

2023 양자정보경진대회(해커톤) 아이디어 및 계획서

참가분야 (택 1)	<input type="checkbox"/> Technical Challenge (지정주제) <input checked="" type="checkbox"/> Creative challenge (자유주제)		
팀 명	양자의 아이		
참가주제	Quantum Karnaugh map in NV center Quantum Computer		
팀 구 성	성명	소속	연락처
	김도겸	한양대학교	010-4129-2421
	나채민	한양대학교	010-5767-2857
	김태현	연세대학교	010-3032-4686
	한승호	UNIST	010-9276-3201
	정호일	한양대학교 에리카	010-2784-7006
아이디어 및 계획			
<p>1. 소개 및 배경</p> <p>디지털 논리 수업에서 회로 이론에 대해 배우면서 고전 컴퓨터에서의 Karnaugh Map은 부울 함수를 단순화하고 디지털 시스템에서 논리 회로 최적화에 큰 영향을 주었음을 배웠습니다. Karnaugh Map의 진리표를 이용해 회로 구조를 시각적으로 표현하고 필요한 게이트 수를 최소화 할 수 있습니다.</p> <p>최근 NV Center Quantum Computer에 대해서 공부하면서 NV electron spin과 single ^{13}C spin의 swap gate를 만드는데 5개나 되는 게이트가 들어가는 것을 알 수 있었습니다(Quantum error correction with spins in diamond. PhD thesis, Delft University of Technology(Cramer, J(2016))). 일반적인 컴퓨터였다면 이처럼 복잡한 논리 회로라도 Karnaugh Map을 이용하여 단순화시킬 수 있겠으나, 양자 컴퓨터에서는 중첩과 얽힘의 특징에 의해 부울 함수로 값을 표현하는 것 자체가 성립하기 까다로워 회로를 단순화하는 정석적인 방법이 없음에 아쉬움을 가졌습니다.</p> <p>본 연구의 아이디어는, 기존 Karnaugh Map의 아이디어를 모티브로 변형시켜 양자 컴퓨터에 적용시킬 수 있는 가능성을 탐구하는 데에서 시작되었습니다. NV Center Quantum Computer라는 특수한 상황에서도 논리 회로를 단순화할 수 있는 'Quantum Karnaugh Map'의 가능성을 찾는 것 자체로 일반적인 상황으로의 확장을 꾀하는 유의미한 연구일 것으로 생각합니다.</p>			
<p>2. 목표 및 문제 정의</p> <p>시간이 지날수록 양자가 정보를 잃는 만큼 양자 회로의 최적화는 NV Center Quantum Computer를 포함한 양자 컴퓨터에서 가장 중요한 과제 중 하나라 생각합니다. Magnetic Field Sensing with Nitrogen-Vacancy Color Centers in Diamond(Pham, Linh(2013))에서 시간(Free Precession Time)이 지날수록 NV Center에서 측정할 수 있는 형광 물질을 잃어 Coherence State를 유지하기 위해 최소 시간 안에 연산과 측정을 하는 것이 중요함을 알 수 있었습니다. 하지만 게이트가 많아지고 복잡해지면서 시간이 증가하게 되고, 오류율이 증가합니다.</p>			

이러한 문제를 해결하기 위해 고전 컴퓨터의 Karnaugh Map의 논리 회로 단순화 알고리즘의 원리를 확장하여 Quantum Karnaugh Map을 개발에 도전하려고 합니다. 'Quantum Karnaugh Map에 대한 아이디어의 사전 점검을 위해 논문을 조사해본 결과, Quantum circuit optimization using quantum Karnaugh map(Bae, J.H., Alsing, P.M., Ahn, D. et al.(2020).)'에서 제한적인 환경에서의 Quantum Karnaugh Map이 회로 최적화에 높은 효용성이 있음을 보여주었습니다.

때문에 이번 과제에서는 NV Center Quantum Computer에서 Swap gate의 NV electron Spin에 사용되는 게이트 2개와 13C Spin에 사용되는 게이트 3개에 집중하여, 이들의 논리 계산 과정을 행렬식으로 나타내어 수학적으로 단순화시킬 방법을 찾아내는 것이 일차적인 목표이며, 그것을 구현하여 NV Center-special한 'Quantum Karnaugh Map'을 개발하는 것이 이차적인 목표입니다.

3. 연구 방법 및 접근법

우선, 각 게이트의 연산으로 인해 Quantum state value가 어떤 식으로 변화하는지를 파악하고, 변화 원리를 정형화하여 여러 Gate를 하나로 표현할 수 있는지를 찾아내는 방식으로 접근해볼 것입니다. 13C Qubit에 랜덤한 Quantum State를 입력하여 $|0\rangle$ 또는 $|1\rangle$ 로 초기화된 NV Spin과의 Swap gate를 적용할 때 행렬 값의 변화가 유의미하게 나타나는지 관찰할 것이며, 유의미하게 변화한다면 Quantum Karnaugh Map의 실마리로 삼을 것입니다. 따라서, NV Qubits의 Quantum State를 표현하는 방법, 13C Qubits의 Quantum State를 표현하는 방법, 13C Qubits를 무작위 Quantum State로 설정하는 방법, 두 Qubits 사이의 Swap Gate, 각 Swap Gate에서의 행렬값 측정 등의 코드를 구현하여 NV Spin 논리 회로의 계산 과정을 분석할 것입니다.

따라서 해당 작업을 진행하기 위해 우선 NV Center Quantum Computer의 가장 대중적인 Setting으로 실험 환경을 설정합니다. 이후 블로그 구 상에서의 극점에서 Gate를 거쳤을 때 일어나는 변화를 측정하고, 해당 변화가 다른 State에서도 동일하게 발생하는지 비교합니다.

코딩을 동원하여 Swap Gate에서 일어나는 계산 과정을 행렬로 나타내 분석하면, 다음으로는 구해낸 행렬식을 엮어내어 Qubit들의 변화를 설명하거나 과정을 단순화할 수 있는 수학적 방법론들을 필요로 할 것입니다. 기존 Karnaugh Map과 비슷하게 진행될 것이라면 별다른 수학적 아이디어를 미리 준비하지 않겠으나, 양자 컴퓨터의 특성 상 성립될 수 없는 부울 대수의 원리를 따르는 기존 Karnaugh Map과는 분명히 상이한 양상을 보일 것이 자명하다 판단하였습니다. 따라서, Quantum Qubit에 적용시킬 가능성이 보이는 여러 개념들을 고려중이며, Swap gate의 행렬 구현이 끝나면 준비된 수학적 아이디어들을 적용시킴과 더불어 여러 수학적 방법들의 가능성을 최대한 포괄적으로 고려하며 양자 논리 회로의 단순화를 꾀하겠습니다.

Swap gate의 행렬 구현이 끝나지 않은 시점에서 저희가 주목하고 있는 수학적 아이디어는 삼차원 행렬이며, 추가적으로 벡터 연산과의 관계성을 의심해보고 있습니다. 양자가 중첩되어 0과 1로만 표현하기 까다롭기에 부울 대수로 나타낼 수 없다는 것이 기존 Karnaugh Map에서 논리 회로의 단순화라는 방법론적 아이디어를 제외한 수학적 아이디어를 계승하기 어려운 일차적인 이유입니다. 벨 부등식의 위배를 필두로 무수히 진행되었던 양자 얽힘에 대한 사고 실험의 발전 과정은 수 많은 상태의 중첩이라는 아이디어를 필두로 합니다. 최근 과학계에서 뜨거운 감자가 되었던 위대한 과학자들의 연구 - 존 클라우저의 CHSH 벨 부등식과 알랭 아스페의 실험, 안톤 차일링거의 Quantum teleportation 실험 등이 가지는 정보과학적 의의는 양자의 난수성을 현실에서 입증했음에 있습니다. 이 난수성에 집중하여, 행렬의 차원을 늘려 새로운 축으로 하여금 13C가 가질 수 있는 State value의 중첩 상태를 삼차원 행렬로 표현하여 다룬다면, 중첩된 양자의 상태를 수식으로 치환하는 것이 가능할 것이며, 고려해볼 가치가 높다고 생각했습니다. 벡터 연산과의 관계성 또한 물리적인 양자 얽힘 실험 모델에서 따온 것으로, 벨 부등식과 그 확장 실험에서 매우 중요시되었던 관측된

스핀/편광 패턴의 방향성 고려와 동일하게, 관측된 Quantum state value가 계산되는 행렬을 삼각 함수 혹은 벡터 연산으로 표현하여 규칙성을 탐구해볼 것입니다.

4. 계획 및 업무 분담

계획	
6월 1일 ~ 6월 6일	NV Center Quantum Computer와 Quantum Karnaugh Map의 작동 원리를 공부하고 관련 논문을 검토하여 연구에 대한 insight를 얻습니다.
6월 7일 ~ 6월 15일	NV Center에서의 Swap gate를 구현합니다.
6월 16일 ~ 6월 21일	NV Center의 Swap gate에 Quantum Karnaugh Map을 적용하는 알고리즘을 개발합니다.
6월 22일 ~ 6월 23일	해당 연구 결과를 분석하여 최종 보고서를 작성합니다. 위의 내용들을 종합하여 발표를 준비합니다.

업무 분담	
김도겸	Implement Swap Gate, Develop Quantum Karnaugh Map
나채민	Research Data Analyze, Physics, Algebra Theory
김태현	Write Report, Research Reference, Research Data Analyze
한승호	Develop Quantum Karnaugh Map, Physics, Algebra Theory
정호일	Overall Code Design, Develop Quantum Karnaugh Map

업무 세부	
Implement Swap Gate	NV Center Quantum Computer의 Swap Gate에 대해 다룬 논문을 참고하여 구현에 필요한 자료를 정리하고, 코드로 제작합니다.
Develop Quantum Karnaugh Map	Swap Gate를 사용했을 때 Qubit에 발생하는 상태 변화를 측정하고, Density Matrix Form으로 변환하여 Quantum Karnaugh Map을 적용하기 위한 알고리즘을 개발합니다.
Research Data Analyze	개발에 필요한 데이터를 정리합니다. 제작한 코드에서 구한 Qubit State에 대한 Density Matrix Value를 분석합니다.
Physics, Algebra Theory	연구에 필요한 물리학적, 대수학적 개념을 정리합니다.
Write Report	보고서를 작성합니다.
Research Reference	연구 및 보고서 작성에 필요한 논문 자료를 정리합니다.
Overall Code Design	최적화된 코드를 작성하기 위한 코드 설계 및 제작에 대한 전반적인 관리를 담당합니다.

5. 기대 결과

1) 연산 효율 증가

-Quantum Karnaugh Map을 사용하면 양자 회로에서 반복되는 패턴을 단순화하여 구현에 필요한 Gate의 수를 줄일 수 있습니다. 연산에 필요한 resources가 감소하므로 실행 속도가 빨라져 overhead를 감소시킵니다. 또한 Gate 수를 줄여 Qubits이 Decoherence Effects의 영향을 받는 시간을 감소시켜 오류율을 줄여 연산의 신뢰성과 정확도를 높일 수 있습니다.

2) 효율적인 회로 설계

-양자 회로에서 qubits와 quantum gates는 사용이 제한적이고 비용이 많이 들어 확장에 어려움을 겪고 있습

니다. Quantum Karnaugh Map의 적용이 가능해지면 같은 비용으로 보다 복잡한 양자 회로의 구현이 가능해져 효율적으로 회로를 설계할 수 있습니다.

6. 추가 자료

업무 분배에 참고한 팀원들의 이력서와 구현 중인 NV Center Quantum Computer 실험 코드를 첨부합니다.

위와 같이 **2023 양자정보경진대회(해커톤)** 아이디어 및 계획서를 제출합니다.

2022 년 6 월 6 일

팀장 : 김도겸

(서명/또문인)

양자정보연구지원센터장 귀하