

지연(latency) 제약 조건에서 양자 시스템 우위 입증

(2025.11.21., 양자정보연구지원센터)

□ 지연(latency)제약에서의 양자 우위 연구

○ 연구 개요

- 전통적으로 양자 비국소성(nonlocality)은 멀리 떨어진 입자 간 즉각적 상관관계(‘원격유령작용’)를 의미하며, 벨(Bell) 테스트를 통해 고전 물리로 설명 가능한지 검증함
- 이번 연구는 빛의 속도에 의한 통신 지연(레이턴시) 을 고려하여, 양자 효과가 얼마나 빠르게 나타나는지까지 분석하는 새로운 접근을 제시함
- 연구진은 이를 위해 Latency-Constrained(LC) 게임이라는 수학적 프레임워크를 도입해, 통신이 시간 안에 가능한지 여부에 따라 고전 · 양자 시스템의 상관관계를 비교함

○ 연구 내용 및 주요 발견

- 기존 Bell 실험이 “통신 가능/불가능” 이라는 이분적 조건만 고려했다면, LC 게임은 일부는 통신 가능, 일부는 불가능한 중간 영역을 모델링하여 새로운 행동 양상을 설명함
- 특정 시간이 주어졌을 때, 일부 참가자 간 제한적 통신이 가능해지면, 기존 비국소성과는 다른 새로운 양자 상관관계가 나타나는 것을 확인함
- 연구진은 이를 통해 양자 시스템이 정보의 양뿐 아니라 ‘정보 전달 속도’ 면에서도 우위(시간적 우위, time advantage) 를 가진다는 점을 제시

○ 사례: 분산 CHSH 게임

- 세 명이 참여하는 확장된 CHSH 게임에서 통신이 전혀 없는 경우에는 고전 · 양자 전략 모두 동일한 성능을 보이지만,
- 두 참가자가 한 번만 통신할 수 있게 되면 양자 전략이 더 높은 성공률을 보임

- 이는 양자 우위가 단순한 상관관계의 강도뿐 아니라 주어진 시간 안에 수행할 수 있는 연산 능력에도 영향을 미친다는 점을 보여줌
- 실제 시스템 적용 가능성
 - 금융 초단타매매(HFT), 분산 컴퓨팅, 데이터센터 설계 등 현실에서 레이턴시가 성능을 결정하는 분야에 이 프레임워크가 적용될 수 있다고 제안
 - 통신 지연이 엄격히 제한되는 시스템에서 LC 게임의 수학적 도구는 고전 시스템이 달성 가능한 최대 성능 한계, 양자 시스템이 도입될 경우의 잠재적 성능 향상 등을 평가하는 데 활용 가능함
 - 또한 양자 네트워크나 원거리 양자 통신 구조에서 레이턴시 기반 성능 최적화 모델을 제공할 수 있음
- 연구 방법 및 모델링
 - 빛의 속도로 제한되는 물리적 통신 지연을 수학 모델에 통합해, 시간에 따른 정보 흐름을 그래프 구조로 표현함
 - LC 게임에서 고전/양자 전략의 성공 확률을 계산하기 위해 수치 최적화 알고리즘을 개발하고, 지연 조건을 완화할 때 가능한 상관관계 공간이 어떻게 확장되는지 분석함
 - 이 접근은 기존 비국소성 연구(예: NPA 계층구조, 커뮤니케이션 복잡도 이론)를 시간 의존 모델로 확대한 것임
- 한계 및 향후 연구 방향
 - 현재 프레임워크는 이상적인 수학 모델을 중심으로, 실제 시스템에서는 잡음·동기화 오차·디코히런스 등의 요소가 영향을 미침
 - 복잡한 통신 지연 구조에서 양자 상한(upper bound)을 계산하는 것은 여전히 어려운 과제로 남아 있으며, NPA 확장 등 추가 연구가 필요함
 - 연구진은 연속시간 모델로 확장하거나, 실제 실험 가능한 양자 네트워크 구조에 적용하는 방향으로 후속 연구 가능성을 제시함

(원문)

1. <http://thequantuminsider.com/2025/11/08/quantum-systems-show-advantage-over-classical-ones-under-latency-constraints/>