

양자 통찰력, 뇌가 컴퓨터보다 더 빠르게 계산하는 방법

(2025.03.21., 양자정보연구지원센터)

- 양자 통찰력, 뇌가 컴퓨터보다 더 빠르게 계산하는 방법에 대한 실마리를 제공할 수 있음
 - 연구 배경
 - 인간 뇌는 전통적인 컴퓨터보다 복잡한 문제를 더 빠르게 해결함
 - 뇌의 계산 능력은 비교적 느린 신경 신호에도 불구하고 매우 빠르며, 이는 뇌의 고유한 네트워크 구조와 장거리 연결 덕분임
 - 뇌가 정보를 효율적으로 처리하는 방법에 대해 양자역학을 기반으로 한 수학적 프레임워크를 활용해 설명함(*Physical Review E* 발표)
 - 연구팀과 방법론
 - Universitat Pompeu Fabra, 옥스퍼드 대학, Buenos Aires 대학 공동 연구팀 진행
 - “Complex Harmonics Decomposition(CHARM)” 새로운 수학적 방법을 도입하여 뇌 활동에서 숨겨진 패턴을 식별하고 복잡한 신경 신호를 더 단순하고 구조적인 형태로 축소함
 - 이 방법을 통해 1,000명 이상의 뇌 영상 데이터를 분석하고, 뇌의 장거리 상호작용이 문제 해결과 인지 처리에 중요한 역할을 함을 증명함
 - 핵심 발견
 - 연구팀은 뇌 계산이 단지 개별 뇌 영역에서 일어나는 것이 아니라, 전체 뇌 네트워크에서 일어난다는 점을 밝혀냄
 - 뇌는 장거리 연결을 활용하여 더 효율적인 정보 처리를 가능하게 하며, 이는 신경 신호 전송 속도가 느린 한계를 극복하는 중요한 역할을 함

- 연구팀은 CHARM이 이러한 장거리 상호작용을 효과적으로 포착하며, 이를 통해 뇌의 계산 능력이 개별 영역이 아닌 분산된 네트워크에서 나온다는 중요한 통찰을 제공한다고 설명함

□ 뇌 계산의 속도 관리 메커니즘

- 신경 신호의 느린 전송 속도와 뇌의 빠른 계산
 - 신경 세포들은 전기적 및 화학적 신호를 통해 서로 통신하지만, 이 신호 전송 속도는 상대적으로 느려, 10~20밀리초가 걸림
 - 그럼에도 뇌는 매우 빠른 속도로 정보를 처리함
 - 과학자들은 이 효율성이 뇌가 ‘비판적 상태’에서 작동함으로써 가능하다고 제안함, 비판적 상태란, 활동이 질서와 혼돈 사이에서 균형을 이루며 정보 흐름과 적응력을 극대화하는 상태를 말함
- 뇌의 분산 계산 구조
 - 기존 연구에 따르면, 뇌는 분산된 계산을 최적화하기 위해 구조적으로 설계되어 있음
 - 전통적인 컴퓨터는 순차적인 단계를 거쳐 계산하는 반면, 뇌는 네트워크 상호작용을 통해 정보를 처리하며, 드문 장거리 연결을 이용해 서로 다른 뇌 부분들이 협력함
 - 이러한 장거리 연결은 느린 신경 신호의 한계를 극복하는 데 중요한 역할을 함

□ CHARM 프레임워크

- CHARM의 원리
 - CHARM은 슈뢰딩거 방정식에서 영감을 얻은 수학적 접근법임
 - 슈뢰딩거 방정식은 양자 역학에서 입자의 행동을 설명하는 기본 개념으로, 뇌 활동을 분석하는 데 적용됨
 - 연구팀은 CHARM을 사용하여 뇌의 큰 네트워크들이 어떻게 동적으로

상호작용하는지 분석함

○ fMRI 데이터와 CHARM

- 연구팀은 1,000명 이상의 fMRI 데이터를 사용하여 CHARM을 적용함
- 기존의 “주성분 분석(PCA)” 과 고전적 하모닉 분해 방법보다 CHARM이 장거리 상호작용을 더 잘 포착한다고 결론지음
- 이 분석은 뇌가 효율적인 계산을 위해 장거리 연결을 활용하는 방식에 대한 중요한 통찰을 제공함

□ 슈뢰딩거 방정식과 뇌 동역학

○ 양자 역학을 이용한 뇌 기능 설명

- 슈뢰딩거 방정식은 시스템의 한 부분이 다른 부분에 영향을 미치는 비국소적 상호작용을 설명하는데, 이는 뇌의 동역학과 유사함
- 연구자들은 CHARM을 통해 뇌 활동이 고립된 영역에 국한되지 않고, 양자 상태처럼 상호 연결된 네트워크에서 영향을 주고받는다는 사실을 밝혀냄

○ 비국소적 상호작용

- 뇌 활동은 한 지역에 국한되지 않고, 상호 연결된 네트워크에서 발생함
- 이는 양자 시스템에서 입자들이 거리가 멀어도 영향을 미치는 것과 비슷함
- CHARM은 이러한 비국소적 상호작용을 모델링하여 뇌가 어떻게 느린 신경 신호에도 불구하고 뛰어난 계산 능력을 발휘하는지 설명함

□ 깨어있는 상태와 수면 상태의 차이

○ 수면 상태와 깨어있는 상태에서의 뇌 활동

- 연구는 깨어있는 상태와 깊은 수면 상태의 뇌 활동 차이를 비교
- CHARM 분석에 따르면, 깨어있는 상태에서는 장거리 상호작용이 활발하고, 수면 상태에서는 이러한 상호작용이 감소함
- 연구팀은 머신러닝을 활용하여 뇌 상태를 정확하게 구분할 수 있었으며, 이를 통해 뇌 상태의 정의가 본질적으로 상호작용의 방식에 따라 달라짐을 발견함

○ 수면 연구와의 연관성

- 이 발견은 수면 장애나 인지 저하와 같은 신경학적 질환을 연구하는 데 중요한 시사점을 제공할 수 있음
- 향후 연구에서는 이러한 뇌 네트워크의 변화가 신경 질환에서 어떻게 나타나는지에 대한 분석이 필요할 것임

○ AI 및 신경 과학에 미칠 영향

- 이 연구는 뇌의 계산 능력과 정보 처리 방식을 이해하는 데 중요한 기여를 함
- 뇌의 분산된 네트워크 계산 방식은 인공지능(AI) 연구에 중요한 통찰을 제공하며, 더 효율적이고 적응력 있는 알고리즘 개발에 기여할 수 있음
- 또한, 뇌가 다양한 계산 상태를 전환하는 방식을 이해함으로써 신경학적 질환에 대한 새로운 치료법 개발에 기여할 수 있음

○ 연구팀은 향후 CHARM을 다양한 인지 과제에 적용하고, AI 시스템에서 이 원리를 통합하는 방법을 연구할 계획임

- 또한, 신경학적 질환을 가진 사람들의 뇌 동역학을 분석하여, 이러한 계산 동역학이 질병에 미치는 영향을 연구할 예정임

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/03/16/quantum-insights-could-offer-clues-to-how-the-brain-computes-faster-than-computers/>