

보도자료



보도일시	즉시
	2023. 4. 24.(월)
문의	연구단장/연구책임자 정현석 교수(02-880-2635) / 교신저자
	연구단/연구진 이석형 연구원(sh.lee1524@gmail.com) / 제1저자

오류에 높은 내성을 가진 광자 양자컴퓨팅 방법 개발 - 다광자 인코딩을 이용하여 오류 정정 효율 극대화, 양자컴퓨팅의 기술적 진입장벽 낮춰 -

■ 요약

연구 필요성	양자컴퓨팅은 환경의 영향에 취약해 오류가 쉽게 발생한다. 이를 해결하기 위해 오류에 높은 내성을 갖는 오류정정 방법이 필요하다. 그러나 현재까지 알려진 방법들은 많은 추가적 자원을 소모하는데다 현실적인 오류율을 견딜 수 있는 충분한 내성을 가지고 있지 않다. 적은 자원으로 오류에 높은 내성을 제공하는 효율적인 양자컴퓨팅 방법의 개발은 양자컴퓨터의 실용적 구현을 위해 필수적이다.
연구성과/ 기대효과	본 연구에서는 다광자 얽힘 인코딩에 기반한 오류 정정을 통해 적은 자원으로도 높은 오류율에 내성을 가지는 양자컴퓨팅 방법을 고안하였다. 즉, 여러 개의 광자들을 최대의 얽힘 상태로 만들어서 하나의 큐비트로 사용하는 방법으로 기존의 방법보다 자원 사용에 있어 효율적이면서도 오류에 높은 내성을 가질 수 있음을 증명하였다. 이 연구결과를 통해 본격적인 양자컴퓨터의 출현에 한 걸음 더 다가섰다.

■ 본문

<p>□ 서울대학교 물리천문학부 정현석 교수 연구팀은 적은 자원을 이용하면서도 오류에 압도적으로 높은 내성을 가지는 측정기반 양자컴퓨팅 방법을 설계하였다.</p> <ul style="list-style-type: none">○ 양자컴퓨팅의 기본 단위인 큐비트는 환경의 영향을 받아 오류가 쉽게 발생한다는 문제점을 갖고 있다. 고전컴퓨팅보다 실용적인 우위를 가지는 양자컴퓨팅을 실현하기 위해서는 오류에 높은 내성을 갖는 양자컴퓨팅 방법의 개발이 필수적이다.○ 이를 위해 '양자 오류 정정' 방법들이 연구되었다. 이는 여러 개의 보조 큐비트들을 사용하여 하나의 큐비트에 발생하는 오류들을 감지하고 정정한다. 이를 통해 신뢰할만한 하나의 큐비트 정보를
--

얻어내는 것이 가능하다. 양자 오류정정을 통해 논리적 오류 확률을 임의로 낮추는 것이 가능한 최대 오류율을 오류허용 임계값이라 하며, 오류율이 이보다 높으면 효과적인 오류 정정은 불가능해진다.

- 오류정정 방법은 막대한 양의 큐비트들과 연산 과정들을 추가적으로 소모한다. 이는 확장성 있는 양자컴퓨터의 구현에 어려움이 될 수 있다. 오류가 전파되는 현실적인 조건을 고려했을 때, 실제 양자컴퓨팅의 오류허용 임계값은 큐비트당 최대 2~3%를 넘어서기 어려울 것으로 평가되었다.
- 효율적인 양자 오류정정을 위해서는 그래프 상태라고 불리는 여러 개의 큐비트들로 구성된 얽힘 상태를 만들어낼 필요가 있다. 얽힘이란 큐비트들이 비고전적인 상관관계를 가지고 양자역학적으로 연결되어 있는 현상을 말한다. 이러한 그래프 상태를 만든 후에 개별 큐비트들에 측정을 가함으로써 양자컴퓨팅을 수행하는 방법을 '측정기반 양자컴퓨팅'이라고 부른다.
- 연구진은 자원 사용에 있어 효율적인 동시에 오류에 높은 내성을 갖는 측정기반 양자컴퓨팅 프로토콜을 제안하였다. 최종적으로 실제적인 조건 아래에서 하나의 물리적 큐비트당 약 8.5%의 오류허용 임계값에 도달할 수 있음을 증명하였는데, 이는 같은 조건에서 기존에 예상되던 한계를 3배 이상 끌어올린 것이다. 이를 통해 양자컴퓨팅을 실현하기 위한 기술적 진입장벽을 크게 낮추는데 기여하였다.

□ 연구의 핵심 아이디어는 여러 개의 광자가 최대로 얽혀 있는 다(多)광자 상태를 하나의 큐비트로 구성하는 인코딩 방법을 사용하는 것이다. 다광자 큐비트들을 연결해나가는 방식으로 그래프 상태를 만들면 투입되는 자원의 양을 최적화하고 오류에 대한 높은 내성을 얻어낼 수 있다.

- 그래프 상태를 만드는 데는 흔히 광자 큐비트가 이용된다. 광자 큐비트들을 큐비트들을 연결하는 '얽힘 측정'으로 묶어나감으로써 그래프 상태를 만들 수 있다. 얽힘 측정은 두 개 이상의 큐비트들을 얽혀 있는 상태로 측정하는 것을 말한다. 그런데 광자들은 그래프 상태를 만들기 위한 얽힘 측정 과정에서 많은 실패가 일어난다는 것이 양자컴퓨팅과 오류정정의 효율을 떨어뜨리는 주요 원인이다.
- 연구진은 이러한 문제점을 다광자 인코딩을 사용한 프로토콜을 제안함으로써 해결하였다. 구체적으로 각각의 큐비트들을 단일 광자가 아닌 여러 광자들이 최대로 얽혀있는 상태로 구성한다. 이 최대 얽힘 상태의 성질 때문에 그래프 상태를 만드는 과정 중에 한 번의 측정이 실패해도 연쇄적으로 수행되는 또 다른 측정이 실패한 과정을 보완해 주게 된다. 이런 방법으로 그래프 상태를 효율적으로 만들 수 있다.
- 또한, 더욱 정확한 오류 분석을 위해 오류의 가능성을 추적하는 베이지안(Bayesian) 방법론을 도입하였다. 그 결과 기존의 다른 방법들에 비해 더 적은 자원으로도 월등히 높은 오류 허용 임계값을 달성할 수 있음을 증명하였다.
- 연구 결과는 npj 쿼텀 인포메이션(npj Quantum Information) 저널에 출판될 예정이다. (교신저자 정현석 교수, 제1저자 이석형 박사, 참여저자 스리크리슈나 옴카 박사, 용시아 테오 박사)

□ 연구결과

Parity-encoding-based quantum computing with Bayesian error tracking

Seok-Hyung Lee, Srikrishna Omkar, Yong Siah Teo, and Hyunseok Jeong

(npj Quantum Information, *in press*)

선형광학 양자컴퓨팅은 상온에서 현재의 기술로 구현이 가능한 선형광학 장비들을 사용하는 장점을 가지는 양자컴퓨팅 방식으로, 양자컴퓨팅의 실용적 구현을 위한 주요 후보들 중 하나이다. 선형광학 양자컴퓨팅은 주로 측정기반 양자컴퓨팅 방법이 사용된다. 이는 여러 큐비트들로 구성된 얽힌 상태인 그래프 상태에 여러 분의 측정을 가함으로써 진행되는 양자컴퓨팅 방식을 의미한다. 양자컴퓨팅을 위해 필요한 격자 구조를 가지는 큰 규모의 그래프 상태(라우젠도르프 격자 상태)는 3~5개의 큐비트들로 구성된 작은 그래프 상태들을 '얽힘 측정'을 통해 결합함으로써 생성할 수 있다. 그런데 이 얽힘 측정은 성공 확률이 제한된다는, 즉 비결정론적이라는 문제를 가지고 있다.

선형광학 양자컴퓨팅을 실현하기 위해서는 오류를 일으키는 광자의 손실과 비결정론적인 얽힘 측정의 문제점을 해결해야 한다. 컴퓨팅 과정 중에 언제든지 정보가 담긴 큐비트가 잃어버려질 수 있으며, 얽힘 측정의 성공 확률이 높지 않아서 원하는 그래프 상태를 만드는데 많은 자원이 소모된다. 이 두 가지 요소는 규모가 큰 그래프 상태의 생성을 방해하고 논리적인 오류를 유발한다. 이를 해결하기 위한 기존의 방법은 추가적으로 많은 자원의 소모를 필요로 하며, 이는 확장성 있는 양자컴퓨터의 구현을 어렵게 만든다. 또한 하나의 큐비트에서 발생한 오류가 다른 큐비트들로 퍼져 나가는 현상이 양자컴퓨터의 오류에 대한 내성을 높이기 어렵게 만든다. 현실적인 조건들을 고려했을 때, 많은 양의 큐비트들과 연산 과정들을 추가적으로 소모하면서도 오류허용 임계값(양자 오류정정을 통해 논리적 오류 확률을 임의로 낮추는 것이 가능한 최대 오류율)은 큐비트당 최대 2~3% 정도에 머물 것으로 평가되었다.

본 연구에서는 다광자 인코딩을 기반으로 측정기반 양자 컴퓨팅 방법을 제안하였다. 이 방법은 광자 검출기, 광학 스위치, 광학적 지연선, 빔 스플리터, 3개의 광자로 이루어진 최대 얽힘 상태들을 활용하여 이루어진다. 이러한 장치나 양자 상태들은 현재의 기술로 충분히 높은 확률로 성공적으로 구현할 수 있다는 것이 알려져 있다. 세 광자 얽힘 상태들에서 시작해서 순차적인 얽힘 측정을 통해 3차원 격자 구조를 가진 그래프 상태를 생성한다. 최종적으로 광자들을 적절히 측정함으로써 오류정정을 포함한 양자 컴퓨팅이 이루어진다.

추가로, 정밀한 성능 분석을 위해 비결정론적인 퓨전에 의한 오류를 추적하기 위한 베이지안적 방법론을 제안하였다. 이를 바탕으로 새로운 프로토콜의 성능을 분석한 결과, 기존의 방식보다 자원 사용에 있어서 더 효율적인 동시에 보다 높은 손실 임계값이 도달할 수 있음을 밝혀내었다. 최종적으로 하나의 물리적 큐비트당 약 8.5%의 오류 허용 임계값에 도달할 수 있음을 증명하였는데, 이는 같은 조건에서 기존에 예상되던 한계를 약 3배 이상 끌어올린 것이다.

본격적인 양자 컴퓨팅의 출현은 차세대 정보통신 기술에 막대한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 본 연구에서는 비교적 구현하기 쉬운 선형광학 장비들만을 사용하면서도 자원 효율적이고 높은 손실 내성을 가지는 프로토콜이 가능함을 보였으며, 이는 본격적인 범용 양자컴퓨팅의 구현을 앞당길 수 있을 것으로 기대한다.

□ 용어설명

- ※ **양자 얽힘** : 여러 개의 입자들이 비고전적인 상관관계를 가지고 양자역학적으로 연결되어 있는 현상. 양자컴퓨팅, 양자통신 등의 양자 기술에 매우 광범위하게 사용된다.
- ※ **양자컴퓨팅** : 양자 얽힘, 양자 중첩과 같은 양자 현상들을 활용하여 주어진 계산을 수행하는 컴퓨팅 방식. 큰 수의 소인수분해와 같은 특정한 문제들을 고전 컴퓨터보다 빠르게 풀어낼 수 있음이 알려져 있다.
- ※ **큐비트** : 양자컴퓨팅의 기본 단위. 고전 컴퓨팅에서의 '비트'에 대응되는 개념이다.
- ※ **양자 오류 정정** : 여러 물리적 큐비트들을 결합해 논리적 큐비트를 구성함으로써 각 물리적 큐비트에 발생하는 오류들을 정정하는 것이 가능하도록 하는 방법.
- ※ **그래프 상태** : 여러 큐비트들이 얽혀있는 양자 얽힘 상태의 일종이며, 여러 꼭짓점들과 그 사이의 선들로 이루어지는 그래프의 구조를 갖는다.
- ※ **측정기반 양자컴퓨팅** : 특정한 그래프 상태에 단일 큐비트 측정을 수행함으로써 이루어지는 양자컴퓨팅 방식.
- ※ **오류 허용 임계값** : 양자 오류 정정이 잘 작동하는 최대 오류율. 실제 오류율이 이 값보다 낮아야만 자원을 추가로 투입함으로써 논리적 오류 확률을 0에 가깝게 낮출 수 있다.

□ 연구자 (교신저자)

- 성 명 : 정현석
- 소 속 : 서울대학교 물리천문학부 교수
- 연락처 : 02-880-2635, jeongh@snu.ac.kr

□ 연구자 (제1저자)

- 성 명 : 이석형
- 소 속 : 서울대학교 물리천문학부 박사
(현) 시드니대학교 박사후연구원
- 연락처 : sh.lee1524@gmail.com