

2023 양자정보경진대회(해커톤) 아이디어 및 계획서

참가분야 (택 1)	<input checked="" type="checkbox"/> Technical Challenge (지정주제) <input type="checkbox"/> Creative challenge (자유주제)		
팀 명	퀀타		
참가주제	QW		
팀 구 성	성명	소속	연락처
	신동운	시립대 물리학과	010-2713-9515
	권세강	경희대학교 수학과	010-2654-9967
	김민욱	연세대학교 물리학과	010-4107-2294
	장 원	시립대학교 물리학과	010-9065-5419
	박수애	시립대학교 물리학과	010-2913-9732
아이디어 및 계획			
<p>1. Quantum circuit designer (신동운, 장 원) : 양자보행을 이론적인 측면에서 분석하고, 회로를 설계한다(컴퓨터 사용 필요X 손으로 그려도 됨). 처음 가장 단순한 양자보행 회로에서 점진적으로 복잡한 회로까지 설계하는 것을 목표로 한다. coin operator(하다마드 게이트 등)와 shift operator(행바꿈연산 및 이진범 덧셈뺄셈)를 양자회로에서 CNOT 게이트로(및 토폴리 게이트, ancilla qubits 등) 구현하는 것도 이들의 역할. 이 단계에서 circuit depth 및 query complexity 등은 이론적으로 계산할 수 있으므로 이 단계에서 계산한다.</p> <p>2. Quantum circuit simulator (김민욱) : 1번 팀원들에게 넘겨받은 양자회로도들 기반으로 실제 코드를 작성하고 시뮬레이션 해본다. 이 때, 고전적 시뮬레이터와 실제 양자컴퓨터 두가지 모두에서 실행을 해봄으로써 noise가 없고 있고의 차이또한 관측할 수 있게 해준다(1번 2번문제 동시에 진행 가능). 후에 최적화 과정에서 큐비트의 갯수 등을 조정할 필요가 생기므로, 큐비트갯수를 가변적으로 설정할 수 있도록 코드를 작성. 회로 실행시간을 계산하는 간단한 코드도 작성한다.</p> <p>3. Quantum data analysist (박수애) : 2번 시뮬레이션 팀원에게 넘겨받은 counts 결과를 바탕으로 여러가지 통계량(표준편차 등) 및 그래프(count vs distance 그래프 등)를 plot해본다. 결과가 양자보행을 제대로 구현했는지 아닌지의 여부를 판단하는 것이 이 팀원의 역할.</p> <p>4. Quantum error analysist (권세강) : 3번 팀원에게 넘겨받은 데이터를 바탕으로 어떤부분을 개선하면 좋을지, 특히 실험 결과의 에러가 양자회로 설계 단계에서 생긴 문제인지(1번 팀원들) 아니면 시뮬레이션 단계에서 생긴 문제인지(2번 팀원들) 판단</p>			

한다.

5. 최적화 단계 : 팀원 모두가 참여하되, 4번 팀원이 주도한다. 양자회로, 시뮬레이션 코드, 통계량 및 그래프들을 바탕으로 각 단계의 팀원들이 아이디어를 제시하고, 4번팀원은 그를 종합해서 개선방향을 결정한다.

양자 보행(Quantum Walk)의 구성요소는 크게 coin operation과 shift (diffusion) operation으로 나눌 수 있습니다. 저희 팀은 1번 문제를 해결하기 위해 주어진 10-큐비트 중에서 1-큐비트는 coin state로 할당하고 나머지 9-큐비트를 state space로 활용하겠습니다. coin state에 가하는 연산자 즉, coin operator로서 Hadamard operator를 택하고 shift operation은 $0 \leq i \leq 2^9 - 2$ 일 때, $|0\rangle_c |i\rangle_s$ 를 $|0\rangle_c |i+1\rangle_s$ 로 옮기고 $1 \leq i \leq 2^9 - 1$ 일 때, $|1\rangle_c |i\rangle_s$ 를 $|1\rangle_c |i-1\rangle_s$ 로 옮기는 연산으로 택합니다. 원점은 $|10 \dots 0\rangle_s$ 로 하되 경계점인 $|0 \dots 0\rangle_s$ 과 $|1 \dots 1\rangle_s$ 에서는 각각 $S|0\rangle_c |1 \dots 1\rangle_s = |0\rangle_c |0 \dots 0\rangle_s$ 와 $S|1\rangle_c |0 \dots 0\rangle_s = S|1\rangle_c |1 \dots 1\rangle_s$ 로 정의합니다.

이렇게 정의한 shift operator S 를 bra-ket 표기법으로 나타내면 다음과 같습니다.

$$S = |0\rangle_c \langle 0| \otimes \sum_{i=0}^{2^9-1} |i+1\rangle_s \langle i| + |1\rangle_c \langle 1| \otimes \sum_{i=0}^{2^9-1} |i-1\rangle_s \langle i|.$$

이 때, $\sum_{i=0}^{2^9-1} |i+1\rangle_s \langle i| := S_r$, $\sum_{i=0}^{2^9-1} |i-1\rangle_s \langle i| := S_l$ 라고 하면 S 를 양자 회로로 나타낼 때의 관건은 S_r 과 S_l 을 $CNOT$ 게이트를 이용해서 구성하는 것입니다. S_r 과 S_l 은 항등행렬 I 의 행들을 서로 맞바꾸는 연산을 통해서 얻을 수 있습니다. 행렬의 i 번째 행과 j 번째 행을 서로 교환하는 연산자를 $P(i \leftrightarrow j)$

라고 하겠습니다. 예를 들어, state space가 2-큐비트 공간인 경우에 S_r 은 $S_r = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$ 로 표현되고

$P(i \leftrightarrow j)$ 를 이용하여 나타내면 $S_r = P(1 \leftrightarrow 4)P(1 \leftrightarrow 3)P(1 \leftrightarrow 2)$ 로 분해할 수 있습니다. 한편 S_r 과 S_l 은 서로 Hermitian conjugate관계에 있기에 S_l 또한 $P(1 \leftrightarrow i)$ 로 분해할 수 있습니다. 각각의 i 에 대하여 $P(1 \leftrightarrow i)$ 만 양자 회로로 구현할 수 있으면 shift operator S 전체를 양자 회로로 나타낼 수 있습니다.

각각의 $P(1 \leftrightarrow i)$ 는 일반적으로 두 개 이상의 9-큐비트 $CNOT$ 게이트 - 제어 큐비트가 8-큐비트 상태, 목표 큐비트가 1-큐비트 상태인 게이트 - 로 이루어져 있고, 9-큐비트 $CNOT$ 게이트는 양자 컴퓨터에서 작동될 때 2-큐비트 $CNOT$ 게이트들로 분해되어 수행됩니다. 따라서 양자 보행의 한 스텝을 수행하는 것은 매우 많은 $CNOT$ 게이트를 필요로 하고, 이로 인해 회로 깊이 (depth)도 길어서 양자 잡음에 굉장히 취약합니다. 따라서 10-큐비트 양자 상태에 대해 양자 보행을 수행하는 것은 적절한 error mitigation이나 error correction (오류 정정)이 없으면 단 한번의 step도 제대로 된 결과를 얻을 수 없을 것이라고 예측됩니다. 하지만 적은 step수인 경우에 state space가 원점에서 별로 떨어져 있지 않다는 사실을 활용하면 적절한 error mitigation을 수행할 수 있을 것이라고 생각합니다. 또한, 사용할 수 있는 양자 컴퓨터의 큐비트 숫자에 따라 적절한 양자 오류 정정 부호를 활용하는 방법도 생각해볼 수 있습니다. 이 때, 양자 오류 정정 부호는 $CNOT$ 에 대해 transverseness가 보장되는 것이어야 하겠습니다.

지금까지 이번 양자정보경진대회에서 양자 보행 문제 해결을 위한 저희 팀의 아이디어를 간략히 소개드렸습니다. 저희 팀의 아이디어를 구현하기 위해 필요한 부분은 다음과 같습니다. 먼저, shift operator를 중심으로 한 양자 회로 구현과 최적화, 양자 회로를 잘 실행하기 위한 오류 분석, - 양자 보행을 잘 수행할 수 있도록 하는 최적의 state space를 찾고 적절한 error mitigation과 양자 오류 정정 부호를 적용하는 것 - 그리고 양자 프로그래밍을 통해 양자 컴퓨터에서 양자 회로를 잘 실행하

도록한다.

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

2022 년 6 월 5 일

팀장 : 박수애 (박수애)

양자정보연구지원센터장 귀하