

인간의 인지, 기억, 그리고 자폐 스펙트럼, 공감각, 서번트 증후군에 대한 연구논문을 찾아 정리하였습니다

인간은 어떻게 생각하는가

John E. Laird et al. A Standard Model of the Mind: Toward a Common Computational Framework across Artificial Intelligence, Cognitive Science, Neuroscience, and Robotics

논문은 새로운 인간 인지 아키텍처 공통 인지 모델(Common Model of Cognition, CMC)을 제시했습니다.

공통 인지 모델은 기본 가정을 바탕으로 하며 아래는 그 가정입니다.

구조 및 처리

1. 아키텍처 처리의 목적은 최적성이 아닌 제한된 합리성을 지원하는 것이다.
2. 작업 독립적인 소수의 모듈이 연산 처리한다.
3. 아키텍처 처리에는 상당한 병렬성이 존재하며, 이는 모듈 간 병렬 처리와 모듈 내부 병렬 처리로 구분된다.
4. 행동은 약 50밀리초 주기로 작동하는 인지 사이클을 통해 순차적 행동 선택에 의해 주도된다.
5. 복잡한 행동은 전역 최적화 또는 계획을 위한 별도의 아키텍처 모듈 없이, 인지 사이클의 반복으로부터 발생한다.

기억과 내용

1. 선언적 및 절차적 장기 기억은 기호 구조와 관련된 정량적 메타데이터를 포함한다.
2. 전역적 소통은 모든 인지, 지각, 운동 모듈 간 단기 작업 기억에 의해 제공된다.
3. 전역적 제어는 절차적 장기 기억에 의해 제공된다.
4. 사실 지식은 선언적 장기 기억에 의해 제공된다.

학습

1. 기호 구조든 정량적 메타데이터든 모든 형태의 장기 기억 내용은 학습 가능하다.
2. 학습은 온라인 및 점진적으로 일어나며, 인지 처리의 부산물로 발생한다. 이는 종종 인지 처리의 정보 흐름을 역으로 따라가는 방식으로 이루어진다.
3. 절차적 학습은 최소한 강화 학습과 절차적 구성을 포함한다. 강화 학습은 행동 선택에 대한 가중치를 학습하며, 절차적 구성은 행동 자동화를 생성한다.
4. 선언적 학습은 사실의 획득과 그 메타데이터의 조정을 포함한다.
5. 보다 복잡한 학습 형태는 정해진 소수의 단순 학습 형태의 조합으로 구성된다.

지각 및 운동

1. 지각은 특정 작업 기억 버퍼에 메타데이터가 포함된 기호 구조를 생성한다. 서로 다른 입력 양식을 가지며 고유한 버퍼를 가진 다수의 지각 모듈이 존재할 수 있다. 지각 학습은 새로운 패턴을 학습하고 기존 패턴을 조정한다. 주의 병목은 작업 기억에 들어올 수 있는 정보의 양을 제한하며, 지각은 작업 기억으로부터의 상향 정보에 의해 영향받을 수 있다.
2. 운동 제어는 자기 버퍼 내의 기호 관계 구조를 외부 행동으로 변환한다. 지각과 마찬가지로, 다수의 운동 모듈이 존재할 수 있다. 운동 학습은 새로운 행동 패턴을 학습하고 기존 행동을 조정한다.

Andrea Stocco et al. Analysis of the human connectome data supports the notion of a 'Common Model of Cognition' for human and human-like intelligence across domains 논문의

fMRI 분석 연구는 위 아키텍처가 기존 모델보다 인간의 인지 과정을 더 잘 설명함을 지지합니다

인간은 어떻게 기억하는가

Dharshan Kumaran et al. What Learning Systems do Intelligent Agents Need? Complementary Learning Systems Theory Updated 논문은 지능적인 학습을 위해 두 개의 보완적인 기억 시스템이 필요하다고 주장합니다

신피질 시스템 (Neocortical System)

기능	구조화된 지식의 느린 학습
특성	다층 신경망처럼 통계적 구조를 점진적으로 일반화하며, 파라메트릭 방식으로 개별 사건을 저장하지 않고 전체 도메인을 아우르는 일반화된 규칙을 학습한다. (예: 언어, 개념, 의미기억, 사전지식)
한계	학습이 느리며, 새로운 정보가 기존 지식을 손상시킬 수 있다 (catastrophic interference).

해마 시스템 (Hippocampal System)

기능	개별 경험의 빠른 저장
특성	비-매개변수 방식으로 각 경험을 구체적으로 저장하며, 패턴 분리(유사한 사건도 별도로 구분) 및 패턴 완성(단서만으로 전체 기억 회상) 기능을 수행한다. 재생을 통해 신피질로 지식 전이가 이루어진다.
한계	일반화나 개념 형성은 상대적으로 어려우며, 저장 용량이 한정된다.

기억의 유형 (기능적 분류)

기억 유형	설명	관여 시스템	논문 근거 요약
1. 에피소드 기억	특정 시간과 장소의 사건에 대한 기억 (예: 사파리에서 사자 만남)	해마	빠른 사건 저장, auto-associative 네트워크로 구성, 패턴완성과 패턴분리에 기반
2. 의미 기억	일반화된 사실이나 개념적 지식 (예: "사자는 육식동물이다")	신피질	반복 노출을 통해 점진적으로 습득, 통계적 구조 반영
3. 재생 기반 기억	해마가 저장한 경험을 재생하여 신피질에 전이	해마 → 신피질	수면이나 휴식 중 반복된 replay를 통해 통합 학습 발생
4. 추론/일반화 기반 기억	서로 다른 사건에서 공통 구조를 발견해 새로운 추론 수행	해마, 신피질 모두	REMERGE 모델 등에서 해마의 recurrence가 개념/범주/추론에 기여함을 보임

CLS의 상호작용 구조

[외부 경험]

↓

-> 빠른 저장: 해마

- 에피소드 기억
- 재생(replay), 분리/완성

↓

-> 느린 일반화: 신피질

- 의미 기억
- 통계적 구조 학습

↑

-> 반복 재생으로 점진적 통합

Connections within and among neocortical areas (green) support gradual acquisition of structured knowledge through interleaved learning

Bidirectional connections (blue) link neocortical representations to the hippocampus/MTL for storage, retrieval, and replay

Rapid learning in connections within hippocampus (red) supports initial learning of arbitrary new information

자폐 특성

자폐를 앓고 있는 환자에게서 서번트 증후군의 발생 확률이 월등히 높으므로 더 찾아보았습니다.

흥분/억제 불균형

Marianna Boso et al. Autism and genius: is there a link? The involvement of central brain loops and hypotheses for functional testing 연구에서는 자폐의 특성이 흥분/억제 불균형으로부터 발생한다고 주장합니다

시냅스 수준: 과잉 흥분

자폐 스펙트럼에서 유전적 요인(예: SHANK3 유전자 결실, IB2 결실 등)은 글루탐산성 시냅스(glutamatergic synapse)의 특정 수용체 서브타입을 과도하게 활성화시키는 경향이 있다. 결과적으로 지역적(local) 신경망에서 과흥분(hyperexcitability) 상태가 나타나며, 이는 뇌 정보 처리의 이상을 유발한다.

미니컬럼의 구조 이상

미니컬럼은 뇌피질의 기본 구조 단위로, 하나의 축을 따라 세로로 배열된 뉴런들의 묶음이다. 자폐인의 전두엽에서는 미니컬럼이 더 많고, 더 좁으며, 주변 억제 메커니즘이 결핍된 특징을 보인다.

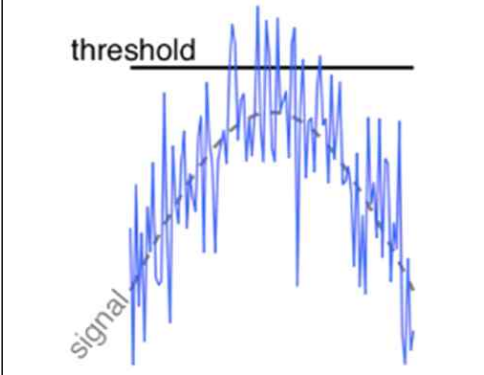
기능적 영향

정상 미니컬럼	자폐 미니컬럼
중심 흥분 영역 + 주변 억제	주변 억제가 결여되어 흥분이 확산
선택적 활성화 및 노이즈 억제	비선택적 과활성화, 과도한 정보 민감성

이는 세부 자극에 대해 필터링 없이 반응하게 하며, 정보 통합에 어려움을 초래한다. 그러나 동시에 세부에 대한 민감성(savant-like processing)을 강화할 수 있다.

신경잡음 및 확률공명

Pratik Raul et al. High neural noise in autism: A hypothesis currently at the nexus of explanatory power 연구에서는 뉴런의 출력이 잡음처럼 변동성 있게 요동치며 나타나는 현상인 신경 잡음이 자폐인 특징의 원인이라고 주장한다.



회색 실선이 이상적 신호
파란 선이 신경 잡음이 추가된 신호
잡음이 추가되면서
역치가 낮아지는 효과가 발생

- 적절한 수준의 신경잡음은 약한 자극을 탐지하는 데 도움을 줄 수 있다 (이를 Stochastic Resonance라 함).
- 복잡한 자극이나 다단계 처리가 필요한 상황에서는 잡음이 너무 커져 오히려 성능 저하를 유발한다.
- 신경 잡음이 증가하면서 다중 감각 경로의 신호가 증폭되고, 이로 인해 공감각적 경험이 강화되거나 고정될 수 있다.
- 지역 간 신경잡음이 비상관화 되면 기능적 연결성 감소, 백질 발달 지연, 신경 가소성 저해 등으로 이어질 수 있다.

체계화 성질

Simon Baron-Cohen et al. "Autism and talent: the cognitive and neural basis of systemizing" 연구에서는 자폐에서 재능이 발생하는 메커니즘을 설명할 수 있는 과체계화(hypersystemizing) 이론을 제안하였습니다. 체계화 메커니즘(systemizing mechanism, 이하 SM)은 입력-작용(operation)-출력 간의 법칙성 또는 인과관계를 탐지하고 일반화하는 인지 메커니즘입니다. (예: "버튼을 누르면 불이 켜진다" → 반복 관찰을 통해 법칙 추출)

SM은 아래 8단계 과정을 거친다:

1. 대상/사건 관찰
2. 가장 작은 단위로 분석
3. 입력 요소 선택
4. 작용(조작) 수행
5. 출력 결과 관찰
6. 반복 수행 (신뢰도 확보)
7. 패턴 기록 (IOO 정립)
8. 기존 패턴과 비교하여 평가

자폐인의 인지에서는 일반인보다 훨씬 더 자주, 더 강하게 체계화 메커니즘(SM)이 작동한다. 이를 통해 자폐인의 증상인 극도로 반복적인 행동(SM을 통해 규칙을 확인하려는 시도), 집착적 관심사(SM으로 다룰 수 있는 정보 즉, 체계화 가능성에 따라 선호 결정), 서번트 기술(단일 시스템에 몰두하여 법칙, 규칙을 분석함으로써 체계화된 분야에서 탁월한 성과)이 설명될 수 있다.

공감각과 자폐의 공통/차이점

Van Leeuwen et al. Synaesthesia and autism: Different developmental outcomes from overlapping mechanisms? 논문은 자폐인과 공감각인의 뇌-인지 특성, 그리고 양자의 공통점과 차이점을 서술합니다.

자폐와 공감각은 부분적으로 겹치는 뇌 및 인지 메커니즘을 갖고 있으며, 두 특성이 결합될 경우 서번트 능력이 나타날 가능성이 높아집니다.

자폐인의 뇌-인지 특성

1. 감각 처리 특성: 감각 과민 및 감각 추구 모두 관찰되며, 시각, 청각, 촉각 등 다양한 감각 자극에 민감하다. 감각적 과민성은 삶의 질에 큰 영향을 미친다.
2. 지각 및 주의 특징: 세부 정보 지향적 주의가 특징이며, 전체보다는 부분을 우선 처리한다. 시각적 전역 처리는 지연되거나 더 많은 인지 자원을 요구한다.
3. 뇌 연결성: 전반적으로는 글로벌 연결성 감소를 보이나, 일부 네트워크(감각-운동, 시상 등)에서는 국소적 연결성 증가가 나타난다.
4. 인지적 강점: 일부 개인에게서 서번트 능력이 발현된다 (예: 기억력, 계산력, 음악 등).
5. 예측 처리 모델: 과도하게 구체적이고 경직된 priors를 갖는다는 이론이 제안되며, 입력 예측 실패 시 과잉 흥분이 증가한다.

공감각인의 뇌-인지 특성

- 1. 감각 처리 특성: 감각 과민성 우세하며, 특히 자신의 공감각 경험에 관련된 감각(예: 색, 촉각 등)에 민감하다. 감각 자극 역치가 낮다.
- 2. 지각 및 주의 특징: 세부 정보 지향적 지각 및 주의(자폐인과 유사)를 보이며, 시각적 내포 그림 등에서 높은 수행을 보인다. 변화탐지, 얼굴 세부처리 등에서 우수하다.
- 3. 뇌 연결성: 국소적 과 연결이 관찰되며, 일부 연구에서는 백질 상관성 증가가 보고된다. 군집화(clustering) 증가가 나타난다.
- 4. 인지적 강점: 기억력, 색 지각, 절대음감 등에서 우수하며, 자폐와 공감각이 공존할 경우 서번트적 능력 발현 가능성이 높아진다.
- 5. 예측 처리 모델: 중간 수준의 경직된 priors가 공감각 경험을 유도하며, 상위 수준의 지식(이게 실체가 아니라는 사실)을 알고 있어도 지각 경험은 계속된다.

뇌-인지 구조의 공통점

영역	공통 특징
뇌 연결성	국소적 연결성은 정상 이상으로 증가하며, 글로벌 연결성은 감소하거나 비효율적이다. 이는 전체적 네트워크보다 부분적 처리에 특화된 구조를 의미한다.
감각 민감성	과민성 경향이 존재하며, 감각 민감성이 지각 및 인지 특성과 연결된다.
지각 스타일	세부 지향적 인지 특성을 보이며, 시각 자극을 전체보다 세부 요소 위주로 처리한다.
예측 처리	과도하게 구체적이고 경직된 사전 지식을 가지며, 감각 입력 예측 실패 시 예측 오류 증가 및 과잉 흥분 신호가 발생한다. bottom-up 정보 처리 우세, 하향식 예측 약화 또는 특이화가 나타난다.

뇌-인지 구조의 차이점

영역	자폐	공감각
글로벌 연결성	기능적 글로벌 네트워크 연결성 감소 (특히 상위 허브 간 연결 저하)	전반적 연결 패턴은 유지되나, 특정 감각 영역 간 연결성 증가
뇌 네트워크 효율성	fMRI, DTI 기반 연구에서 local clustering 감소 (비효율적 국소 네트워크)	graph-theoretical 분석에서 clustering 증가, local efficiency 상승
피질 흥분성	일부 영역에서 흥분/억제 불균형 관찰	시각 피질의 과흥분성명확히 보고됨
다감각 통합	전반적으로 감각 통합 기능 저하	감각통합 결과는 혼재. 일부 공감각자에서 AV 통합 강화되거나 약화됨
발달 궤적	생후 2-3세 무렵부터 조기 발현. 이후 전반적 글로벌 연결성 저하 경향	6-11세 사이 점진적 발달, 특히 글자-색 공감각에서 연결성 유지/강화 가능

서번트 증후군

서번트 증후군에 대해서는 현재까지 추가적인 새로운 내용을 확보하지 못했습니다.

향후 계획

상기 인지 아키텍처의 구현 연구논문, 상기 인지 아키텍처에 자폐/서번트의 특성을 녹여낸 인지 모델, 자폐/서번트의 특성을 묘사하거나 비슷한 특성을 가진 기계학습 모델 선행 연구 논문을 찾을 계획입니다.