관련되고, 이는 수학식 3으로 표현 가능하다.

수학식 3

[0053]
$$F_q(\rho_{AB}, H) = \mathrm{Tr}\left(\rho H^2\right) - \sum_{i \neq j} \frac{2\lambda_i \lambda_j}{\lambda_i + \lambda_j} |\langle i|H|j\rangle|^2$$

[0054] 여기서, λ_i 및 $|i\rangle$는 각각 ρ_{AB}의 고유값 및 고유벡터이다. 로컬 Hamiltonians의 세트에 대해 최소화가 이루어지면, 로컬 QFI는 양자 인터페로메트릭 파워 (QIP; quantum interferometric power)가 된다. 또한, QIP는 양자-상관 상태에 의해 전달(inherit)되는 양자 불일치 량에 해당한다.

[0055] **측정-기반 양자 상관 측정**

[0056] 일반 채널과 달리, 양자 채널에는 대상(party) A가 측정을 수행하면, 대상 B의 로컬 상태가 변화하기 쉽다는 현상이 있다. 이러한 특성에 기반하여, 임의의 이분 상태에 대한 양자 상관 측정이 수학식 4로 정의될 수 있다.

수학식 4

[0057]
$$\mathcal{Q}(\rho_{AB}) = \sup_{\Pi_A^k} \sum_k p_k \left\| \rho_B - \rho_B^k \right\|_2^2$$

[0058] 여기서, ρ_B 및 는 ρ_B^k는 각각 로컬 측정 이전과 이후의 감소된 상태이고, 각각 수학식 5 및 6으로 표현될 수 있다.

수학식 5

[0059]
$$\rho_B = \mathrm{Tr}_A(\rho_{AB})$$

수학식 6

[0060]
$$\rho_B^k = \frac{1}{p_k} \mathrm{Tr}_A\left(\left(\Pi_A^k \otimes I_B\right) \rho_{AB} \left(\Pi_A^k \otimes I_B\right)\right)$$

[0061] 여기서, $\|\cdot\|$는 $\|Y\|_2 = [\mathrm{Tr}(Y^\dagger Y)]^{1/2}$로 정의되는 Hilbert-Shmidt norm이고, k는 수학식 7로 표현될 수 있다.

수학식 7

[0062] $$p_k = \mathrm{Tr}\left\{\left(\Pi_A^k \otimes I_B\right)\rho_{AB}\left(\Pi_A^k \otimes I_B\right)\right\}$$

[0063] 양자 측정 Q(ρ_{AB})는 수학식 8과 같이 상관 측정의 최대치를 포착(capture)하도록 수정될 수 있다.

수학식 8

[0064] $$\mathcal{C}_Q(\rho_{AB}) = \sup_{\Pi_A^k} \left\|\rho_B - \rho_B^k\right\|_2^2$$

[0065] 여기서, $C_Q(\rho_{AB})$는 로컬 상태 ρ_B와 로컬 출력 상태 ρ_B^k간의 최대 거리를 나타내고, $\sup_{\Pi_A^k}\left\|\rho_B - \rho_B^k\right\|_2^2 \geq \sup_{\Pi_A^k}\sum_k p_k\left\|\rho_B - \rho_B^k\right\|_2^2$의 관계가 성립한다. 즉, ρ_B와 ρ_B^k 간 최대 평균 거리는 이들 간의 최대 거리보다 항상 작거나 같고, pk = 1/d에 대하여 그리고 임의의 von Neumann 측정에 대하여 거리가 고정 상수로 유지되면 등호가 성립하게 된다. 정의에 따라, $C_Q(\rho_{AB})$는 자원으로서 양자 상관 이론으로부터 양자 상관의 bona fide 측정의 요구사항을 만족하는 측정이다. 이와 관련하여, (i) $C_Q(\rho_{AB}) \geq 0$이고, 곱 상태에 대해서만 등호가 성립하고, (ii) $\mathcal{C}_Q((U_A \otimes U_B)\rho_{AB}(U_A \otimes U_B)) = \mathcal{C}_Q(\rho_{AB})$, 즉 로컬 유니터리 동작하에서 불변이다.

[0066] **자원 이용 (Resourcefulness)**

[0067] 이와 관련하여, 얽힘과 불일치를 넘어서 계측에서 양자 상관 자원 이용(quantum correlations resourceful)의 측정으로서 C_Q의 유효성(validation)에 대해 검토한다. C_Q는 다음의 특성들을 따를 수 있다. (i) 임의의 (상관된) 비-곱 상태(non-product state)에 대하여 $C_Q > 0$이다. (ii) 순수 상태(pure state)에 대해 $C_Q \leq D = E$, 여기서 D 및 E는 각각 양자 불일치 및 얽힘을 나타낸다. (iii) C_Q는 로컬 유니터리 하에서 불변하지만, 모든 completely positive and trace-preserving (CPTP) 맵 하에서 C_Q가 증가하지 않아야 하는 것을 만족시키지는 못한다.

[0068] **Proposition 1** C_Q는 보조(ancilla) 부가 또는 배제 하에서 단조성 (monotone)이지 않음

[0069] **Proof** 수학식 8의 Hilbert-Schmidt 거리에 기반한 측정 $C_Q(\rho_{AB})$는 비-측정 서브시스템 B에 대하여 로컬 동작하에서 비-단조성(nonmonotonicity) 또는 보조 부가 또는 배제 하에서 신축성(contractivity)과 같은 특성을 갖는다. 더욱이, 이는 비-측정 서브시스템 B에 대한 CPTP 맵 또는 잡음 채널과 같은 trivial 로컬 가역 동작하에서 이는 증가 또는 감소 될 수 있다. 예를 들어, $\Lambda_B : \rho_{AB} \mapsto \rho_{AB} \otimes \rho_C$,로 동작하는 잡음 채널 $\wedge_B$를 고려하면, 즉 이는 B에 로컬 보조를 도입한다. Hilbert-Schmidt norm은 텐서 곱에 대한 배수이고 따라서 $\mathcal{C}_Q((U_A \otimes U_B)\rho_{AB}(U_A \otimes U_B)) = \mathcal{C}_Q(\rho_{AB})$로 표현될 수 있다.

[0070] 보조 상태의 순도 $\mathrm{Tr}(\rho_C^2) \leq 1$은 비상관 보조의 상태 순도를 제어하여 $\mathcal{C}_Q(\rho_{A:BC}) \leq \mathcal{C}_Q(\rho_{AB})$가 됨을 의미하기 때문에, 양자 상관 $C_Q(\rho_{AB})$는 B에 대한 양자 동작하에서 증가할 수 있다.

[0071] Hilbert-Schmidt 거리가 잡음 맵 하에서 자신의 단조성에 기인하는 bona fide 측정이 아니기 때문에, CPTP 맵

과 같은 비-증가하는 상대 엔트로피, Bures, 또는 Hellinger 메트릭과 같은 교번 기하 측정(alternate geometric measures)이 도입되어야 할 것이다. 또한, 이는 보조 부가 또는 배제 하에서 신축성을 따른다. 수학식 8의 기하 상관 측정은 수학식 9로 일반화될 수 있다.

수학식 9

$$\mathcal{C}_Q^G(\rho_{AB}) = \sup_{\Pi_A^k} \mathcal{D}\left(\rho_B, \rho_B^k\right)$$

[0072]

[0073] 여기서, Π_A^k는 임의의 양자-상관 상태를 교란(perturb)시키는 로컬 von Neumann 측정이고, 함수 $D(\cdot,\cdot)$는 감소된 상태 ρ_B와 가장 먼 또는 가장 교란되어(disturbed) 감소된 출력 상태 ρ_B^k 간의 거리로서 식별가능성(discernability)을 정량화한다. 이러한 비-대상 상태들 (non-commuting states) 간의 거리 메트릭은 양자 상관의 기하 측정의 기본 요건을 만족하면 Hellinger 메트릭, Bures 메트릭, 또는 Tsallis 엔트로피와 같은 임의의 측정 형태를 취할 수 있다. 한편, Hellinger 메트릭은 $\mathcal{C}_Q^G(\rho_{AB}) = \sup_{\Pi_A^k} \sqrt{\frac{1}{2}\mathrm{Tr}\left(\sqrt{\rho_B} - \sqrt{\rho_B^k}\right)^2}$ 로 표현된다.

[0074] **자원의 계층(Hierarchy of resources)**

[0075] $C_Q(\rho_{AB})$는 이분 프로브에 의해 표시되는 민감도를 정량화하는 것으로 이해될 수 있다. 따라서, $C_Q(\rho_{AB})$에 의해 정량화되는 계측적 자원은 이분 양자 상태의 일부분에 대한 로컬 측정 및 다른 부분으로부터의 계산을 통한 최대화 이후에도 스큐 정보 Iw 및 로컬 QFI Fq에 의해 주어지는 성능 지수를 절대 초과할 수 없다. 자원의 계층에 대하여 수학식 10과 같은 일련의 부등식 관계가 성립한다.

수학식 10

$$F_q(\rho_{AB}) \overset{(a)}{\geq} I_w\left(\rho_{AB}^{\phi}\right) \overset{(b)}{=} I_w(\rho_{AB}) \overset{(c)}{\geq} \mathcal{C}_Q(\rho_{AB}), \quad \forall \rho_{AB}$$

[0076]

[0077] 여기서, 수학식 10의 부등식을 증명하면 다음과 같다. 기하학적으로, Iw는 수학식 11의 Hellinger 거리의 관점으로 표현될 수 있다.

수학식 11

$$I_w(\rho_{AB}) = \mathcal{D}_H\left(\rho_{AB}, \rho_{AB}^k\right) = \sqrt{\frac{1}{2}\mathrm{Tr}\left(\sqrt{\rho_{AB}} - \sqrt{\rho_{AB}^k}\right)^2},$$

[0078]

[0079] 여기서, $\rho_{AB}^k = \frac{1}{p_k}\left(\left(\Pi_A^k \otimes I_B\right)\rho_{AB}\left(\Pi_A^k \otimes I_B\right)\right)$는 로컬 측정 이후에 가장 먼 상태이다. 한편, $p_k = \mathrm{Tr}\left(\left(\Pi_A^k \otimes I_B\right)\rho_{AB}\left(\Pi_A^k \otimes I_B\right)\right)$이다. 감소된 상태 $\rho_B = \mathrm{Tr}_A(\rho_{AB})$와 로컬 측정 이후의 감소된 상태 $\rho_B^k = \frac{1}{p_k}\mathrm{Tr}_A\left(\left(\Pi_A^k \otimes I_B\right)\rho_{AB}\left(\Pi_A^k \otimes I_B\right)\right)$ 간의 Hellinger 거리는 수학식 12로 표현될 수 있다.

수학식 12

$$\mathcal{C}_Q(\rho_{AB}) = \mathcal{D}_H\left(\rho_B, \rho_B^k\right) = \sqrt{\frac{1}{2}\mathrm{Tr}\left(\sqrt{\rho_B} - \sqrt{\rho_B^k}\right)^2}$$

[0080]

[0081] 서브시스템의 폐기(discarding) 하에서 거리 측정의 단조성, 즉 $\mathcal{D}_H\left(\rho_{AB},\rho_{AB}^k\right)\geq\mathcal{D}_H\left(\rho_B,\rho_B^k\right)$에 따라 수학식 13으로 귀결된다.

수학식 13

[0082] $$\sqrt{\frac{1}{2}\mathrm{Tr}\left(\sqrt{\rho_{AB}}-\sqrt{\rho_{AB}^k}\right)^2}\geq\sqrt{\frac{1}{2}\mathrm{Tr}\left(\sqrt{\rho_B}-\sqrt{\rho_B^k}\right)^2}$$

[0083] 따라서, 부등식 관계는 $I_W(\rho_{AB})\geq C_Q(\rho_{AB})$를 정당화하는 것으로 보인다. 분리 가능한 상태에 대하여 얽힘 현상은 소멸되지만, C_Q는 일반 또는 양자 상관이 아닌 곱 상태에 대해서만 소멸된다. 분리 가능한 상태의 세트는 비-얽힘이지만 비일치(discordant) 상태에 또한 속하기 때문에, C_Q는 계측적 자원 이용의 관점에서 얽힘을 초월(surpasses)한다. 슈퍼 양자 불일치(super quantum discord)는 약 측정(weak measurements)에 의해 유도된다. 이러한 약 측정은 강 측정(strong measurements)보다 더 양자 상관, 즉 순수 상태에 대하여 $D_s\geq D$ 를 나타낸다. C_Q와 유사하게, 곱 상태에 대해서만 D_s는 0과 동일한 값을 갖는다. 하지만, 동일한 자원이 채택된 경우라면, 약 측정을 통해 향상된 양자가 강 측정에 비해 더 나은 정확도를 보장하는 것은 아닐 수 있다. 따라서, D_s의 계측적 자원 이용은 C_Q의 자원 이용을 초과할 수 없다. 제로 불일치 상태, 즉 일반-일반(CC) 또는 일반-양자(CQ) 상태에 대해서만 QFI가 소멸되지만, C_Q 에 의해 정량화되는 양자 상관은 곱 상태에 대해서만 소멸된다. 따라서, 수학식 10은 모든 상태들에 대해 유효한 것은 아닐 수 있다.

[0084] **Remark 1** 임의의 이분 상태 ρ_{AB}에 대하여 QFI 및 C_Q의 널(nullity)이 일치하는 것은 아니다.

[0085] 이러한 이상 현상(anomaly)은 계측의 양자 상관의 자원 이용을 제한하지만, 얽힘 및 불일치에 의해 특정될 수 없는 상관의 존재에 대하여 통찰을 제공한다. 널 이슈에 기인하여, 이러한 양자 상관은 세트 τ로 표시되는 C_Q를 나타내는 일치(non-discordant) 상태의 무시 가능한 서브클래스를 제외하고 모든 상태들에 대해 계측적으로 유용한 것처럼 보인다. 따라서, 자원의 계층이 최종적으로 수학식 14와 같이 표현될 수 있다.

수학식 14

[0086] $$F_q(\rho_{AB})\geq I_w(\rho_{AB})=I_w\left(\rho_{AB}^{\phi}\right)\geq\mathcal{C}_Q(\rho_{AB}),\quad\forall\rho_{AB}\notin\tau$$

[0087] **교란 민감도(Perturbation sensitivity)**

[0088] 로컬 측정에 의해 유도되는 교란에 대하여 혼합 상태의 민감도는 충실도(fidelity), 트레이스 거리(trace distance) 및 상대 엔트로피와 같은 혼합-상태 민감도 측정의 관점으로 정의될 수 있다. 엔트로피 정량화가 측정의 불확실성의 지표로 채택될 수 있다. 수학식 9의 상관 측정과 관련된 감소된 밀도 행렬의 비-상호적(noncommutative) 특성의 효과를 포착하기 위해, sandwiched Tsallis 상대 엔트로피가 수학식 15로 활용될 수 있다.

수학식 15

[0089] $$\mathcal{C}_\alpha(\rho_{AB})=\sup_{\Pi_A^k}\frac{\mathrm{Tr}\left(\left(\rho_B^{k\,\frac{1-\alpha}{2\alpha}}\rho_B\rho_B^{k\,\frac{1-\alpha}{2\alpha}}\right)^\alpha\right)-1}{\alpha-1}$$

[0090] 여기서, $\alpha=(0,1)\cup(1,\infty)$이고, 반면에 $\alpha=(1/2,\infty)$에 대해, 이는 양자 상관의 기하 측정이 되는 모든 요건을 만족하는 신축적 준-거리(contractive quasi-distance)를 나타낸다. 로컬 von Neumann 측정에 의해 유

도되는 교란(disturbance)에 응답하여 상태의 민감도를 표현하기 위한 이러한 측정은 얽힘 관측(entanglement witness)으로 사용되도록 수정될 뿐만 아니라 또한 이분 상태에 대한 분리가능성 범위를 특정할 수 있다.

[0091] **Proposition 2** 계측적으로 유용한 상태에 대해 요구되는 로컬 QFI는 이분 상태 ρ_{AB}의 로컬 von Neumann 측정 $\Pi_A^k \otimes I_B$에 의해 유도되는 양자 상관의 존재를 나타내는 교란 민감도에 의해 하한 한정될 수 있다.

[0092] **Proof** 스큐 정보는 비-동시 대각화 가능한 관측 값(non-simultaneously diagonalizable observables)에 대하여 혼합 상태의 불확실성을 측정하는 엔트로피로도 지칭되고, 수학식 16과 같은 Hellinger 거리의 관점으로 표현될 수 있다.

수학식 16

[0093] $$I_w(\rho_{AB}) = 2\,\mathcal{D}_H\left(\rho_{AB}, \rho_{AB}^k\right) = 2\left(1 - \mathrm{Tr}\left(\sqrt{\rho_{AB}}\sqrt{\rho_{AB}^k}\right)\right)$$

[0094] $\alpha = 1/2$, $[X, Y] \neq 0$에 대하여 트레이스의 순환 특성 $\mathrm{Tr}(XY) = \mathrm{Tr}(YX)$을 이용하면, $C_\alpha(\rho_{AB})$는 수학식 17로 단순화된다.

수학식 17

[0095] $$\mathcal{C}_{1/2}(\rho_{AB}) = 2\left(1 - \mathrm{Tr}\left(\sqrt{\rho_B}\sqrt{\rho_B^k}\right)\right)$$

[0096] 시스템 부가하에서 충실도 측정의 단조성 특성, 즉 $F(\rho_{AB}, \rho_B^k) \geq F(\rho_{AB}, \rho_{AB}^k)$은 수학식 18의 상태를 유도한다.

수학식 18

[0097] $$1 - \mathrm{Tr}\left(\sqrt{\rho_B}\sqrt{\rho_B^k}\right) \leq 1 - \mathrm{Tr}\left(\sqrt{\rho_{AB}}\sqrt{\rho_{AB}^k}\right)$$

[0098] Proposition 2로부터, 스큐 엔트로피가 A의 로컬 측정에 의해 유도되는 글로벌 상태 ρ_{AB}의 불확실성을 포착하고, 서브시스템 A에 관한 측정 이후 서브시스템 B의 감소된 상태의 불확실성을 포착한다는 사실로부터 이는 즉 두 개의 서브시스템 간에 존재하는 양자의 상관을 순수히 정량화하는 것이 정당화되는 것으로 보인다. 모든 비-곱 상태가 상보 기저(omplementary bases)의 임의의 비-곱 상태로 존재하는 양자 상관을 갖기 때문에, 곱 상태를 제외한 모든 상태에서 von Neumann 측정에 의해 상관이 유도될 수 있다. 임의의 비-곱 양자-상관 상태에 대해, 다음이 성립한다.

[0099] **Remark 2** 계측에 중요한 양자-상관 상태는 교란에 더 민감(susceptible)하고, 궁극적으로 더 양자 상관된 특성을 갖는다.

[0100] **수치 예제(Numerical examples)**

[0101] **Example 1** $d \otimes d$ 등방 상태(isotropic state)는 다음과 같이 주어진다.

[0102] $$\rho = \frac{1-p}{d^2-1} I_A \otimes I_B + \frac{d^2 p - 1}{d^2 - 1} |\psi^+\rangle\langle\psi^+|, \quad p \in [0, 1]$$

[0103] 여기서, $|\psi^+\rangle$는 최대 얽힘 상태이고, 이러한 상태에 의해 표시되는 Fq, C_Q 및 Iw가 도 3에 도시된다. 즉, 도 3은 본 발명의 일 실시 예에 따른 d = 3으로 파리미터화된 등방 상태에 대하여, p의 변화에 따른 Fq, C_Q 및 Iw를

나타낸다. 반면에, 도 4는 본 발명의 다른 실시예에 따른 d = 3으로 파리미터화된 Werner 상태에 대하여, p의 변화에 따른 Fq, C_Q 및 Iw를 나타낸다.

[0104] p = 0에서, 시스템은 얽힘을 제외하고, 코히어런스(coherence), MbQC, 및 불일치(discord)와 같은 양자 상관을 갖는다. 이러한 비-제로 양자 상관이 Fq, Iw, 및 C_Q의 비-제로에 대한 원인이 된다. 증가하는 p에 의해, 시스템은 p = 1/9에서 자신의 코히어런스에 손실이 발생하고, 시스템은 최대 혼합 상태이다. 이는 이러한 임계 지점(critical point)에서 모든 측정이 소멸 되는 원인이다. 이후, 시스템은 p가 증가함에 따라 증가하는 양자(quantumness)를 다시 획득하고 또한 p > 0.35에 대한 얽힘을 통합(incorporate)한다. 결과적으로, 모든 측정은 최대 얽힘 시스템에 대하여 p = 1에서 최대 값을 갖는 증가하는 경향을 나타낸다.

[0105] **Example 2** $d \otimes d$ Werner 상태는 다음과 같은 파라미터로 특정된다.

[0106] $$\rho = \frac{2(1-p)}{d(d+1)}P^{+} + \frac{2p}{d(d-1)}P^{-}, \quad p \in [0,1]$$

[0107] 여기서, P^{+} = (I + S)/2 및 P^{-} = (I - S)/2는 대칭 및 비대칭 공간상의 투영 대상(projector)을 나타내고, $S = \sum_{i,j} |i\rangle\langle j| \otimes |i'\rangle\langle j'|$는 스왑(swap) 연산자이다. 이러한 상태에 대한 Fq, C_Q 및 Iw가 도 2에 도시된다. 이러한 동작(behavior)은 이러한 시스템에 대한 양자 상관에 의해 나타나는 경향에 기인한다. p = 0에서, 시스템은 Fq , Iw, 및 C_Q의 비-제로 값으로부터 분명하게 양자 상관된다. p가 증가함에 따라, 시스템은 p = 1/3에서, 감소하는(decaying) 비-대각 엔트리(off-diagonal entries)로 코히어런스에 손실이 발생한다. 시스템은 거의 제로 비-대각 엔트리를 갖는 최대 혼합 상태이다. 따라서, 이러한 임계 지점에서, Fq, Iw, 및 C_Q가 소멸된다. 이후, 시스템은 p가 증가함에 따라 양자 상관을 다시 획득하고 또한 p > 0.55에 대한 얽힘을 통합(incorporate)한다. 결과적으로, 모든 측정은 최대 얽힘 시스템에 대하여 p = 1에서 최대 값을 갖는 증가하는 경향을 나타낸다.

[0108] **Example 3** Bell-대각 상태의 형태를 고려하면 다음과 같다.

[0109] $$\rho = \frac{1}{4}\left(I_A \otimes I_B + \sum_{i=1}^{3} p_i \sigma_i \otimes \sigma_i\right)$$

[0110] 여기서, pi 는 실수이고, σi는 Pauli 행렬이다. p = max {|p1|,|p2|,|p3|}에 대해, 수학식 10의 반례로서 다음의 3가지 특수 케이스를 고려할 수 있다; (i) p = p1 ∈[0, 1], p2 = p3 = 0 with H = σ1 ⊗ I, (ii) p = p2∈ [0, 1] , p1 = p3 = 0 with H = σ2 ⊗ I 및 (iii) p = p3 ∈ [0, 1] , p1 = p2 = 0 with H = σ3 ⊗ I. 이러한 예에 대해서 Fq 및 Iw는 소멸 되지만, 도 5에 도시된 바와 같이 $C_Q \neq 0$이다. 이와 관련하여, 도 5는 본 발명의 일 실시 예에 따른 Bell-대각 상태에 대한 파리마터 p의 함수로서 F_Q, C_Q 및 I_ω를 나타낸다.

[0111] **Example 4** $C_Q(\rho) = 0$가 성립하는 $\rho = \rho_A \otimes \rho_B$의 곱 상태를 수학식 19와 같이 고려한다.

수학식 19

[0112] $$\rho = \frac{1}{4}\begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

[0113] 이러한 곱 상태에 대한 QFI의 부가 특성으로부터, 수학식 20이 성립한다.

수학식 20

[0114] $$F_q(\rho_A \otimes \rho_B, H) = F_q(\rho_A) + F_q(\rho_B) \leq 2$$

[0115] 여기서, Hamiltonian $H = \sum \sigma^i_{x,y,z}$ and $\sigma^i_{x,y,z}$ 는 i번째 큐빗에 동작하는 Pauli x, y, z 연산자를 의미한다. 도 6은 이러한 상태가 비-제로 QFI를 갖는다는 사실을 도시한다. 이와 관련하여, 도 6은 본 발명의 다른 실시예에 따른 비-선형 커플링 Hamiltonian에 대하여 Fq (ρ)가 SQL을 초과하는 경우, 곱 상태에 대한 k의 함수로서 QFI를 나타낸다.

[0116] 도 6과 관련하여, N 파티클의 이러한 곱 상태는 표준 양자 한계(SQL; standard quantum limit)를 초과하여, 즉 $\delta^2\Phi \geq 1/N$이 성립한다. 또한, 비선형 결합 Hamiltonian $H^k = \left(\sum_i^N \sigma^i_{x,y,z}\right)^k$ 에 대하여 $\delta^2\Phi \geq 1/N^2$로 주어지는 near Heisenberg 스케일링을 달성할 수 있고, 여기서 k는 결합 파라미터이다.

[0117] 이상에서는, 본 발명에 따른 양자 얽힘 최적 분배 시스템 및 양자 통신 시스템에 대해 살펴보았다. 이러한 본 발명의 기술적 특징에 대해 요약하면 다음과 같다.

[0118] 본 발명에서, 임의의 비-곱 상태의 von Neumann 측정에 의한 로컬 교란을 통해 상관이 유도될 수 있다. 이는 양자 상관이 단지 (불일치와 같은) 관측자 의존적일뿐만 아니라, 관측자가 (MbQC와 같은) 비-관측 시스템을 얼마나 강하게 교란시킬 수 있는지에 달려있다. 이는 최악-케이스 민감도에 관한 MbQC의 계측 중요성을 보장한다.

[0119] 계측 관련하여 슈퍼 불일치 및 얽힘에 대하여 $C_Q(\rho_{AB})$는 무시(overshadow)될 수 있다. 하지만, 그 유용성은 $\rho_{AB} \in \tau$에 대한 것에 있다. 이러한 이상 현상(anomaly)은 이러한 상관의 계측 자원 이용(resourcefulness)을 제한하고, 예측 업무의 최소 정확도를 보장하는 측정 기준인 양자 불일치(quantum discord)를 대체할 수 없도록 한다. $\rho_{AB} \notin \tau$에 대해, $C_Q(\rho_{AB})$에 의해 특정되는 상관은 비-제로 로컬 QFI를 보장하는데 필요하다.

[0120] 또한, 이러한 양자-상관 상태는 교란에 대한 더 민감한 계측에 대하여 유용하다. 이러한 특징은 계측으로 유용한 상태의 패밀리에서 곱 상태를 배제한다. 하지만, 비-선형 결합 역학(nonlinear coupling dynamics)은 곱 상태가 일반 샷 잡음 한계(classical shot noise limit)를 초과하도록 할 수 있다.

[0121] 한편, 도 7은 본 발명에 따른 혼합 상태 양자 측정 방법의 흐름도를 나타낸다. 상기 방법은 다분 큐빗 시스템(multipartie qubit system)을 구성하는 양자 기기기에 의해 수행될 수 있다. 여기서, 양자 기기기는 도 2의 제1 내지 제3 양자 기기(100 내지 300) 중 어느 하나이거나 또는 도 1의 제1 내지 제3 서브 시스템(100 내지 300) 중 어느 하나일 수 있다. 여기서, 제1 내지 제3 서브 시스템(100 내지 300) 각각은 적어도 하나의 양자 기기를 포함하고, 상호 간에 구분 가능한 시스템일 수 있다.

[0122] 도 7을 참조하면, 혼합 상태 양자 측정 방법은 측정 기반 양자 상관 (MbQC: measurement-based quantum correlations) 측정 단계(S110), 양자 상관 최대치 판단 단계(S120) 및 교란 민감도 획득 단계(S300)를 포함한다.

[0123] 측정 기반 양자 상관 (MbQC) 측정 단계(S110)에서, 다분 큐빗 시스템의 제1 양자 기기와 제2 양자 기기와의 양자 상관(quantum correlation) $Q(\rho_{AB})$을 측정한다. 한편, 양자 상관 최대치 판단 단계(S120)에서, 상기 양자 상관 측정의 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$의 임계치 초과 여부를 판단한다. 또한, 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 상기 임계치를 초과하면, 교란 민감도 획득 단계(S130)에서, 상기 양자 상관 측정에 의해 유도되는 교란에 대하여 혼합 상태의 교란 민감도(perturbation sensitivity)에 관한 정보를 획득한다.

[0124] 한편, 상기 혼합 상태 양자 측정 방법은 bona fide 측정 판단 단계(S140)를 더 포함할 수 있다. 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 상기 임계치를 초과하지 않으면, bona fide 측정 판단 단계(S140)에서 상기 양자 상관의 bona fide 측정 요구사항 만족 여부를 판단할 수 있다.

[0125] 한편, bona fide 측정 판단 단계(S140)에서, 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 0이면, 상기 제1 양자 기기와 상기 제2 양자 기기를 서로 독립된 제1 서브시스템 및 제2 서브 시스템으로 분리 가능한 곱 상태(product state)라고 판단

할 수 있다. 한편, bona fide 측정 판단 단계(S140)에서, $\mathcal{C}_Q((U_A \otimes U_B)\rho_{AB}(U_A \otimes U_B)) = \mathcal{C}_Q(\rho_{AB})$를 만족하면, 로컬 유니터리 연산 하에서 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템을 불변(invariant) 시스템으로 판단할 수 있다. 이에 따라, 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 상기 분리 가능한 곱 상태(product state)가 지속되는 것으로 판단할 수 있다. 여기서, UA$\otimes$UA는 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 로컬 유니터리 연산자일 수 있다.

[0126] 또한, 상기 혼합 상태 양자 측정 방법은 실제 양자 상관 추정 단계(S150)를 더 포함할 수 있다. 실제 양자 상관 추정 단계(S150)에서, 상기 측정된 양자 상관으로부터 상기 교란 민감도를 보정하여, 실제 양자 상관을 추정할 수 있다. 구체적으로, 실제 양자 상관 추정 단계(S150)에서, 상기 교란 민감도와 연관된 스큐 정보인 $I_\omega(\rho_{AB})$를 이용하여 로컬 quantum Fisher information (QFI)를 추정할 수 있다.

[0127] 이와 관련하여, 상기 로컬 quantum Fisher information (QFI) $Fq(\rho_{AB})$는 $I_w(\rho_{AB}) \le \frac{F_Q(\rho_{AB})}{4} \le 2I_w(\rho_{AB})$ 및 $F_q(\rho_{AB}) \overset{(a)}{\ge} I_w\left(\rho_{AB}^{\phi}\right) \overset{(b)}{=} I_w(\rho_{AB}) \overset{(c)}{\ge} \mathcal{C}_Q(\rho_{AB}), \quad \forall \rho_{AB}$를 이용하여 추정할 수 있다. 여기서, ρ^{Φ}_{AB}는 $_{AB}$에 유니터리 연산(U^{Φ})을 적용하여 $\rho^{\Phi}_{AB} = U^{\Phi}\ \rho_{AB}\ U^{\Phi}$로 연산될 수 있다.

[0128] 한편, 상기 혼합 상태 양자 측정 방법은 서브 시스템 분리 가능 여부 판단 단계(S160)를 더 포함할 수 있다. 서브 시스템 분리 가능 여부 판단 단계(S160)에서, 상기 추정된 로컬 quantum Fisher information (QFI) $Fq(\rho_{AB})$ 및 상기 스큐 정보 $I_\omega(\rho_{AB})$를 이용하여, 상기 제1 및 제2 서브 시스템의 분리 가능 여부를 판단할 수 있다. 서브 시스템 분리 가능 여부 판단 단계(S145)에서, 상기 추정된 QFI $Fq(\rho_{AB})$가 제2 임계치 이하이면, 상기 제1 및 제2 서브 시스템이 분리 가능한 것으로 판단할 수 있다.

[0129] 이에 따라, 상기 제1 및 제2 서브 시스템이 분리 가능한 것으로 판단되면, 상기 제1 및 제2 서브 시스템을 분리(S165)한 이후, 상기 실제 양자 상관 추정 단계(S150)에서 상기 QFI $Fq(\rho_{AB})$를 다시 추정할 수 있다. 한편, 다시 추정되는 상기 QFI $Fq(\rho_{AB})$에 대해, 상기 스큐 정보 $I_\omega(\rho_{AB})$를 고려하지 않고 $Fq(\rho_A \otimes \rho_B, H) = Fq(\rho_A) + Fq(\rho_B)$에 의해, 상기 제1 서브시스템의 QFI와 상기 제2 서브 시스템의 QFI의 합으로 결정할 수 있다. 여기서, $\otimes$는 로컬 측정에 의해 유도되는 상기 스큐 정보를 생성하기 위한 연산자이고, H는 N개의 큐빗에 작용하는 Pauli x, y, z 연산자의 합을 나타낸다.

[0130] 이에 따라, 상기 제1 및 제2 서브 시스템이 분리 가능한 것으로 판단되면, 양자 상관 측정 단계(S110)부터 다시 수행하지 않고, 상기 제1 및 제2 서브 시스템을 분리(S165)한 이후, 상기 실제 양자 상관 추정 단계(S150)를 다시 수행한다. 따라서, 상기 제1 및 제2 서브 시스템이 분리 가능한 것으로 판단되면, 양자 상관 추정의 정확성을 유지하면서도 신속하게 추정할 수 있다는 장점이 있다.

[0131] 반면에, 상기 제1 및 제2 서브 시스템이 분리 가능하지 않다고 판단되면, 양자 상관 측정 단계(S110)부터 다시 수행할 수 있다. 하지만, 이에 한정되는 것은 아니고, 양자 상관 최대치가 임계치 이하인 상태가 유지된다고 판단되면 교란 민감도 획득 단계(S130)부터 수행하는 것도 가능하다.

[0132] 한편, 본 발명의 다른 실시 예에 따른 혼합 상태 양자 측정 방법은 다음과 같다. 이와 관련하여, 도 8은 본 발명의 다른 실시 예에 따른 혼합 상태 양자 측정 방법의 흐름도를 나타낸다. 여기서, 상기 방법은 다분 큐빗 시스템(multipartie qubit system)을 구성하는 양자 기기에 의해 수행될 수 있다.

[0133] 상기 혼합 상태 양자 측정 방법은 양자 상관 (MbQC: measurement-based quantum correlations) 측정 단계(S210), 교란 민감도 획득 단계(S230) 및 실제 양자 상관 추정 단계(S250) 및 서브 시스템 분리 가능 여부 판단 단계(S260)를 포함한다.

[0134] 양자 상관 (MbQC) 측정 단계(S210)에서, 다분 큐빗 시스템의 제1 서브 시스템과 제2 서브 시스템 간의 양자 상관(quantum correlation) $Q(\rho_{AB})$을 측정한다. 한편, 교란 민감도 획득 단계(S230)에서, 상기 양자 상관 측정에 의해 유도되는 교란에 대하여 혼합 상태의 교란 민감도(perturbation sensitivity)에 관한 정보를 획득한다. 또

한, 실제 양자 상관 추정 단계(S250)에서, 상기 측정된 양자 상관으로부터 상기 교란 민감도를 보정하여, 실제 양자 상관을 추정한다. 또한, 서브 시스템 분리 가능 여부 판단 단계(S260)에서, 상기 추정된 실제 양자 상관을 이용하여, 상기 제1 및 제2 서브 시스템의 분리 가능 여부를 판단할 수 있다.

[0135] 한편, 양자 상관 (MbQC) 측정 단계(S210) 이후, 상기 양자 상관 측정의 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$의 임계치 초과 여부를 판단하는 양자 상관 최대치 판단 단계(S220)를 더 포함할 수 있다. 이때, 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 상기 임계치를 초과하지 않으면, 상기 양자 상관의 bona fide 측정 요구사항 만족 여부를 판단하는 bona fide 측정 판단 단계(S240)를 더 포함할 수 있다. bona fide 측정 판단 단계(S240)에서, 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 0이면, 상기 제1 양자 기기와 상기 제2 양자 기기를 서로 독립된 제1 서브시스템 및 제2 서브 시스템으로 분리 가능한 곱 상태(product state)라고 판단할 수 있다. 따라서, $C_Q((U_A \otimes U_B)\rho_{AB}(U_A \otimes U_B)) = C_Q(\rho_{AB})$를 만족하면, 로컬 유니터리 연산 하에서 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템을 불변(invariant) 시스템으로 판단할 수 있다. 이에 따라, 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 상기 분리 가능한 곱 상태(product state)가 지속되는 것으로 판단할 수 있다. 여기서 $U_A^{\otimes} U_A$는 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 로컬 유니터리 연산자이다.

[0136] 이에 따라, 상기 제1 및 제2 서브 시스템이 분리 가능한 것으로 판단되면, 양자 상관 측정 단계(S210)부터 다시 수행하지 않고, 상기 제1 및 제2 서브 시스템을 분리(S265)한 이후, 상기 실제 양자 상관 추정 단계(S250)를 다시 수행한다. 따라서, 상기 제1 및 제2 서브 시스템이 분리 가능한 것으로 판단되면, 양자 상관 추정의 정확성을 유지하면서도 신속하게 추정할 수 있다는 장점이 있다.

[0137] 반면에, 상기 제1 및 제2 서브 시스템이 분리 가능하지 않다고 판단되면, 교란 민감도 획득 단계(S230)부터 수행하는 것도 가능하다. 하지만, 이에 한정되는 것은 아니고, 양자 상관 최대치가 임계치 이상일 것으로 판단되면 양자 상관 측정 단계(S210)부터 다시 수행할 수 있다.

[0138] 한편, 도 8에 따른 혼합 상태 양자 측정 방법은 도 7에 따른 혼합 상태 양자 측정 방법에서 수행되는 동작과 결합하여 수행될 수 있다. 또한, 도 7에 따른 혼합 상태 양자 측정 방법은 도 8에 따른 혼합 상태 양자 측정 방법에서 수행되는 동작과 결합하여 수행될 수 있다.

[0139] 한편, 본 발명의 다른 양상에 따른 다분 큐빗 시스템(multipartie qubit system) 기반 양자 시스템에서 혼합 상태 양자 측정을 수행하는 양자 기기에 대해 살펴보면 다음과 같다. 이와 관련하여, 상기 양자 기기는 도 2의 제1 내지 제3 양자 기기(100 내지 300) 중 어느 하나일 수 있다. 또는, 상기 양자 기기는 도 1의 제1 내지 제3 양자 시스템(100 내지 300) 중 어느 하나일 수 있다. 또는, 상기 양자 기기는 도 1의 제1 내지 제3 양자 시스템(100 내지 300) 중 어느 하나에 속하는 양자 기기 중 어느 하나일 수 있다.

[0140] 상기 양자 기기(100, 200, 300)는 인터페이스부(110, 210, 310), 제어부(120, 220, 320) 및 메모리(130, 230, 330)를 포함한다. 이하에서는 편의상 제3 양자 기기(300)의 동작 관점에서 설명하기로 하지만, 이에 한정되는 것은 아니다.

[0141] 인터페이스부(310)는 상기 다분 큐빗 시스템의 제1 양자 기기(100) 및 제2 양자 기기(200)와 양자 정보를 송수신하도록 구성된다. 한편, 제어부(320)는 상기 제1 양자 기기와 상기 제2 양자 기기와의 양자 상관(quantum correlation) $Q(\rho_{AB})$을 측정하는 측정 기반 양자 상관 (MbQC: measurement-based quantum correlations)을 수행한다. 또한, 제어부(320)는 상기 양자 상관 측정의 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$의 임계치 초과 여부를 판단하고, 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 상기 임계치를 초과하면, 상기 양자 상관 측정에 의해 유도되는 교란에 대하여 혼합 상태의 교란 민감도(perturbation sensitivity)에 관한 정보를 획득하도록 구성된다.

[0142] 또한, 제어부(320)는 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 상기 임계치를 초과하지 않으면, 상기 양자 상관의 bona fide 측정 요구사항 만족 여부를 판단하도록 더 구성될 수 있다.

[0143] 또한, 제어부(320)는 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 0이면, 상기 제1 양자 기기와 상기 제2 양자 기기를 서로 독립된 제1 서브시스템 및 제2 서브 시스템으로 분리 가능한 곱 상태(product state)라고 판단할 수 있다.

[0144] 또한, 제어부(320)는 $C_Q((U_A \otimes U_B)\rho_{AB}(U_A \otimes U_B)) = C_Q(\rho_{AB})$를 만족하면, 로컬 유니터리 연산 하에서 상기 제1

서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템을 불변(invariant) 시스템으로 판단할 수 있다. 이에 따라, 상기 제1 서브 시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 상기 분리 가능한 곱 상태(product state)가 지속되는 것으로 판단할 수 있다. 여기서, 여기서 $U_A \otimes U_A$는 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 로컬 유니터리 연산자일 수 있다.

[0145] 또한, 제어부(320)는 상기 측정된 양자 상관으로부터 상기 교란 민감도를 보정하여, 실제 양자 상관을 추정하도록 더 구성될 수 있다. 이때, 상기 실제 양자 상관을 추정하는 경우, 제어부(320)는 상기 교란 민감도와 연관된 스큐 정보인 $I_\omega(\rho_{AB})$를 이용하여 로컬 quantum Fisher information (QFI)를 추정할 수 있다.

[0146] 또한, 제어부(320)는 $I_w(\rho_{AB}) \le \frac{F_Q(\rho_{AB})}{4} \le 2I_w(\rho_{AB})$ 및 $F_q(\rho_{AB}) \overset{(a)}{\ge} I_w\left(\rho_{AB}^{\phi}\right) \overset{(b)}{=} I_w(\rho_{AB}) \overset{(c)}{\ge} C_Q(\rho_{AB}), \quad \forall \rho_{AB}$를 이용하여 상기 로컬 quantum Fisher information (QFI) $F_q(\rho_{AB})$를 추정할 수 있다. 여기서, ρ^{ϕ}_{AB}는 $_{AB}$에 유니터리 연산(U^{ϕ})을 적용하여 $\rho^{\phi}_{AB} = U^{\phi}\ \rho_{AB}\ U^{\phi}$로 연산된다.

[0147] 또한, 제어부(320)는 상기 추정된 로컬 quantum Fisher information (QFI) $F_q(\rho_{AB})$ 및 상기 스큐 정보 $I_\omega(\rho_{AB})$를 이용하여, 상기 제1 및 제2 서브 시스템의 분리 가능 여부를 판단하도록 더 구성될 수 있다. 이때, 상기 추정된 QFI $F_q(\rho_{AB})$가 제2 임계치 이하이면, 상기 제1 및 제2 서브 시스템이 독립적으로 동작하도록 상기 제1 및 제2 서브 시스템을 분리하여 제어할 수 있다.

[0148] 또한, 제어부(320)는 상기 제1 및 제2 서브 시스템이 분리 가능한 것으로 판단되면, 이후의 상기 실제 양자 상관 추정에서 상기 QFI $F_q(\rho_{AB})$를 다시 추정할 수 있다. 이때, 상기 스큐 정보 $I_\omega(\rho_{AB})$를 고려하지 않고 $F_q(\rho_A \otimes \rho_B, H) = F_q(\rho_A) + F_q(\rho_B)$에 의해, 상기 제1 서브시스템의 QFI와 상기 제2 서브 시스템의 QFI의 합으로 결정할 수 있다. 여기서, $\otimes$는 로컬 측정에 의해 유도되는 상기 스큐 정보를 생성하기 위한 연산자이고, H는 N개의 큐빗에 작용하는 Pauli x, y, z 연산자의 합을 나타낸다.

[0149] 한편, 본 발명의 다른 실시 예에 따른 다분 큐빗 시스템(multipartie qubit system) 기반 양자 시스템에서 혼합 상태 양자 측정을 수행하는 양자 기기에 대해 살펴보면 다음과 같다. 여기서도, 상기 양자 기기는 편의상 제3 양자 기기(300)인 것으로 가정할 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니고 임의의 제1 및 제2 양자 기기(100, 200) 일 수 있다.

[0150] 인터페이스부(310)는 상기 다분 큐빗 시스템의 제1 서브 시스템 및 제2 서브 시스템 간의 양자 정보를 송수신하도록 구성된다. 한편, 제어부(320)는 상기 제1 서브 시스템과 상기 제2 서브 시스템 간의 양자 상관(quantum correlation) $Q(\rho_{AB})$을 측정하는 측정 기반 양자 상관 (MbQC: measurement-based quantum correlations)을 수행할 수 있다. 또한, 제어부(320)는 상기 양자 상관 측정에 의해 유도되는 교란에 대하여 혼합 상태의 교란 민감도(perturbation sensitivity)에 관한 정보를 획득할 수 있다. 또한, 제어부(320)는 상기 측정된 양자 상관으로부터 상기 교란 민감도를 보정하여, 실제 양자 상관을 추정할 수 있다. 또한, 제어부(320)는 상기 추정된 실제 양자 상관을 이용하여, 상기 제1 및 제2 서브 시스템의 분리 가능 여부를 판단할 수 있다.

[0151] 또한, 제어부(320)는 상기 양자 상관 측정 이후, 상기 양자 상관 측정의 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$의 임계치 초과 여부를 판단할 수 있다. 또한, 제어부(320)는 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 상기 임계치를 초과하지 않으면, 상기 양자 상관의 bona fide 측정 요구사항 만족 여부를 판단할 수 있다.

[0152] 또한, 제어부(320)는 상기 최대치 $C_Q(\rho_{AB})$가 0이면, 상기 제1 양자 기기와 상기 제2 양자 기기를 서로 독립된 제1 서브시스템 및 제2 서브 시스템으로 분리 가능한 곱 상태(product state)라고 판단할 수 있다. 또한, 제어부(320)는 $C_Q((U_A \otimes U_B)\rho_{AB}(U_A \otimes U_B)) = C_Q(\rho_{AB})$를 만족하면, 로컬 유니터리 연산 하에서 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템을 불변(invariant) 시스템으로 판단할 수 있다. 이에 따라, 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 상기 분리 가능한 곱 상태(product state)가 지속되는 것으로 판단할 수 있다. 여기서

$U_A \otimes U_A$는 상기 제1 서브시스템 및 상기 제2 서브 시스템 간 로컬 유니터리 연산자이다.

[0153] 이상에서는, 본 발명에 따른 혼합-상태 양자 계측(mixed-state quantum metrology)에서 측정-기반 양자 상관(measurement-based quantum correlation)을 이용한 혼합 상태 양자 측정 방법 및 이를 이용한 양자통신 시스템에 대해 살펴보았다. 이러한 혼합 상태 양자 측정 방법 및 이를 이용한 양자통신 시스템의 기술적 효과는 다음과 같다.

[0154] 본 발명의 적어도 일 실시예에 따르면, 측정-기반 양자 상관(measurement-based quantum correlation)을 이용한 혼합 상태 양자 측정 방법을 제공하여, 임의의 양자 상태에 대하여 정확한 측정을 수행할 수 있다는 장점이 있다.

[0155] 또한, 본 발명의 적어도 일 실시예에 따르면, MbQC의 자원 이용을 통해 로컬 von Neumann 측정에 의해 유발되는 교란에 대하여 혼합 상태의 계측 민감도에 대하여 직관성을 제공할 수 있다는 장점이 있다.

[0156] 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

[0157] 100: 제1 양자 기기, 제1 서브 시스템,

200: 제2 양자 기기, 제2 서브 시스템

300: 제3 양자 기기, 제3 서브 시스템

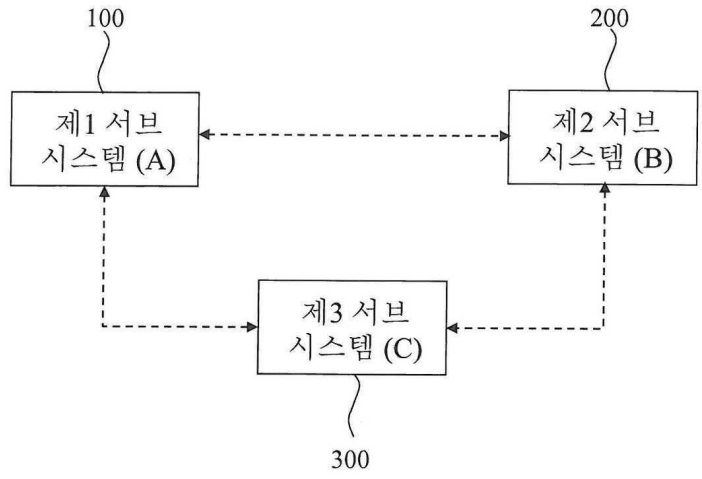
110, 210, 310: 인터페이스부

120, 220, 320: 제어부

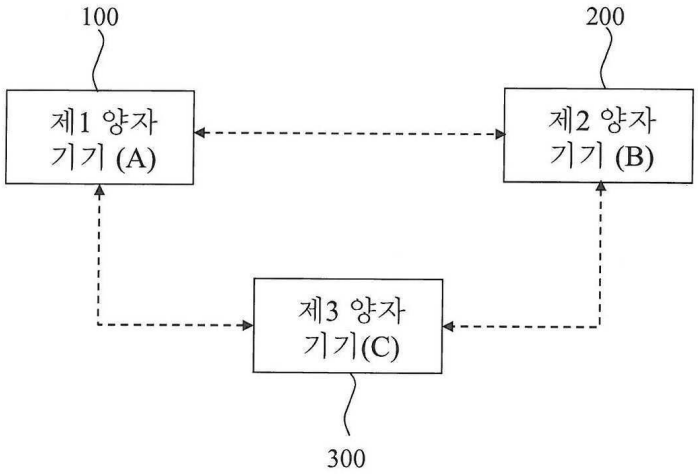
130, 230, 330: 메모리

도면

도면1

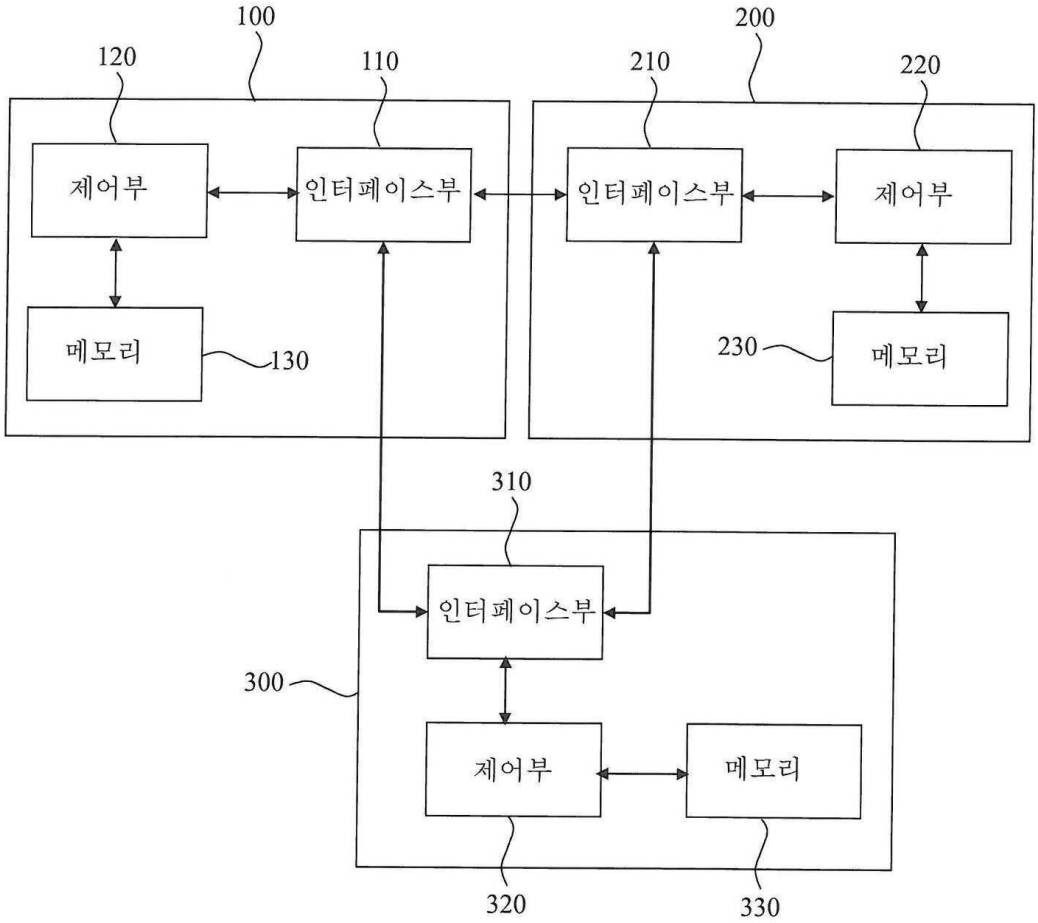

100
200
제1 서브 시스템 (A)
제2 서브 시스템 (B)
제3 서브 시스템 (C)
300

(a)

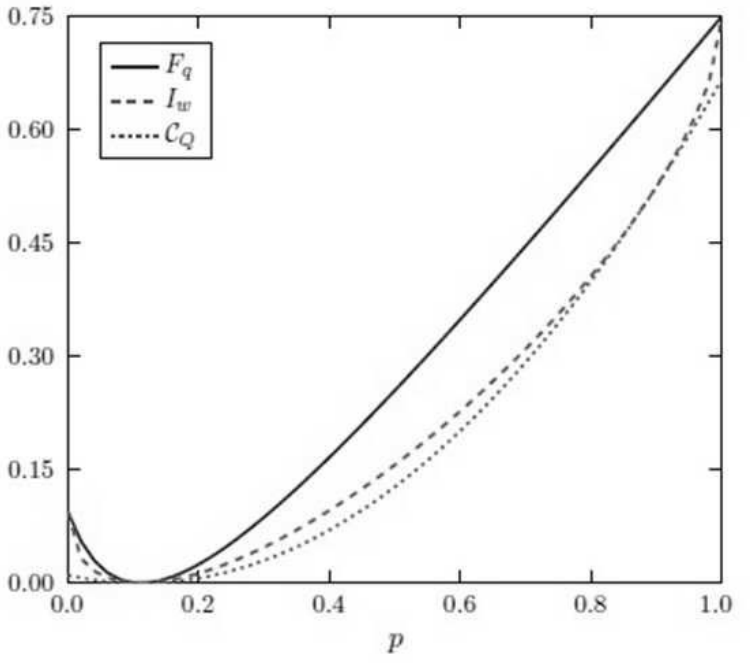

100
200
제1 양자 기기 (A)
제2 양자 기기 (B)
제3 양자 기기(C)
300

(b)

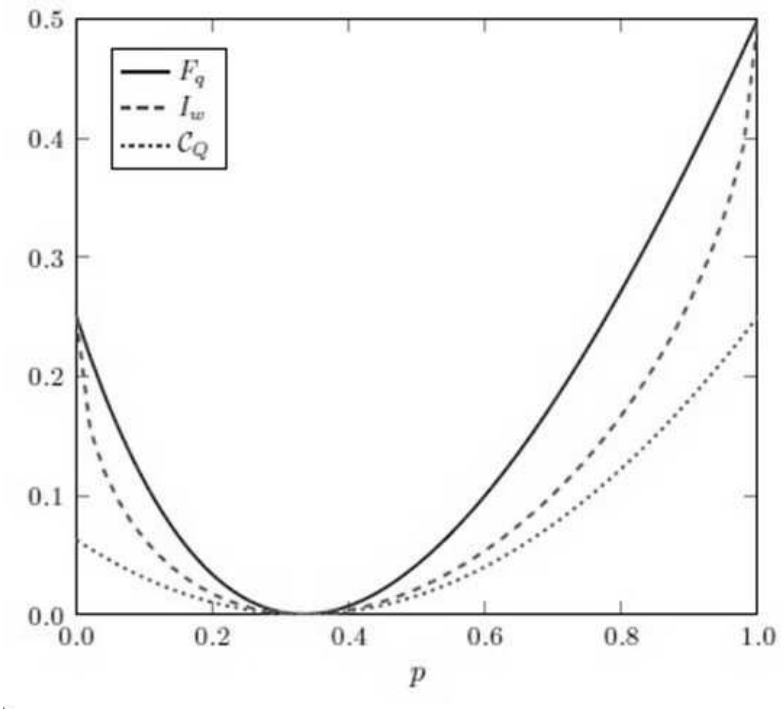
도면2


100
120
110
제어부
인터페이스부
메모리
130
200
210
220
인터페이스부
제어부
230
메모리
310
인터페이스부
300
제어부
메모리
320
330

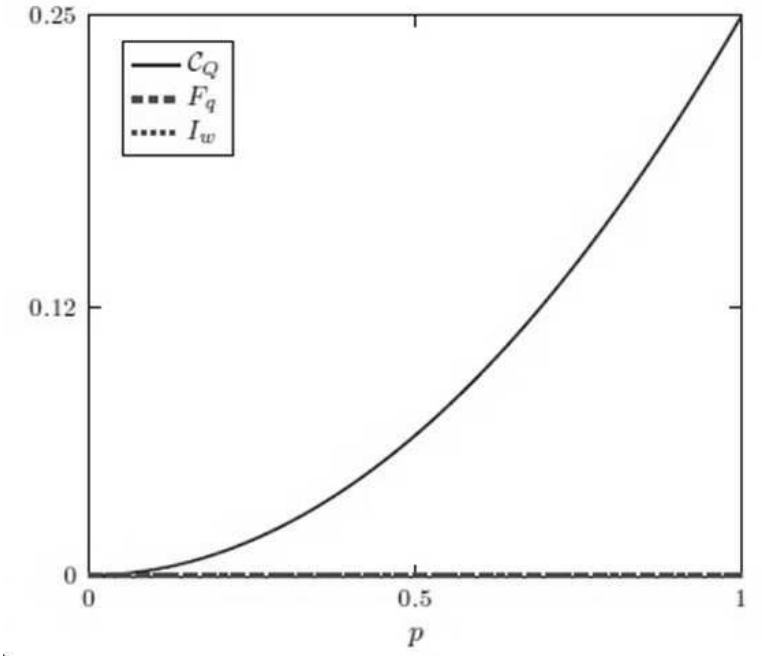
도면3


0.75
0.60
0.45
0.30
0.15
0.00
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
p
F_q
I_w
C_Q

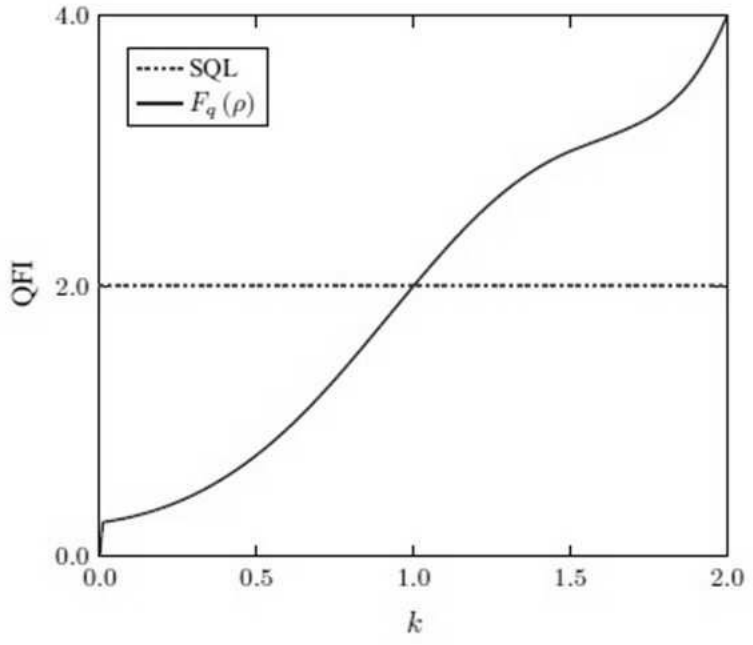
도면4



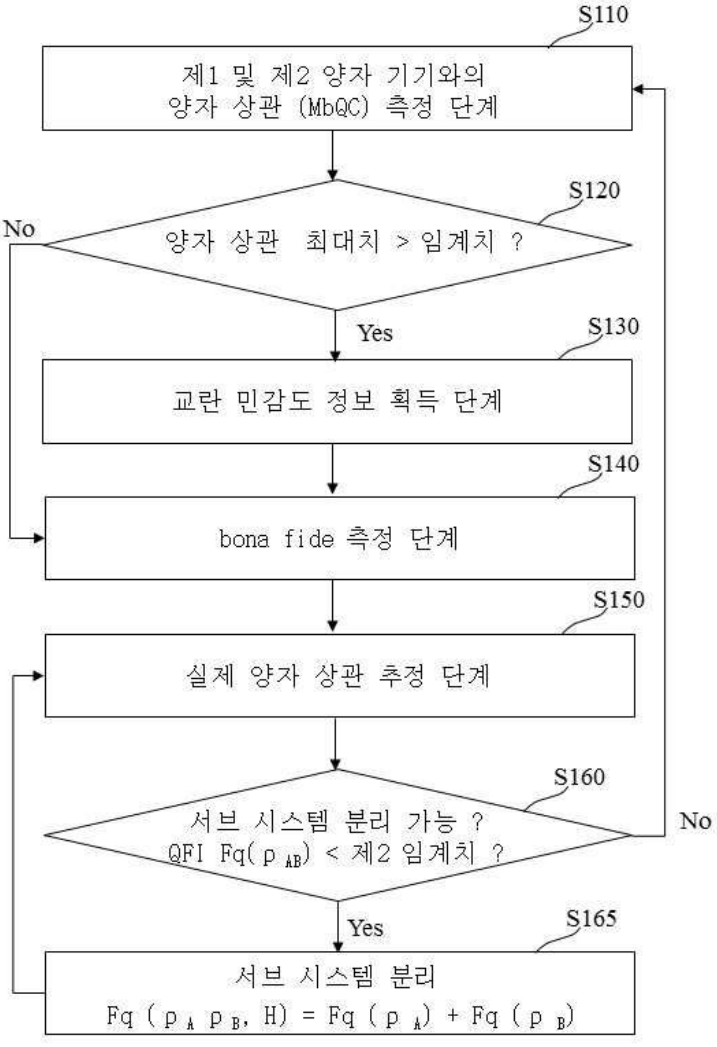
도면5



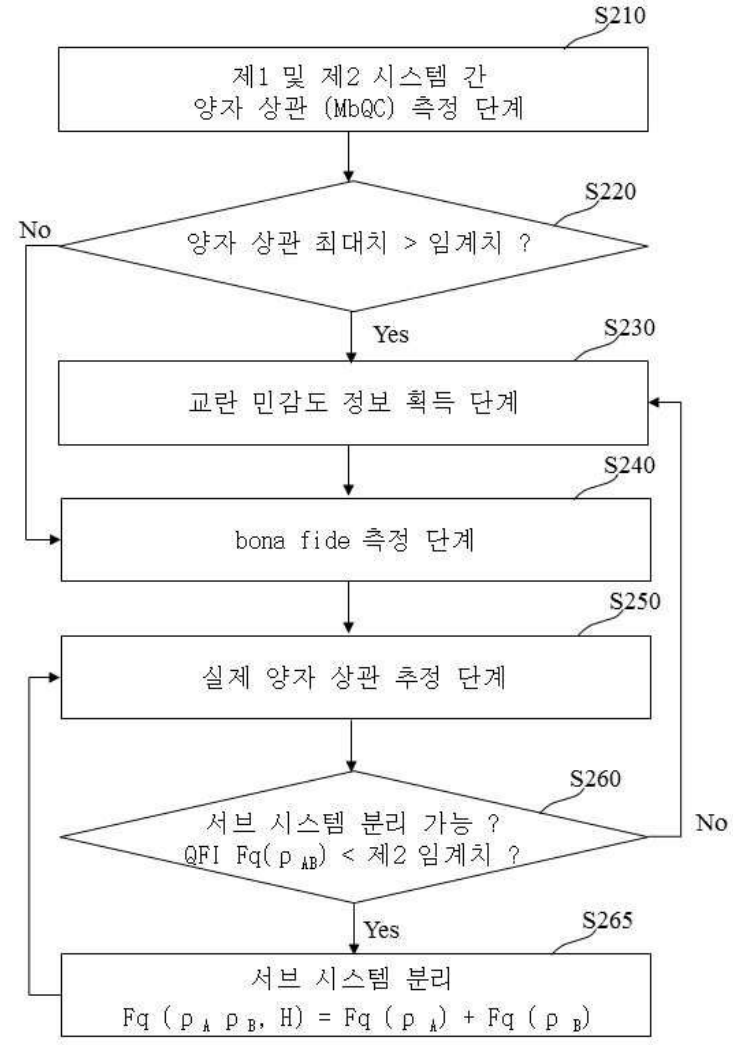
도면6


4.0
2.0
0.0
QFI
SQL
$F_q(\rho)$
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
k

도면7


S110
제1 및 제2 양자 기기와의
양자 상관 (MbQC) 측정 단계
S120
양자 상관 최대치 > 임계치 ?
No
Yes
S130
교란 민감도 정보 획득 단계
S140
bona fide 측정 단계
S150
실제 양자 상관 추정 단계
S160
서브 시스템 분리 가능 ?
QFI Fq(ρ AB) < 제2 임계치 ?
No
Yes
S165
서브 시스템 분리
Fq (ρ A ρ B, H) = Fq (ρ A) + Fq (ρ B)

도면8


S210
제1 및 제2 시스템 간
양자 상관 (MbQC) 측정 단계
S220
양자 상관 최대치 > 임계치 ?
No
Yes
S230
교란 민감도 정보 획득 단계
S240
bona fide 측정 단계
S250
실제 양자 상관 추정 단계
S260
서브 시스템 분리 가능 ?
QFI Fq(ρ AB) < 제2 임계치 ?
No
Yes
S265
서브 시스템 분리
Fq (ρ A ρ B, H) = Fq (ρ A) + Fq (ρ B)