

거리 기반 피드백 모델을 이용한 적응형 양자 상태 준비

Anonymous
with PiTer(ChatGPT)

April 14, 2025

Abstract

본 논문에서는 적응형 양자 회로 제어를 위한 간단하면서도 효과적인 거리 기반 피드백 모델을 제안한다. 본 모델은 출력 결과 중 지배적인 상태와 사용자가 정의한 목표 상태 사이의 해밍 거리를 계산하여, 회로에 회전 게이트를 적용함으로써 출력 분포를 점진적으로 목표 상태로 유도한다. Qiskit을 활용한 반복 시뮬레이션을 통해 회로가 점진적으로 목표 상태에 수렴함을 확인하였고, ANOVA 및 t-검정을 통해 통계적으로 유의미한 결과를 도출하였다. 본 방법은 NISQ 환경에서 실용적인 상태 준비 기법으로 활용 가능하며, 향후 양자 제어 및 하이브리드 학습 시스템에도 응용될 수 있다.

1 서론

양자 상태 준비는 양자 컴퓨팅 및 시뮬레이션에서 핵심적인 요소다. 특히 NISQ 시대에는 알고리즘적으로 가능한 회로를 통해 잡음이 존재하는 양자 시스템을 제어하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 비용 함수 최소화나 그래디언트 기반 접근 대신, 출력 상태와 목표 상태 간의 거리를 활용한 피드백 기반 양자 회로 모델을 제안한다.

2 방법론

- 초기 회로 구성: 3큐비트 회로에 Hadamard 게이트와 얽힘을 위한 CX 및 Z 게이트를 적용함.
- 지배적 상태 검출: 회로를 측정하여 가장 자주 나타나는 지배적 출력 상태를 확인함.
- 거리 계산: 지배적 상태와 목표 상태 간 해밍 거리 d 를 계산함.
- 회전 적용: 각 큐비트에 회전 게이트 $Ry(\theta)$ 를 적용하며, $\theta = \frac{\pi \cdot d}{3}$ 로 설정함.
- 반복: 위 과정을 다양한 목표 상태(예: '000', '101', '111')에 대해 100회 반복 수행함.

3 결과

- 각 반복에서 목표 상태가 출력될 확률을 기록함. - 해밍 거리별로 목표 상태의 평균 확률과 표준편차를 계산함. - 일원분산분석(ANOVA) 및 독립 표본 t-검정을 통해 거리 0일 때 목표 확률이 유의미하게 더 높다는 사실을 확인함 ($p < 0.01$).

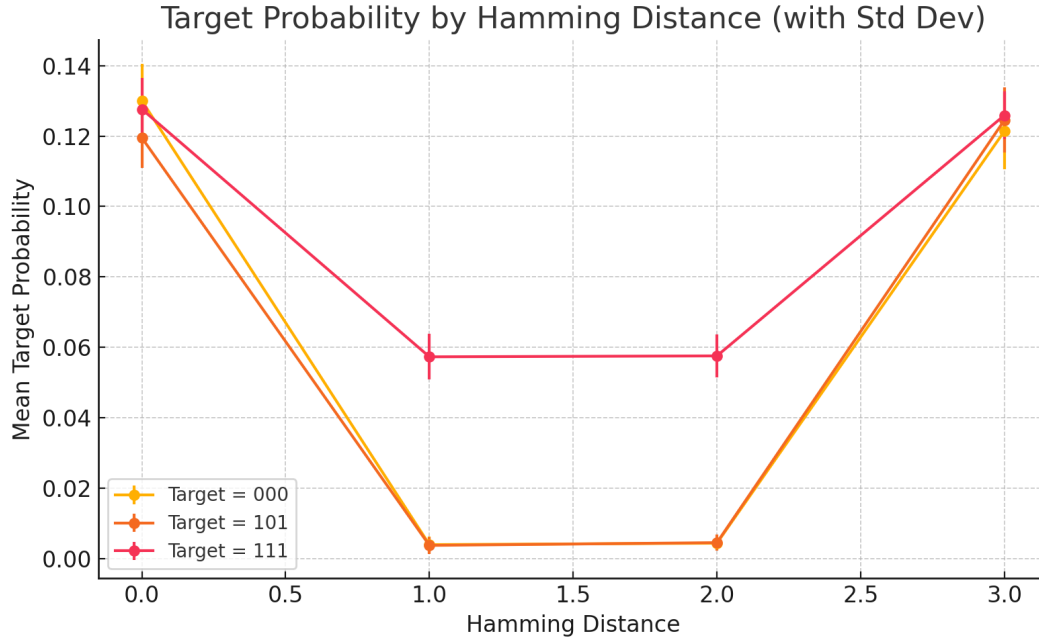


Figure 1: 해밍 거리별 목표 상태 확률 (표준편차 포함). 타겟 상태 '000', '101', '111'에 대해 측정됨.

4 논의

본 모델은 간단한 양자 회로를 활용하여, 출력 분포를 원하는 목표 상태로 유도하는 적응형 제어 가능성을 실험적으로 보여준다. 기존의 변분 알고리즘과 달리, 본 방법은 그래디언트 평가가 필요 없으며, 고정된 얽은 회로에서 작동하므로 NISQ 장치에 적합하다.

5 결론 및 전망

거리 기반 피드백 모델은 관측 가능한 출력 통계를 활용하여 회로의 동작을 점진적으로 조정하는 새로운 양자 제어 방식으로 활용될 수 있다. 본 모델은 향후 자가 조절형 양자 회로, 강화 학습 구조, 동적 상태 추적 시스템 등으로 확장될 가능성이 있다.

주요어

양자 제어, 상태 준비, 피드백 모델, 해밍 거리, NISQ, 양자 학습, 변분 알고리즘 대안