

NISQ 시대에 인공지능을 위한 양자-고전 하이브리드 컴퓨팅 소프트웨어 스택 분석 및 발전 방향

김남규, 전인호

한국과학기술정보연구원

ssgyu@kisti.re.kr, inojeon@kisti.re.kr

Analysis and Development Directions of Software Stacks for Quantum-Classical Hybrid Computing for Artificial Intelligence in the NISQ Era

Nam Gyu Kim, Inho Jeon

Korea Institute of Science and Technology Information

요약

양자 컴퓨팅과 인공지능의 융합은 기존 기술의 한계를 극복할 가능성을 지니고 있으나, 제한된 큐비트 수와 높은 노이즈라는 현재 양자 컴퓨터 하드웨어의 한계로 인해 독자적인 양자 알고리즘 구현에 제약이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 양자 프로세서와 CPU와 GPU 등 고전 컴퓨팅 자원을 결합한 양자-고전 하이브리드 컴퓨팅 패러다임이 대두되었다. 본 논문은 인공지능을 위한 양자-고전 하이브리드 컴퓨팅을 위한 소프트웨어 스택 연구 동향을 분석하고, 핵심 구성 요소와 그 특징을 알아본다. 그리고 한국과학기술정보연구원에서 준비 중인 양자-고전 하이브리드 컴퓨팅 기술개발 계획을 통해 향후 발전 방향을 제시한다.

I. 서론

인공지능 기술은 다양한 산업 분야에 혁신을 가져왔지만, 복잡한 데이터와 고도화된 모델에 대한 계산 자원 요구는 점점 증가하고 있다. 양자 컴퓨팅은 이러한 한계를 극복하기 위한 새로운 기술로 주목받고 있다. 특히, 인공지능과 양자 컴퓨팅의 결합인 양자 머신러닝(Quantum Machine Learning, QML)은 고전(Classic) 시스템 대비하여 계산 효율성을 달성할 수 있는 제공할 잠재력이 있다.

그러나 현재의 양자 컴퓨터 기술은 양자 프로세서(Quantum Processing Unit, QPU)의 큐비트 수가 제한적이며, 노이즈가 발생하여 순수 양자 알고리즘을 단독으로 실행하기 어렵고, 고전 컴퓨팅과 연동되어야 실용적인 사용이 가능하다. 이에 따라 양자 컴퓨터와 GPU/CPU 기반의 고전 컴퓨터를 연동한 양자-고전 하이브리드 컴퓨팅이 NISQ 시대의 현실적인 해결 방안으로 대두되고 있다.

본 논문은 이러한 NISQ 시대에서 인공지능을 위한 양자-고전 하이브리드 컴퓨팅 환경에 대한 소프트웨어 스택을 분석하고, 한국과학기술정보연구원 연구 기반을 바탕으로 발전 방향을 제시한다.

II. NISQ 시대와 양자-고전 하이브리드 컴퓨팅

양자 컴퓨팅은 중첩(superposition), 얽힘(entanglement), 양자 간섭(quantum interference)과 같은 양자역학적 현상을 활용하여 정보를 처리하는 혁신적 기술이다. 정보의 기본 단위인 큐비트(qubit)는 고전적 비트와 달리 0과 1 상태를 동시에 가질 수 있어, 기존 고전 컴퓨터를 능가하는 병렬성을 제공한다.

그러나 현재 양자 컴퓨터는 구현가능한 큐비트 수가 수십에서 수백 개 수준이며, 큐비트가 양자 상태를 유지하며 연산을 수행할 수 있는 결맞음 시간(coherence time)이 매우 짧아 계산 과정에서 오류 발생 가능성이 높다. 또한 모든 큐비트가 완전히 상호 연결되어 있지 않아 추가적인 연결과

정이 필요하며 이로 인해 노이즈가 더욱 증가한다. 이러한 제약으로 인해 현재 시점의 양자 프로세서는 완전한 결함 허용성(fault tolerance)을 확보하지 못해 아직 대규모 복잡한 문제를 해결할 수 없으며, 노이즈가 존재하는 중간 규모의 양자 컴퓨팅, 즉 NISQ(Noisy Intermediate-Scale Quantum) 시대라고 평가된다 [1].

따라서 이러한 한계를 극복하고 실질적인 양자 이득을 확보하기 위해서는 양자 오류 정정(Quantum Error Correction, QEC)과 양자 오류 완화(Quantum Error Mitigation, QEM) 기술의 발전이 필수적이다 [2].

III. 양자머신러닝 모델 및 데이터 처리

양자 머신러닝(Quantum Machine Learning, QML)은 양자 컴퓨팅의 계산 능력과 머신러닝 기법을 융합하여, 기존 고전 컴퓨팅으로는 처리하기 어려운 데이터 분석과 학습 문제를 효율적으로 해결하고자 하는 방법론이다 [3].

양자 머신러닝은 양자역학적 계산 특성을 머신러닝에 적용하기 위해 다양한 기법과 접근 방식을 활용한다. 우선, 고전 데이터를 양자 시스템에서 처리할 수 있도록 변환하는 양자 상태 기반 인코딩(Quantum State Encoding) 기술이 필요하다. 이를 통해 데이터를 큐비트로 표현하면, 고차원 힐베르트 공간(Hilbert Space)에서 연산을 수행할 수 있어 복잡한 패턴이나 상관 관계를 보다 효율적으로 탐지할 수 있다.

또한, 양자 회로 기반 모델(Quantum Circuits for Machine Learning)이 중요한 연구 축으로 자리 잡고 있다. 특히, 파라미터화된 양자 게이트를 사용하여 학습 가능한 구조를 설계하는 변분적 양자 알고리즘(Variational Quantum Algorithms, VQA)이 대표적이다. 이러한 접근은 고전적 신경망과 유사한 방식으로 파라미터를 조정하며, Variational Quantum Classifier(VQC)나 Quantum Neural Network(QNN)와 같은 모델로 구현된다 [4].

현재 사용 가능한 하드웨어가 완전한 양자 컴퓨터가 아닌 NISQ 수준에 머물러 있다는 점을 고려할 때, 양자 컴퓨팅과 고전 컴퓨팅을 연동한 하이브리드 방법이 가장 실질적인 접근법으로 평가된다. 이는 양자 컴퓨터가 잘 처리할 수 있는 고차원 연산은 양자 회로에 맡기고, 나머지 전처리·후처리나 대규모 데이터 핸들링은 고전 컴퓨터가 담당하는 방식으로, 양자와 고전을 보완적으로 결합하는 형태이다. 이를 통해 다양한 한계를 보완하면서, 양자 컴퓨터가 가진 잠재적 계산 우위를 머신러닝 문제에 적용하기 위한 토대를 마련하고 있다.

IV. 양자-고전 하이브리드 컴퓨팅을 위한 소프트웨어 스택

우선 양자 컴퓨팅 소프트웨어 스택은 QPU 중심으로 구성되어 있으며, 사용자는 Qiskit, Cirq 등과 같은 양자 소프트웨어 개발 키트(SDK)를 통해 양자 회로를 설계하고, 이를 서비스 관리 계층에 제출한다 [5]. 서비스 관리 계층은 API 게이트웨이와 스케줄러를 통해 여러 사용자의 작업 요청을 조정하고, 해당 회로를 QPU에 전달한다. 이어서 오케스트레이션 및 양자 연산 계층에서는 양자 회로를 하드웨어 특성에 맞게 변환·최적화하는 컴파일 과정과 실제 양자 게이트 실행 및 측정이 이루어진다. 마지막으로 하드웨어 제어 계층은 물리적 큐비트를 구동하기 위한 마이크로파·레이저 신호 제어, 오류 억제 및 읽기 과정을 담당한다.

반면 양자-고전 하이브리드 소프트웨어 스택은 전통적 QPU 중심 구조를 확장해 QPU와 GPU/CPU를 함께 활용한다. CUDA-Q, PennyLane, Qiskit Runtime 등 하이브리드 SDK 계층에서는 양자 회로와 고전 알고리즘을 통합적으로 작성할 수 있으며, 변분 양자 알고리즘(VQE, VQC, QNN 등)은 QPU에서 상태를 준비·측정한 뒤 고전 최적화 알고리즘 결과를 갱신하는 반복 루프로 동작한다. 또한 오케스트레이션 계층은 QPU와 고전 연산을 함께 스케줄링하고 결과를 통합·분석하며, 하드웨어 계층은 QPU와 GPU/CPU 연산 자원을 통합해 자동미분과 최적화를 가속하여 저지연 하이브리드 실행 환경을 지원한다 [6].

소프트웨어 계층	양자 컴퓨팅	양자-고전 하이브리드 컴퓨팅
SDK 계층	양자 회로 설계용 SDK를 활용하여 양자 회로를 작성하고 제출	하이브리드 SDK를 사용하여 양자 회로와 고전적 알고리즘을 통합적으로 설계·구현
서비스 관리 계층	API 게이트웨이와 스케줄러를 통해 QPU 자원 관리 및 작업 실행	QPU·GPU 자원 동시 관리, 결과 데이터 관리 기능 수행
오케스트레이션 및 연산 계층	양자 회로를 하드웨어 특성에 맞게 컴파일하고, QPU에서 게이트 실행 및 측정 수행	양자 연산과 고전 연산 간 반복 루프를 제어하고 결과를 통합·분석
하드웨어 제어 계층	QPU 제어, 큐비트 초기화·측정, 에러 억제 수행	Hybrid Orchestration 계층 추가, 양자-고전 루프 제어 및 결과 취합·분석 지원

<양자 컴퓨팅과 양자-고전 하이브리드 컴퓨팅 소프트웨어 스택 계층 비교>

V. KISTI의 양자-고전 하이브리드 소프트웨어 스택 기술 개발

한국과학기술정보연구원(KISTI)은 다양한 양자 컴퓨팅 연구 사업을 통해 하이브리드 양자 컴퓨팅 소프트웨어 플랫폼의 설계와 구현을 추진하고 있다. 특히 KISTI는 오랜 기간 축적한 슈퍼컴퓨팅 인프라 운영 경험을 바

탕으로, 국내 기술 역량에 기반한 양자 소프트웨어 국산화를 중요한 목표로 삼고 있다. 이를 위해 CUDA-Q, PennyLane, Qiskit Runtime과 같은 주요 하이브리드 양자 소프트웨어 개발 키트(SDK)를 적극적으로 도입·검증하며, 양자 회로와 고전적 알고리즘을 함께 활용할 수 있는 통합 프로그래밍 환경을 개발할 예정이다. 또한, VQE, VQC, QNN 등 양자 알고리즘의 변분적 최적화를 효과적으로 수행하기 위해 하이브리드 오케스트레이션 계층을 설계하고, QPU와 CPU·GPU 연산 자원을 효율적으로 연동할 수 있는 소프트웨어 아키텍처를 설계하는 연구를 수행하는 중이다.

VI. 결론

본 논문은 NISQ 시대에 인공지능과 양자 컴퓨팅의 융합, 특히 양자 머신러닝을 위한 양자-고전 하이브리드 컴퓨팅 기반의 소프트웨어 스택과 연구 동향을 분석하였다. 현재의 양자 프로세서는 제한된 큐비트 수와 높은 노이즈, 짧은 양자 결맞음 시간 등으로 인해 단독으로 대규모 머신러닝 문제를 해결하기 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 양자 프로세서의 연산 능력과 고전 프로세서의 최적화 및 병렬 처리 성능을 상호 보완적으로 결합하는 하이브리드 접근이 필수다. 이 기술은 VQE, VQC, QNN 등 변분 양자 알고리즘을 중심으로 발전하고 있으며, 이는 양자 회로에서 얻은 측정 결과를 고전적 최적화 파라미터를 갱신하는 양자-고전 루프 구조를 통해 구현된다. 이를 지원하기 위해 소프트웨어 스택은 CUDA-Q, PennyLane, Qiskit Runtime과 같은 하이브리드 SDK, 하이브리드 오케스트레이션 계층, GPU/CPU와 QPU를 통합하는 연산 계층 등을 포함하는 방향으로 발전하고 있다.

결론적으로, 이러한 양자-고전 하이브리드 컴퓨팅 기술은 향후 양자 하드웨어의 발전과 함께 인공지능 분야에서 새로운 계산 패러다임과 응용 가능성을 열어갈 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 한국연구재단의 양자컴퓨팅 연구인프라 구축(RS-2022-NR068791)과 한국과학기술정보연구원(KISTI)의 양자정보 요소기술 실증연구 사업(K25L1M3C3-01)의 지원을 받아 수행되었다.

참 고 문 헌

- [1] Preskill J., "Quantum Computing in the NISQ era and beyond," Quantum, vol. 2, p. 79, 2018
- [2] Kandala A., Temme K., Corcoles A. D., Mezzacapo A., Chow J. M., & Gambetta J. M., "Error mitigation extends the computational reach of a noisy quantum processor," Nature, vol. 567, 2019
- [3] Biamonte J., Wittek P., Pancotti N., Rebentrost P., Wiebe N., & Lloyd S., "Quantum machine learning," Nature, vol. 549, 2017
- [4] Farhi E., Neven H., "Classification with Quantum Neural Networks on Near Term Processors," 2018
- [5] Aleksandrowicz G., Alexander T., Barkoutsos P., Bello L., Ben-Haim Y., Bucher D., Cabrera-Hernandez F. J., et al., "Qiskit: An Open-source Framework for Quantum Computing," Zenodo, 2019
- [6] Cerezo M., Arrasmith A., Babbush R., Benjamin S. C., Endo S., Fujii K., McClean J. R., Mitarai K., Yuan X., Cincio L., Coles P. J., "Variational Quantum Algorithms," Nature Reviews Physics, vol. 3, 2021