



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2015-0097290

(43) 공개일자 2015년08월26일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H03M 13/00 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2014-0018624

(22) 출원일자 2014년02월18일

심사청구일자 2014년02월18일

(71) 출원인

고려대학교 산학협력단

서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)

(72) 발명자

허준

서울특별시 강남구 광평로10길 6 206-103(일원동, 한솔마을아파트)

신정환

서울특별시 성북구 인촌로16길 4-15 (안암동3가, 하이원빌)

(74) 대리인

특허법인충현

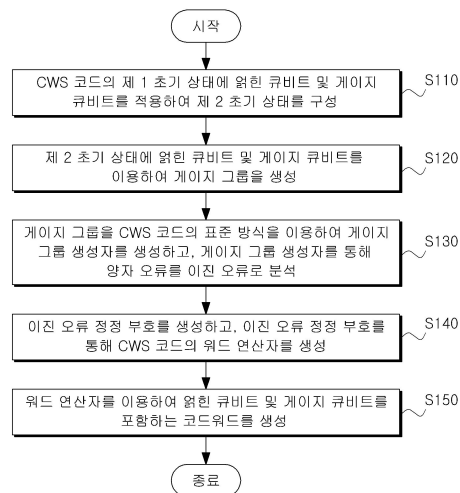
전체 청구항 수 : 총 12 항

(54) 발명의 명칭 양자 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 방법 및 장치

(57) 요약

양자 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 방법 및 장치에 관한 것으로, CWS 코드의 제 1 초기 상태에 얽힌 큐비트 및 게이지 큐비트를 적용하여 제 2 초기 상태를 구성하고, 제 2 초기 상태에 얽힌 큐비트 및 게이지 큐비트를 이용하여 게이지 그룹을 생성하고, 게이지 그룹을 CWS 코드의 표준 방식을 이용하여 게이지 그룹 생성자를 생성하고, 게이지 그룹 생성자를 통해 양자 오류 채널에서 발생하는 양자 오류를 이진 오류로 분석하고, 이진 오류를 수정하는 이진 오류 정정 부호를 생성하며, 이진 오류 정정 부호를 통해 CWS 코드의 워드 연산자를 생성함으로써, 워드 연산자를 이용하여 얽힌 큐비트 및 게이지 큐비트를 포함하는 코드워드를 생성한다.

대표도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 12-911-04-003

부처명 미래창조과학부

연구관리전문기관 한국 방송 통신 진흥원

연구사업명 방송통신기술개발사업

연구과제명 양자통신 및 양자 정보 처리를 위한 기반 기술 개발

기 여 율 1/1

주관기관 고려대학교 산학협력단

연구기간 2012.03.01 ~ 2016.02.28

특허청구의 범위

청구항 1

CWS(Code Word Stabilized Quantum) 코드의 제 1 초기 상태에 얽힌 큐비트(entangled qubit: ebit) 및 게이지 큐비트(gauge qubit)를 적용하여 제 2 초기 상태를 구성하는 단계;

상기 제 2 초기 상태에 상기 얽힌 큐비트 및 상기 게이지 큐비트를 이용하여 게이지 그룹(gauge group)을 생성하는 단계;

상기 게이지 그룹을 상기 CWS 코드의 표준 방식(standard form)을 이용하여 게이지 그룹 생성자를 생성하고, 상기 게이지 그룹 생성자를 통해 양자 오류 채널에서 발생하는 양자 오류를 이진 오류(binary error)로 분석하는 단계;

상기 이진 오류를 수정하는 이진 오류 정정 부호를 생성하고, 상기 이진 오류 정정 부호를 통해 상기 CWS 코드의 워드 연산자(word operator)를 생성하는 단계; 및

상기 워드 연산자를 이용하여 상기 얽힌 큐비트 및 상기 게이지 큐비트를 포함하는 코드워드(codeword)를 생성하는 단계를 포함하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 방법.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 워드 연산자를 생성하는 단계는,

상기 CWS 코드의 워드 연산자에 상기 게이지 그룹 생성자를 적용하여 상기 워드 연산자 중 수신부에서 수행되는 얽힌 큐비트를 제거하는 단계; 및

상기 수신부에서 수행되는 얽힌 큐비트를 제거한 워드 연산자에 유니터리 부호화 연산을 이용하여 상기 제 1 초기 상태에 대한 워드 연산자를 생성하는 단계를 더 포함하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 방법.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

송신부와 수신부는,

상기 얽힌 큐비트를 공유하는 것을 특징으로 하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 방법.

청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 워드 연산자를 생성하는 단계는,

송신부에서 독립적으로 수행되는 것을 특징으로 하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 방법.

청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 게이지 그룹 생성자는,

상기 CWS 코드의 표준 방식의 스테빌라이저 생성기(stabilizer generator)를 생성하는 유니터리 부호화 연산을 이용하여 상기 게이지 그룹을 부호화함으로써 생성되는 것을 특징으로 하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 방법.

청구항 6

제 1 항에 있어서,

상기 게이지 그룹 생성자는,

오류 정정 부호에서 수신된 부호가 패리티 검사(parity check) 방정식을 만족하는 상태에 대한 스테빌라이저 연산자(stabilizer operator), 상기 얽힌 큐비트에 대한 스테빌라이저 연산자, 및 상기 게이지 큐비트에 대한 스테빌라이저 연산자를 모두 포함하는 것을 특징으로 하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 방법.

청구항 7

제 1 항 내지 제 6 항 중에 어느 한 항의 방법을 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체.

청구항 8

CWS(Code Word Stabilized Quantum) 코드의 제 1 초기 상태에 얽힌 큐비트(entangled qubit: ebit) 및 게이지 큐비트(gauge qubit)를 적용하여 제 2 초기 상태를 구성하는 초기화부;

상기 제 2 초기 상태에 상기 얽힌 큐비트 및 상기 게이지 큐비트를 이용하여 게이지 그룹(gauge group)을 생성하는 게이지 그룹 생성부;

상기 게이지 그룹을 상기 CWS 코드의 표준 방식(standard form)을 이용하여 게이지 그룹 생성자를 생성하는 게이지 그룹 생성자 생성부;

상기 게이지 그룹 생성자를 통해 양자 오류 채널에서 발생하는 양자 오류를 이진 오류(binary error)로 분석하는 분석부;

상기 이진 오류를 수정하는 이진 오류 정정 부호를 생성하고, 상기 이진 오류 정정 부호를 통해 상기 CWS 코드의 워드 연산자(word operator)를 생성하는 워드 연산자 생성부; 및

상기 워드 연산자를 이용하여 상기 얽힌 큐비트 및 상기 게이지 큐비트를 포함하는 코드워드(codeword)를 생성하는 코드워드 생성부를 포함하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 장치.

청구항 9

제 8 항에 있어서,

상기 워드 연산자 생성부는,

상기 CWS 코드의 워드 연산자에 상기 게이지 그룹 생성자를 적용하여 상기 워드 연산자 중 수신부에서 수행되는 얽힌 큐비트를 제거하고, 상기 수신부에서 수행되는 얽힌 큐비트를 제거한 워드 연산자에 유니터리 부호화 연산을 이용하여 상기 제 1 초기 상태에 대한 워드 연산자를 생성하되,

송신부에서 독립적으로 수행되는 것을 특징으로 하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 장치.

청구항 10

제 8 항에 있어서,

송신부와 수신부는,

상기 얽힌 큐비트를 공유하는 것을 특징으로 하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 장치.

청구항 11

제 8 항에 있어서,

상기 게이지 그룹 생성자 생성부는,

상기 CWS 코드의 표준 방식의 스테빌라이저 생성기(stabilizer generator)를 생성하는 유니터리 부호화 연산을 이용하여 상기 게이지 그룹을 부호화함으로써 생성하는 것을 특징으로 하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 장치.

청구항 12

제 8 항에 있어서,

상기 게이지 그룹 생성자는,

오류 정정 부호에서 수신된 부호가 패리티 검사(parity check) 방정식을 만족하는 상태에 대한 스테빌라이저 연산자(stabilizer operator), 상기 얽힌 큐비트에 대한 스테빌라이저 연산자, 및 상기 게이지 큐비트에 대한 스테빌라이저 연산자를 모두 포함하는 것을 특징으로 하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 장치.

명세서

기술 분야

[0001] 본 발명은 양자 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 기술에 관한 것으로서, 특히 송신부와 수신부가 얽힌 큐비트를 공유하는 경우에 얽힌 큐비트와 게이지 큐비트를 이용하여 양자 오류를 정정할 수 있는 양자 부호를 생성하는 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 양자정보통신(Quantum Information Communication Technology)은 20세기 말에 등장한 새로운 기술로 양자물리학의 원리에 입각하여 정보를 저장, 전송 그리고 처리하는 과정에 관한 테크놀로지로서, 양자물리학과 정보통신 기술이 접목되어 형성되었다. 이와 관련하여 전자나 원자, 빛의 입자인 광자를 나노기술로 하나씩 제어할 수 있는 극미소 세계에서는 통상적인 거시 세계에서는 이해하기 어려운 신기한 현상이 일어난다. 입자로서 성질 외에 파동으로서 성질이 현저하게 나타나는 것인데, 이 세계는 양자역학으로만 설명할 수 있다. 양자역학에는 3가지 기본 성질인 중첩(superposition), 얽힘(entanglement) 및 관측을 이용하여 통신이나 정보처리에 이용하는 움직임이 활발하게 추진되고 있는데, 이를 위한 기술이 바로 양자정보기술이다.

[0003] 특히, 최근 들어 이런 특성을 활용해 양자암호통신, 양자 프로세서, 양자 시뮬레이션, 양자 컴퓨터 등 다양한 적용 대상이 제안되고 있다. 양자정보통신은 기존의 프로세서에서 사용하는 비트 대신에 큐비트(qubit)를 사용한다. 예를 들어, 고전 프로세서에서 10비트는 2의 10승, 즉 1024번의 연산을 차례차례 수행하지만 양자 프로세서의 10큐비트는 1024번의 연산을 동시에 수행한다. 즉, 양자컴퓨터는 이런 특징을 이용해 연산 속도를 획기적으로 높일 수 있다. 이러한 양자정보통신의 한 축으로서, 송수신에서의 오류를 정정하는 다양한 기술이 제안되고 있다.

[0004] 현재 진행되고 있는 대부분의 양자 오류 정정 부호에 대한 기술은 기존 오류 정정 부호 설계 기법을 적용하여 새로운 양자 오류 정정 부호를 만든 추세이다. 양자 오류 정정 부호는 그 구성 방법에 의해 크게 선형 부호와 비선형 부호로 나뉘질 수 있다.

[0005] 선형 부호 중 안정 부호(stabilizer code)는 기존 선형 블록 부호 중 듀얼 컨테이닝(dual-containing) 조건을 만족하는 부호를 이용하여 쉽게 양자 오류 정정 부호를 구성하는 방법을 제시하고 있으며, 대부분의 양자 오류 정정 부호 기술은 안정 부호를 기반으로 진행되고 있다.

[0006] 최근에는, 선형 부호와 비선형 부호를 모두 기술할 수 있는 코드워드 안정 양자 부호(codeword stabilized quantum (CWS) code)라는 보다 일반적인 부호 설계 기법이 소개되었다. CWS 코드는 기존 오류 정정 부호를 이용하여 양자 오류 정정 부호를 설계할 수 있는 기법을 제시할 수 있다.

[0007] 양자 오류 정정 부호 중 선형 부호는 구성과 부호의 확장이 쉽지만 비선형 부호로 얻을 수 있는 부호의 최대 성능에 미치지 못하는 경우가 있으며, 비선형 부호는 선형 부호보다 좋은 성능을 보여줄 수 있지만 그 구성이 쉽지 않기 때문에 아직 다양하게 개발되지 못했다.

[0008] 비선형 양자 부호 구성의 어려움으로 인하여 아직 다양한 비선형 양자 오류 정정 부호가 개발되지 못했으며, CWS 부호를 포함하여 원형 그래프를 기반으로 현재까지 개발된 비선형 부호가 수정할 수 있는 오류는 단일 오류로 제한되어 있다.

[0009] 최근 양자의 얽힘 현상을 이용하여 양자 오류 정정 부호(Entanglement-assisted quantum error-correcting codes, EAQECCs)를 설계하는 기법이 제안되었으며, EAQECCs 기법은 안정 부호에 얽힌 큐비트(entangled qubit, ebit)을 적용하여 안정 부호의 듀얼 컨테이닝 제한 없이 기존 선형 블록 부호로부터 양자 오류 정정 부호를 설

계할 수 있는 방법을 제시할 수 있다. 또한, 최근 EAQECs에 대한 추가적인 연구는 ebit을 사용하는 경우 안정 부호의 성능을 향상시킬 수 있다는 결과를 보여주고 있다.

[0010]

한편, 인용되는 선행기술 중 비특허문헌 1에서는 양자 역학적 관점에서의 문제가 해결된 오류정정 부호가 가능함을 보이고 이것이 스테빌라이저(stabilizer) 부호라는 고전 오류 정정부호와 유사한 특징을 가진 양자 오류정정부호로 발전됨을 보인다. 또한, 비특허문헌 2에서는 송신자의 큐비트와 수신자의 공유된 큐비트 중 임의의 큐비트에서 발생하는 오류를 정정할 수 있는 얽힘 양자 오류정정부호 기법을 소개하였다.

선행기술문헌

비특허문헌

[0011]

(비특허문헌 0001) Gottesman, D.: Ph.D. thesis, Caltech., 1997

(비특허문헌 0002) Shaw, Bilal., Wilde, Mark M., Oreshkov, Ognyan., Kremsky, Isaac., Lidar, Daniel A.: Encoding one logical qubit into six physical qubits., Phys. Rev. A. 78, 012337, 2008

발명의 내용

해결하려는 과제

[0012]

본 발명이 해결하고자 하는 첫 번째 과제는 CWS 코드의 생성 기법에 얽힌 큐비트 및 게이지 큐비트를 적용하여 양자 오류 정정 부호를 설계함으로써, 양자 오류 정정 부호의 성능을 향상시킬 수 있는 방법을 제공하는 것이다.

[0013]

본 발명이 해결하고자 하는 두 번째 과제는 CWS 코드의 생성 기법에 얽힌 큐비트 및 게이지 큐비트를 적용하여 양자 오류 정정 부호를 설계함으로써, 양자 오류 정정 부호의 성능을 향상시킬 수 있는 장치를 제공하는 것이다.

[0014]

또한, 상기된 방법을 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록 매체를 제공하는데 있다.

과제의 해결 수단

[0015]

상기 첫 번째 과제를 해결하기 위하여, 본 발명의 일 실시예에 따른 CWS(Code Word Stabilized Quantum) 코드의 제 1 초기 상태에 얽힌 큐비트(entangled qubit: ebit) 및 게이지 큐비트(gauge qubit)를 적용하여 제 2 초기 상태를 구성하는 단계; 상기 제 2 초기 상태에 상기 얽힌 큐비트 및 상기 게이지 큐비트를 이용하여 게이지 그룹(gauge group)을 생성하는 단계; 상기 게이지 그룹을 상기 CWS 코드의 표준 방식(standard form)을 이용하여 게이지 그룹 생성자를 생성하고, 상기 게이지 그룹 생성자를 통해 양자 오류 채널에서 발생하는 양자 오류를 이진 오류(binary error)로 분석하는 단계; 상기 이진 오류를 수정하는 이진 오류 정정 부호를 생성하고, 상기 이진 오류 정정 부호를 통해 상기 CWS 코드의 워드 연산자(word operator)를 생성하는 단계; 및 상기 워드 연산자를 이용하여 상기 얽힌 큐비트 및 상기 게이지 큐비트를 포함하는 코드워드(codeword)를 생성하는 단계를 포함하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 방법을 제공한다.

[0016]

상기된 일 실시예에 따른 상기 워드 연산자를 생성하는 단계는, 상기 CWS 코드의 워드 연산자에 상기 게이지 그룹 생성자를 적용하여 상기 워드 연산자 중 수신부에서 수행되는 얽힌 큐비트를 제거하는 단계; 및 상기 수신부에서 수행되는 얽힌 큐비트를 제거한 워드 연산자에 유니터리 부호화 연산을 이용하여 상기 제 1 초기 상태에 대한 워드 연산자를 생성하는 단계를 더 포함하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 방법일 수 있다.

[0017]

상기된 일 실시예에 따른 송신부와 수신부는, 상기 얽힌 큐비트를 공유하는 것을 특징으로 하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 방법일 수 있다.

[0018]

상기된 일 실시예에 따른 상기 워드 연산자를 생성하는 단계는, 송신부에서 독립적으로 수행되는 것을 특징으로 하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 방법일 수 있다.

[0019]

상기된 일 실시예에 따른 상기 게이지 그룹 생성자는, 상기 CWS 코드의 표준 방식의 스테빌라이저 생성기(stabilizer generator)를 생성하는 유니터리 부호화 연산을 이용하여 상기 게이지 그룹을 부호화함으로써 생

성되는 것을 특징으로 하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 방법일 수 있다.

[0020] 상기된 일 실시예에 따른 상기 게이지 그룹 생성자는, 오류 정정 부호에서 수신된 부호가 패리티 검사(parity check) 방정식을 만족하는 상태에 대한 스테빌라이저 연산자(stabilizer operator), 상기 얽힌 큐비트에 대한 스테빌라이저 연산자, 및 상기 게이지 큐비트에 대한 스테빌라이저 연산자를 모두 포함하는 것을 특징으로 하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 방법일 수 있다.

[0021] 상기된 두 번째 과제를 해결하기 위하여, 본 발명의 일 실시예에 따른 CWS(Code Word Stabilized Quantum) 코드의 제 1 초기 상태에 얽힌 큐비트(entangled qubit: ebit) 및 게이지 큐비트(gauge qubit)를 적용하여 제 2 초기 상태를 구성하는 초기화부; 상기 제 2 초기 상태에 상기 얽힌 큐비트 및 상기 게이지 큐비트를 이용하여 게이지 그룹(gauge group)을 생성하는 게이지 그룹 생성부; 상기 게이지 그룹을 상기 CWS 코드의 표준 방식(standard form)을 이용하여 게이지 그룹 생성자를 생성하는 게이지 그룹 생성자 생성부; 상기 게이지 그룹 생성자를 통해 양자 오류 채널에서 발생하는 양자 오류를 이진 오류(binary error)로 분석하는 분석부; 상기 이진 오류를 수정하는 이진 오류 정정 부호를 생성하고, 상기 이진 오류 정정 부호를 통해 상기 CWS 코드의 워드 연산자(word operator)를 생성하는 워드 연산자 생성부; 및 상기 워드 연산자를 이용하여 상기 얽힌 큐비트 및 상기 게이지 큐비트를 포함하는 코드워드(codeword)를 생성하는 코드워드 생성부를 포함하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 장치를 제공한다.

[0022] 상기된 일 실시예에 따른 상기 워드 연산자 생성부는, 상기 CWS 코드의 워드 연산자에 상기 게이지 그룹 생성자를 적용하여 상기 워드 연산자 중 수신부에서 수행되는 얽힌 큐비트를 제거하고, 상기 수신부에서 수행되는 얽힌 큐비트를 제거한 워드 연산자에 유니터리 부호화 연산을 이용하여 상기 제 1 초기 상태에 대한 워드 연산자를 생성하되, 송신부에서 독립적으로 수행되는 것을 특징으로 하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 장치일 수 있다.

[0023] 상기된 일 실시예에 따른 송신부와 수신부는, 상기 얽힌 큐비트를 공유하는 것을 특징으로 하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 장치일 수 있다.

[0024] 상기된 일 실시예에 따른 상기 게이지 그룹 생성자 생성부는, 상기 CWS 코드의 표준 방식의 스테빌라이저 생성기(stabilizer generator)를 생성하는 유니터리 부호화 연산을 이용하여 상기 게이지 그룹을 부호화함으로써 생성하는 것을 특징으로 하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 장치일 수 있다.

[0025] 상기된 일 실시예에 따른 상기 게이지 그룹 생성자는, 오류 정정 부호에서 수신된 부호가 패리티 검사(parity check) 방정식을 만족하는 상태에 대한 스테빌라이저 연산자(stabilizer operator), 상기 얽힌 큐비트에 대한 스테빌라이저 연산자, 및 상기 게이지 큐비트에 대한 스테빌라이저 연산자를 모두 포함하는 것을 특징으로 하는 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 장치일 수 있다.

[0026] 상기된 다른 기술적 과제를 해결하기 위하여, 본 발명은 상기된 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 방법을 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록 매체를 제공한다.

발명의 효과

[0027] 본 발명이 해결하고자 하는 첫 번째 과제는 CWS 코드의 생성 기법에 얽힌 큐비트 및 게이지 큐비트를 적용하여 양자 오류 정정 부호를 설계함으로써, 양자 오류 정정 부호의 성능을 향상시킬 수 있는 효과가 있다.

[0028] 본 발명이 해결하고자 하는 두 번째 과제는 CWS 코드의 생성 기법에 얽힌 큐비트 및 게이지 큐비트를 적용하여 양자 오류 정정 부호를 설계함으로써, 양자 오류 정정 부호의 성능을 향상시킬 수 있는 장치를 제공하는 것이다.

도면의 간단한 설명

[0029] 도 1은 본 발명의 일 실시예들이 채택하고 있는 양자 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 방법을 도시한 흐름도이다.

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 제 2 초기 상태에 대한 게이지 그룹 생성자를 도시한 도면이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 CWS 코드의 표준 방식에 의한 게이지 그룹 생성자를 도시한 도면이다.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 워드 연산자를 생성하는 방법을 도시한 흐름도이다.

도 5는 본 발명의 일 실시예들이 채택하고 있는 양자 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 장치를 도시한 블록도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0030] 본 발명의 실시예들을 설명하기에 앞서, 양자 오류 정정 부호 기술에 관해 개괄적으로 소개하고, 본 발명의 실시예들이 채택하고 있는 기술적 수단을 개괄적으로 소개하도록 한다.
- [0031] 양자 오류 정정 부호는 전체 벡터 공간의 일부 부분 공간에 정보를 넣어 보호하는 형태로 구성되는 것이 일반적인 방법이다. 최근 QECC 기법을 이용할 경우 부분 공간뿐만 아니라 서브 시스템을 활용하여 양자 오류 정정 부호를 구성할 수 있음이 증명되었다. 추가로, 얽힌 큐비트를 사용할 경우 양자 오류 정정 부호의 성능 및 제한 사항을 극복할 수 있는 기법이 연구되었다. CWS 부호는 기존 오류 정정 부호로부터 선형 및 비선형 양자 오류 정정 부호를 구성할 수 있는 기법으로 부분 공간을 이용한 양자 오류 정정 부호 기법이다.
- [0032] 따라서, 본 발명에서는 CWS 부호의 설계 기법을 기반으로 QECC 기법을 적용하여 CWS 부호 기법을 서브 시스템으로 확장하고 얽힌 큐비트를 적용하여 CWS 부호 기법의 제한 사항을 극복하는 기법을 제안하는 발명으로 새로운 양자 오류 정정 부호의 설계 기법 개발에 그 목적을 두고 있다. 그 구체적인 방법으로 게이지 큐비트를 이용하여 CWS 코드로 설계되는 양자 오류 정정 부호를 서브시스템 양자 오류 정정 부호로 확장하고 얽힌 큐비트를 추가하여 오류 정정 부호의 성능을 개선할 수 있는 기술적 수단을 제안하고자 한다.
- [0033] 이하에서는 도면을 참조하여 본 발명의 실시예들을 구체적으로 설명하도록 한다. 다만, 하기의 설명 및 첨부된 도면에서 본 발명의 요지를 흐릴 수 있는 공지 기능 또는 구성에 대한 상세한 설명은 생략한다. 또한, 도면 전체에 걸쳐 동일한 구성 요소들은 가능한 한 동일한 도면 부호로 나타내고 있음에 유의하여야 한다.
- [0034] 도 1은 본 발명의 일 실시예들이 채택하고 있는 양자 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 방법을 도시한 흐름도로서, CWS(Code Word Stabilized Quantum) 코드의 제 1 초기 상태에 얽힌 큐비트(entangled qubit: ebit) 및 게이지 큐비트(gauge qubit)를 적용하여 제 2 초기 상태를 구성하고, 상기 제 2 초기 상태에 상기 얽힌 큐비트 및 상기 게이지 큐비트를 이용하여 게이지 그룹(gauge group)을 생성하고, 상기 게이지 그룹을 상기 CWS 코드의 표준 방식(standard form)을 이용하여 게이지 그룹 생성자를 생성하고, 상기 게이지 그룹 생성자를 통해 양자 오류 채널에서 발생하는 양자 오류를 이진 오류(binary error)로 분석하고, 상기 이진 오류를 수정하는 이진 오류 정정 부호를 생성하며, 상기 이진 오류 정정 부호를 통해 상기 CWS 코드의 워드 연산자(word operator)를 생성함으로써, 상기 워드 연산자를 이용하여 상기 얽힌 큐비트 및 상기 게이지 큐비트를 포함하는 코드워드(codeword)를 생성한다. 또한, 송신부와 수신부는, 상기 얽힌 큐비트를 공유한다.
- [0035] 보다 구체적으로, S110 단계에서 CWS 코드의 제 1 초기 상태에 얽힌 큐비트 및 게이지 큐비트를 적용하여 제 2 초기 상태를 구성한다.
- [0036] 예를 들어, e개의 양자 오류를 수정하기 위해서 n-큐비트의 제 1 초기 상태에 r개의 게이지 큐비트, 2c개의 얽힌 큐비트, 및 s=n-r-c개의 '0' 상태를 이용하여 다음과 같은 제 2 초기 상태를 구성할 수 있다.

수학식 1

$$|S_b\rangle = |0\rangle^{\otimes s} |\Phi_+\rangle^{\otimes c} |\psi\rangle$$

- [0037]
- [0038] 여기서, $|\psi\rangle$ 는 임의의 큐비트이고, $|\Phi_+\rangle$ 는 얽힌 큐비트일 수 있다. 또한, 상기 '0' 상태는 기존 오류 정정 부호에서 수신된 부호가 패리티 검사(parity check) 방정식을 만족하는 경우일 수 있다.
- [0039] 한편, 상기 제 2 초기 상태에 대한 게이지 그룹 생성 연산자는 도 2와 같이 3가지 형태의 집합일 수 있다.
- [0040] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 제 2 초기 상태에 대한 게이지 그룹 생성자를 도시한 도면으로서, 오류 정정 부호에서 수신된 부호가 패리티 검사(parity check) 방정식을 만족하는 상태에 대한 스테빌라이저 연산자(stabilizer operator)(21), 상기 얽힌 큐비트에 대한 스테빌라이저 연산자(22), 및 상기 게이지 큐비트에 대한 스테빌라이저 연산자(23)를 모두 포함할 수 있다.
- [0041] 보다 구체적으로, 오류 정정 부호에서 수신된 부호가 패리티 검사 방정식을 만족하는 상태에 대한 스테빌라이저

연산자 (21)의 경우 수학적 1의 $|0\rangle^{\otimes s}$ 에 작용하는 연산자로 $|0\rangle^{\otimes s}$ 와 연산을 하여도 영향을 미치지 않는다. 따라서, 연산 후에 $|0\rangle^{\otimes s}$ 가 변하게 된다면 이를 통해 오류 발생했다는 것을 확인할 수 있게 된다.

[0042] 또한, 얽힌 큐비트에 대한 스테빌라이저 연산자(22)의 경우 수학적 1의 $|\Phi_+\rangle^{\otimes c}$ 에 작용하는 연산자로 오류 정정 부호에서 수신된 부호가 패리티 검사 방정식을 만족하는 상태에 대한 스테빌라이저 연산자(21)와 마찬가지로 $|\Phi_+\rangle^{\otimes c}$ 와 연산을 하여도 영향을 미치지 않기 때문에 오류 발생 여부를 확인할 수 있다.

[0043] 또한, 게이지 큐비트에 대한 스테빌라이저 연산자(23)의 경우 수학적 1의 $|\psi\rangle$ 에 작용하는 연산자로 오류 정정 부호에서 수신된 부호가 패리티 검사 방정식을 만족하는 상태에 대한 스테빌라이저 연산자(21)와 마찬가지로 $|\psi\rangle$ 과 연산을 할 시에 영향을 미치지 않기 때문에 오류 발생 여부를 확인할 수 있다.

[0044] 이제 다시 도 1로 돌아가 S110 단계에 이후를 설명하도록 한다.

[0045] S120 단계에서, 상기 제 2 초기 상태에 상기 얽힌 큐비트 및 상기 게이지 큐비트를 이용하여 게이지 그룹(gauge group)을 생성한다.

[0046] S130 단계에서, 상기 게이지 그룹을 상기 CWS 코드의 표준 방식(standard form)을 이용하여 게이지 그룹 생성자를 생성하고, 상기 게이지 그룹 생성자를 통해 양자 오류 채널에서 발생하는 양자 오류를 이진 오류(binary error)로 분석한다.

[0047] 보다 구체적으로, 상기 CWS 코드의 표준 방식의 스테빌라이저 생성기(stabilizer generator)를 생성하는 유니터리 부호화 연산을 이용하여 상기 게이지 그룹을 부호화함으로써 생성될 수 있다. 이때, 상기 CWS 코드의 표준 방식에 의한 게이지 그룹 생성자는 도 3과 같을 수 있다.

[0048] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 CWS 코드의 표준 방식에 의한 게이지 그룹 생성자를 도시한 도면이다.

[0049] 보다 구체적으로, 도 3의 상단에 위치한 연산자(31)의 경우 도 2의 오류 정정 부호에서 수신된 부호가 패리티 검사 방정식을 만족하는 상태에 대한 스테빌라이저 연산자(21)를 유니터리 부호화 연산을 이용하여 부호화한 것으로 총 m 개의 생성자가 $|0\rangle^{\otimes s}$ 의 각 위치마다 X 오류를 포함하고 있기 때문에, 본 발명을 통해 수정하고자 하는 오류 중 $|0\rangle^{\otimes s}$ 에서 발생하는 오류의 X 를 상쇄시켜 I , Z 만 남도록 변환할 수 있다.

[0050] 또한, 도 3의 중간에 위치한 연산자(32)의 경우 얽힌 큐비트에 대한 스테빌라이저 연산자(22)를 유니터리 부호화 연산을 이용하여 부호화한 것으로 총 c 개의 생성자가 $|\Phi_+\rangle^{\otimes c}$ 의 각 위치마다 X 오류를 포함하고 있기 따라서 본 발명을 통해 수정하고자 하는 오류 중 $|\Phi_+\rangle^{\otimes c}$ 에서 발생하는 오류의 X 를 상쇄시켜 I , Z 만 남도록 변환할 수 있다.

[0051] 또한, 도 3의 하단에 위치한 연산자(33)의 경우 게이지 큐비트에 대한 스테빌라이저 연산자(23)를 유니터리 부호화 연산을 이용하여 부호화한 것으로 총 r 개의 생성자가 $|\psi\rangle$ 의 각 위치마다 X 오류를 포함하고 있기 때문에, 본 발명을 통해 수정하고자 하는 오류의 X 를 상쇄시켜 I , Z 만 남도록 변환할 수 있다.

[0052] 또한, 상기 게이지 그룹 생성자를 이용하여 양자 오류 채널에서 발생하는 하나 이상의 양자 오류를 하나 이상의 이진 오류로 분석할 수 있다. 즉, 예를 들어 e 개의 양자 오류가 발생할 수 있는 양자 오류 채널에서 발생할 수 있는 모든 가능한 오류를 이진 오류로 변환할 수 있다. 이때, 양자 오류와 이진 오류의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

수학적 2

$$Cl_G(E = \pm Z^v X^u) = \mathbf{v} \oplus \bigoplus_{l=1}^n u_l \mathbf{r}_l,$$

[0053]

- [0054] 여기서, 상기 E는 채널에서 발생한 오류를 나타내며, 상기 v와 상기 u는 이진 벡터를 의미하고, 상기 r_1 는 스테빌라이저 생성기를 구성하는 원형 그래프를 나타내는 이진 행렬의 1번째 행을 의미하며, 상기 X와 상기 Z는 파울리 연산자를 의미할 수 있다.
- [0055] S140 단계에서, 상기 이진 오류를 수정하는 이진 오류 정정 부호를 생성하고, 상기 이진 오류 정정 부호를 통해 상기 CWS 코드의 워드 연산자(word operator)를 생성한다. 여기서, S140 단계는 도 4의 워드 연산자 생성 방법을 더 포함할 수 있다.
- [0056] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 워드 연산자를 생성하는 방법을 도시한 흐름도이다.
- [0057] S410 단계에서, 상기 CWS 코드의 워드 연산자에 상기 게이지 그룹 생성자를 적용하여 상기 워드 연산자 중 수신부에서 수행되는 얽힌 큐비트를 제거할 수 있다.
- [0058] S420 단계에서, 상기 수신부에서 수행되는 얽힌 큐비트를 제거한 워드 연산자에 유니터리 부호화 연산을 이용하여 상기 제 1 초기 상태에 대한 워드 연산자를 생성할 수 있다.
- [0059] 한편, 상기 워드 연산자를 생성하는 단계는, 송신부에서 독립적으로 수행될 수 있다.
- [0060] 이제 다시 도 1로 돌아가 S140 단계 이후를 설명하도록 한다.
- [0061] S150 단계에서, 상기 워드 연산자를 이용하여 상기 얽힌 큐비트 및 상기 게이지 큐비트를 포함하는 코드워드(codeword)를 생성한다. 다시 말해, 상기 생성된 초기 상태의 워드 연산자가 이하의 수학식 3 및 수학식 4와 같은 형태를 만족하는 양자 오류 정정 부호를 구성할 수 있다.

수학식 3

$$w'_l |S'\rangle \equiv |w'_l\rangle = |x\rangle \otimes Z^u X^w |\Phi_+\rangle^{\otimes c} \otimes |\psi\rangle.$$

수학식 4

$$w'_l = X^x \otimes Z^u X^w \otimes I^{\otimes r} |I^{\otimes c},$$

- [0064] 여기서, w'_l 은 CWS 코드의 워드 연산자이고, S' 는 CWS 코드의 초기 상태일 수 있다.
- [0065] 도 5는 본 발명의 일 실시예들이 채택하고 있는 양자 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 장치를 도시한 블록도로서, 양자 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 장치(50)는 앞서 기술한 도 1의 각 과정에 대응하는 구성을 포함한다. 따라서, 여기서는 설명의 중복을 피하기 위해 시스템의 세부구성을 중심으로 그 기능을 약술하도록 한다.
- [0066] 초기화부(51)는 CWS(Code Word Stabilized Quantum) 코드의 제 1 초기 상태에 얽힌 큐비트(entangled qubit: ebit) 및 게이지 큐비트(gauge qubit)를 적용하여 제 2 초기 상태를 구성한다.
- [0067] 게이지 그룹 생성부(52)는 상기 제 2 초기 상태에 상기 얽힌 큐비트 및 상기 게이지 큐비트를 이용하여 게이지 그룹(gauge group)을 생성한다.
- [0068] 게이지 그룹 생성자 생성부(53)는 상기 게이지 그룹을 상기 CWS 코드의 표준 방식(standard form)을 이용하여 게이지 그룹 생성자를 생성한다.
- [0069] 분석부(54)는 상기 게이지 그룹 생성자를 통해 양자 오류 채널에서 발생하는 양자 오류를 이진 오류(binary error)로 분석한다.
- [0070] 워드 연산자 생성부(55)는 상기 이진 오류를 수정하는 이진 오류 정정 부호를 생성하고, 상기 이진 오류 정정 부호를 통해 상기 CWS 코드의 워드 연산자(word operator)를 생성한다.
- [0071] 코드워드 생성부(56)는 상기 워드 연산자를 이용하여 상기 얽힌 큐비트 및 상기 게이지 큐비트를 포함하는 코드

워드(codeword)를 생성한다.

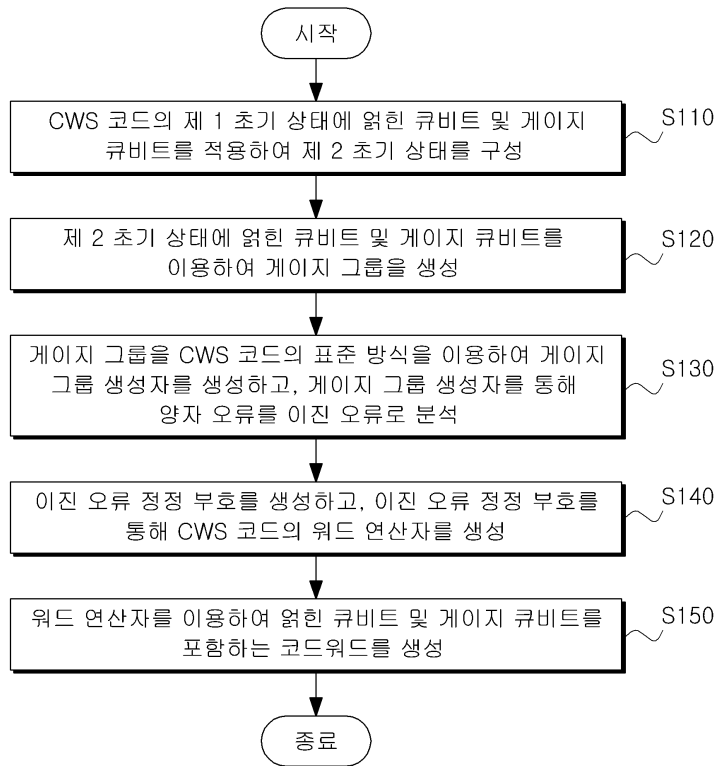
- [0072] 또한, 워드 연산자 생성부(55)는 상기 CWS 코드의 워드 연산자에 상기 게이지 그룹 생성자를 적용하여 상기 워드 연산자 중 수신부에서 수행되는 얽힌 큐비트를 제거하고, 상기 수신부에서 수행되는 얽힌 큐비트를 제거한 워드 연산자에 유니터리 부호화 연산을 이용하여 상기 제 1 초기 상태에 대한 워드 연산자를 생성하되, 송신부에서 독립적으로 수행될 수 있다.
- [0073] 또한, 송신부와 수신부는 상기 얽힌 큐비트를 공유할 수 있다.
- [0074] 또한, 게이지 그룹 생성자 생성부(53)는 상기 CWS 코드의 표준 방식의 스테빌라이저 생성기(stabilizer generator)를 생성하는 유니터리 부호화 연산을 이용하여 상기 게이지 그룹을 부호화함으로써 생성할 수 있다.
- [0075] 또한, 상기 게이지 그룹은 오류 정정 부호에서 수신된 부호가 패리티 검사(parity check) 방정식을 만족하는 상태에 대한 스테빌라이저 연산자(stabilizer operator), 상기 얽힌 큐비트에 대한 스테빌라이저 연산자, 및 상기 게이지 큐비트에 대한 스테빌라이저 연산자를 모두 포함할 수 있다.
- [0076] 상기된 본 발명에 따르면, CWS 코드 기법에 연산자 양자 오류 정정 부호 기법과 얽힌 큐비트를 적용하여 CWS 코드를 서브시스템 양자 오류 정정 부호로 확장하고, 동시에 얽힌 큐비트를 이용하여 CWS 코드의 성능을 개선할 수 있는 효과가 있다. 여기서, CWS 코드는 고전 오류 정정 부호로부터 체계적으로 비선형 부호 구성할 수 있는 기법으로 서브스페이스를 이용한 양자 오류 정정 부호이다. 따라서, 비선형 부호를 체계적으로 설계할 수 있는 CWS 코드 기법에 연산자 양자 오류 정정 부호 기법을 적용하여 비선형 부호 및 선형 부호를 설계할 수 있는 CWS 코드를 서브스페이스 코드와 서브시스템 코드를 모두 포함하는 일반적인 양자 오류 정정 부호 설계 기법으로 확장할 수 있다. 나아가, 얽힌 큐비트를 적용하여 CWS 코드의 성능과 한계점을 극복할 수 있다.
- [0077] 한편, 본 발명의 실시예들은 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록 매체에 컴퓨터가 읽을 수 있는 코드로 구현하는 것이 가능하다. 컴퓨터가 읽을 수 있는 기록 매체는 컴퓨터 시스템에 의하여 읽혀질 수 있는 데이터가 저장되는 모든 종류의 기록 장치를 포함한다.
- [0078] 컴퓨터가 읽을 수 있는 기록 매체의 예로는 ROM, RAM, CD-ROM, 자기 테이프, 플로피디스크, 광 데이터 저장장치 등이 있으며, 또한 캐리어 웨이브(예를 들어 인터넷을 통한 전송)의 형태로 구현하는 것을 포함한다. 또한, 컴퓨터가 읽을 수 있는 기록 매체는 네트워크로 연결된 컴퓨터 시스템에 분산되어, 분산 방식으로 컴퓨터가 읽을 수 있는 코드가 저장되고 실행될 수 있다. 그리고 본 발명을 구현하기 위한 기능적인(functional) 프로그램, 코드 및 코드 세그먼트들은 본 발명이 속하는 기술 분야의 프로그래머들에 의하여 용이하게 추론될 수 있다.
- [0079] 이상에서 본 발명에 대하여 그 다양한 실시예들을 중심으로 살펴보았다. 본 발명에 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자는 본 발명이 본 발명의 본질적인 특성에서 벗어나지 않는 범위에서 변형된 형태로 구현될 수 있음을 이해할 수 있을 것이다. 그러므로 개시된 실시예들은 한정적인 관점이 아니라 설명적인 관점에서 고려되어야 한다. 본 발명의 범위는 전술한 설명이 아니라 특허청구범위에 나타나 있으며, 그와 동등한 범위 내에 있는 모든 차이점은 본 발명에 포함된 것으로 해석되어야 할 것이다.

부호의 설명

- [0080] 50 : 양자 오류 정정을 위한 양자 부호 생성 장치
- 51 : 초기화부
- 52 : 게이지 그룹 생성부
- 53 : 게이지 그룹 생성자 생성부
- 54 : 분석부
- 55 : 워드 연산자 생성부
- 56 : 코드워드 생성부

도면

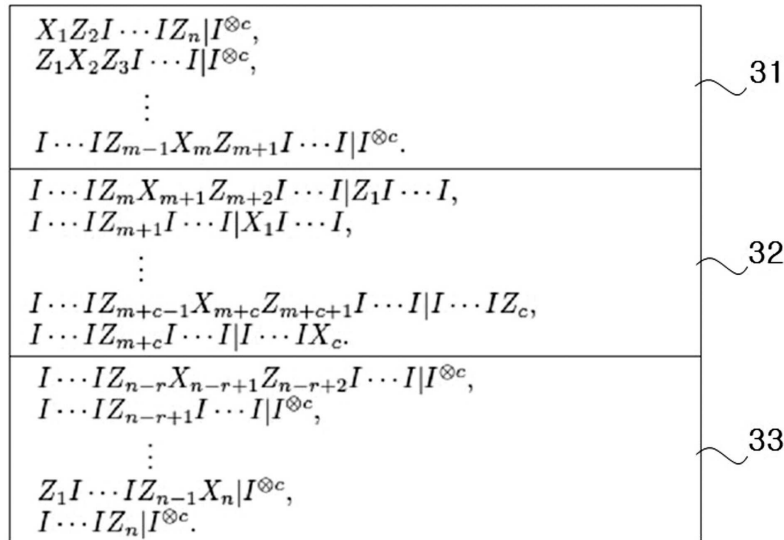
도면1



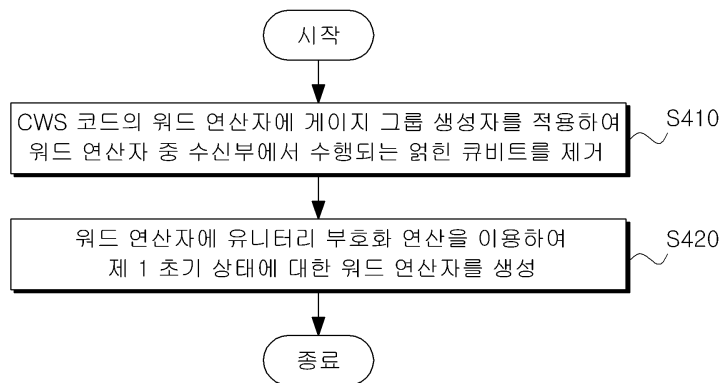
도면2

$Z_1 I I \dots I I^{\otimes c}$ $\vdots$ $I \dots I Z_s I \dots I I^{\otimes c}$	'0' state에 대한 stabilizer 연산자	21
$I \dots I Z_{s+1} I \dots I Z_1 I \dots I,$ $I \dots I X_{s+1} I \dots I X_1 I \dots I,$ $\vdots$ $I \dots I Z_{s+c} I \dots I I \dots I Z_c,$ $I \dots I X_{s+c} I \dots I I \dots I X_c.$	ebit에 대한 stabilizer 연산자	22
$I \dots I Z_{n-r+1} I \dots I I^{\otimes c},$ $I \dots I X_{n-r+1} I \dots I I^{\otimes c},$ $\vdots$ $I \dots I Z_n I^{\otimes c},$ $I \dots I X_n I^{\otimes c}.$	gauge qubit에 대한 stabilizer 연산자	23

도면3



도면4



도면5

