

초전도 및 이온 트랩 양자 프로세서의 2 큐비트 분포 정확도 비교

김진우¹, 우균²¹금정고등학교²부산대학교 정보컴퓨터공학부

contact@kimjinwoo.me, woogyun@pusan.ac.kr

The Comparison of Two-Qubit Distribution Accuracy in Superconducting and Ion-Trap Quantum Processors

Jin-Woo Kim¹ and Gyun Woo²¹Keumjeong High School²School of Computer Science and Engineering, Pusan National University

요약

양자 컴퓨터가 상용화되고 있지만 여러 양자 컴퓨터의 양자 연산 정확도에 관한 비교 연구는 거의 발표된 바 없다. 이 논문에서는 양자 연산의 충실도(fidelity)를 측정하기 위한 간단한 방법을 제시하고 이를 바탕으로 양자 컴퓨터를 비교한다. 구체적인 비교 방법으로는 벨 상태를 Z-기저(Z-basis)에서 측정하여 비교하였는데, 두 큐비트가 얽힌 벨 상태에서 $p(00)=p(11)=0.5$ 를 관찰할 수 있는지 측정하였다. 세 가지 양자 컴퓨터(IBM Torino, IBM Brisbane, IonQ)의 평균제곱오차(MSE: mean square error)를 비교한 결과, IonQ의 MSE가 2.65×10^{-4} 으로 가장 낮았으며 IBM Brisbane이 5.25×10^{-3} 으로 가장 높은 것으로 나타났다. IonQ가 가장 낮은 오류를 보인 이유는, 고충실도 2큐비트 게이트와 낮은 SPAM(state preparation and measurement) 오류 덕분인 것으로 생각된다.

1. 서론

물리 플랫폼 간 양자 연산 신뢰도를 공정하게 비교하려면, 간단하면서도 민감도가 높은 벤치마크와 단일화된 오차 지표가 필요하다. 본 연구는 2큐비트 벨 상태 $|\phi^+\rangle = (|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$ 를 통해 계산 기저(Z-기저)에서 측정해 $p(00)=p(11)=0.5$ 가 이상적인 목표라는 점을 활용한다. 이 설정은 (1) 잘못된 레이블(01, 10)로 유출, (2) 올바른 레이블(00, 11) 간 비대칭, (3) 전체 정규화 잡음을 동시에 민감하게 포착하므로, 플랫폼 비교에 적합하다고 판단된다.

이온 트랩은 높은 게이트 충실도·긴 결맞음·유연한 결합성이 특징으로, IonQ Forte의 대규모 벤치마크(Direct RB 전쌍, AQ 지표 통과)가 발표되었으며 [1] 바륨 이온 기반 시스템에서 99.9%급 2큐비트 게이트 충실도가 공개되었다[2]. 초전도 플랫폼은 빠른 게이트와 확장성이 강점이나, 교차 결합과 읽기 출력 상관 오류가 성능 변동 요인으로 지적되었다[3].

2. 벤치마크 설정과 이론적 근거

회로 큐비트 0번에 H를 적용하고 $CNOT_{0 \rightarrow 1}$ 를 통해 $|\phi^+\rangle$ 를 준비하면 Z-기저 측정의 이상적 분포는

$p(00)=p(11)=0.5$, $p(01)=p(10)=0$ 이다. 따라서 본 논문의 “50% 가정”은 ‘모든 큐비트가 본질적으로 50%’라는 명제가 아니라, $|\phi^+\rangle$ 를 Z-기저에서 측정하면 00과 11이 각각 50%’라는 물리적 귀결이다.

단일 큐비트나 다른 기저(예: X-기저)에서는 분포가 달라질 수 있으며, $|\phi^-\rangle$, $|\psi^\pm\rangle$ 등 다른 벨 상태를 택하면 목표 분포 역시 달라진다. 검증적으로는 (1) X·Z 교차 기저에서의 상관도, (2) 패리티 진동 $\langle Z \otimes Z \rangle$ 스캔, (3) CHSH 부등식의 위반 측정 등으로 $|\phi^+\rangle$ 준비 가정을 뒷받침할 수 있다. IonQ Forte의 전면 벤치마크 문헌은 시스템 수준 성능이 구성요소 충실도에서 안정적으로 승계됨을 보여, 본 분포 기반 검증의 적합성을 지지한다[1].

3. 지표 정의와 민감도

네 가지 결과 레이블에 대해 평균 오류는 식 1을 사용하여 평균 오류를 측정한다.

$$MSE = \frac{1}{4} \sum_{b \in \{00, 01, 10, 11\}} (p(b) - q(b))^2 \quad (1)$$

01·10의 총합이 ϵ 이면 $MSE \approx \epsilon^2/2$ 정도의 크기가 되고, $p(00) - p(11) = \Delta$ 인 형태의 비대칭이라면

$MSE \approx \Delta^2/2$ 정도의 크기가 된다. 작은 유출과 작은 비대칭을 동시에 최소화할 수 있도록 설계하면 MSE 를 최저로 할 수 있다.

4. 실험설계 및 분석

대상 QPU로는 IBM사의 초전도 IBM Torino 및 IBM Brisbane과 IonQ의 이온 트랩 Forte-1을 선정하였다. 이들 QPU는 제한적으로나마 무료로 사용할 수 있다. 실험 횟수는 장치별로 5세션, 세션당 1,024회를 진행하였으며, 원시 카운트(00, 01, 10, 11)를 1024로 정규화하여 확률 p 를 산출하였다.

측정 지표를 바탕으로 앞서 정의한 MSE 를 산출하였다. 구체적으로 세션별 MSE 분포와 장치별 평균 MSE 등을 측정하였다.

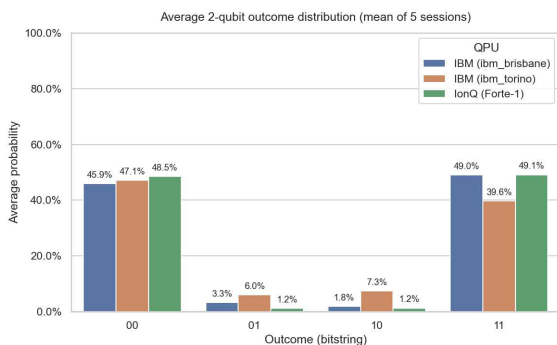
5. 실험 결과

본 연구에서는 장치별로 5회의 세션을 수행하였으며, 모든 세션에서 샷 수는 1024로 동일하였다. 실험 결과(표 1 및 그림 1 참고), IonQ(Forte-1)의 평균 MSE 는 2.65×10^{-4} 로 관측되었으며, 세션 간 변동 범위는 1.44×10^{-4} 에서 4.27×10^{-4} 에 이르러 전반적으로 매우 안정적인 분포를 보였다.

IBM Torino 장치는 평균 8.91×10^{-4} 를 기록하였으며, 최소 5.37×10^{-4} , 최대 1.12×10^{-3} 범위에서 분포하여 중간 수준의 성능을 보였다. 이에 비해 IBM Brisbane은 평균 5.25×10^{-3} 로 가장 높았으며, 세션 간 변동은 4.79×10^{-3} 에서 5.69×10^{-3} 에 분포하여 다른 장치와 달리 분포 비대칭이 일관되게 유지됨을 확인할 수 있었다.

<표 1> 실험 대상 QPU의 평균 MSE 및 변동 범위

QPU	MSE 범위	평균 MSE
IonQ(Forte-1)	$1.44 \times 10^{-4} \sim 4.27 \times 10^{-4}$	2.65×10^{-4}
IBM Torino (ibm_torino)	$5.37 \times 10^{-4} \sim 1.12 \times 10^{-3}$	8.91×10^{-4}
IBM Brisbane (ibm_brisbane)	$4.79 \times 10^{-3} \sim 5.69 \times 10^{-3}$	5.25×10^{-3}



<그림 1> 실험 대상 QPU의 MSE 분포

이러한 결과는 IonQ 장치가 분포 정확도와 재현성 측면에서 우위에 있으며, IBM 계열 장치에서는 라우팅 및 하드웨어 특성과 관련된 오차 요인이 상대적으로 크게 작용함을 시사한다.

6. 논의

실험 결과 IonQ(Forte-1)는 세 장치 중 가장 낮은 평균 MSE 와 가장 작은 세션 간 변동성을 나타내었다. 이는 고충실도의 2큐비트 게이트와 낮은 SPAM(상태 준비·측정) 오류, 전대칭(all-to-all) 결합 구조에 기초한 얇은 회로 깊이 덕분으로 해석할 수 있다. 반면, IBM 계열 장치는 라우팅으로 인한 추가 게이트, 교차 결합(crosstalk), 및 잔여 읽기 출력 오류의 영향으로 비교적 높은 분포 왜곡을 보였다. 특히 IBM 백엔드는 일일 보정 주기에 따라 동적 특성이 변동하며(게이트·판독 오류율, 결맞음 등), 이는 세션 간 성능 차이에 반영될 수 있다[4].

7. 결론

IonQ(Forte-1)는 벨 상태 분포 검증에서 가장 우수한 성능을 보였으며, 분포 정확도와 세션 간 재현성 모두에서 뛰어났다. 이에 비해 IBM 장치들은 중간 이상의 오류를 기록하며 하드웨어적 제약에 따른 한계를 드러냈다. 따라서 동일한 목표 분포 검증을 수행하는 상황에서는 IonQ 장치가 더 신뢰성 높은 선택지가 될 수 있음을 확인하였다.

본 연구의 결과는 특정 양자 컴퓨터의 성능이 우수함을 입증한 것은 아니다. 벨 상태 분포 검증을 통해 QPU의 충실도를 단순히 측정한 결과로서, 양자 컴퓨터의 여러 속성 중 하나를 측정한 것뿐이다.

참고문헌

- [1] J.-S. Chen *et al.*, "Benchmarking a trapped-ion quantum computer with 30 qubits," *Quantum*, Vol. 8, pages 1516, 2024.
- [2] IonQ, "IonQ Achieves Industry Breakthrough—First Trapped Ion Quantum System to Surpass 99.9% Fidelity on Barium," College Park (MD), Online Document, <https://ionq.com/news/ionq-achieves-industry-breakthrough-first-trapped-ion-quantum-system-to>, IonQ, 2024. (Last checked on Sep. 2025)
- [3] M. Sarovar *et al.*, "Detecting crosstalk errors in quantum information processors," *Quantum*, Vol. 4, pages 321, 2020.
- [4] IBM Quantum Platform, "Get backend information with Qiskit," Online Document, <https://quantum.cloud.ibm.com/docs/ko/guides/get-qpu-information>, IBM, (Last checked on Sep. 2025)