

DAI

Dynamic Adaptive Intervention

동적 적응 개입 프레임워크

능동 추론 기반 임상 의사결정을 위한

통합 프레임워크

Alex Kwon, BCN, PhD

Boston Neuromind LLC · Harvard GSE Visiting Scholar

2026 년5 월

초록

기존 임상 개입은 정적 프로토콜에 의존하여 환자 개별 상태 변화에 적응하지 못한다. 본 논문은 능동 추론 (Active Inference) 원리에 기반한 동적 적응 개입(Dynamic Adaptive Intervention, DAI) 프레임워크를 제안한다. DAI는 환자의 4-벡터 상태(V1 State · V2 Desire · V3 Skill · V4 Trajectory)를 실시간으로 추적하며, 최소 자유 에너지 원리에 따라 다음 개입을 선택한다.

9-루프 아키텍처(Sense → Locate → Decide → Deliver → Update → Summarize → Feedback → Audit → World)를 통해 매 세션마다 환자 모델을 갱신하고, OMR(Observable Model Refinement) 메커니즘으로 임상가 관찰과 환자 자기보고를 통합한다. 본 프레임워크는 학습 + 최고 수행 임상 환경에서 베타 운영 중이며, 5 명의 임상 클라이언트를 대상으로 검증되고 있다.

키워드: 능동 추론, 자유 에너지 원리, 적응 개입, 9-루프 아키텍처, 4-벡터 상태 모델, OMR

1. 서론

1.1 정적 개입의 한계

전통적인 임상 프로토콜(예: 매뉴얼 기반 CBT, 표준 신경피드백 프로토콜)은 다음과 같은 한계를 가진다:

- 환자의 회기별 상태 변화에 둔감
- 동기·욕구 변화 미반영
- 기술 수준 진행을 정량적으로 추적하지 못함
- 궤적 예측 부재 — 어디로 가고 있는지 모름

1.2 능동 추론 원리

Friston(2010, 2023)의 자유 에너지 원리에 따르면, 적응적 시스템은 기대 자유 에너지(Expected Free Energy)를 최소화하는 행동을 선택한다. 임상 개입에 적용하면:

개입_선택 = $\operatorname{argmin} EFE(\text{개입} \mid \text{환자_상태}, \text{목표_상태})$

이는 단순한 규칙 기반 의사결정을 넘어, 환자 모델의 불확실성과 목표 도달 가능성을 동시에 고려한 최적 개입 선택을 가능하게 한다.

1.3 본 프레임워크의 기여

- 4-벡터 상태 모델: State · Desire · Skill · Trajectory 의 통합 표현
- 9-루프 아키텍처: Sense 에서 World 까지의 폐쇄 루프 임상 시스템
- OMR(Observable Model Refinement): 임상가-환자-시스템 3자 협업의 정량화
- Step 0 조절 선택자(Regulated Selector): 안전성 우선의 개입 필터링

2. 이론적 토대

2.1 자유 에너지 원리

능동 추론 프레임워크에서 에이전트(환자 + 임상가 + 시스템)는 다음의 자유 에너지를 최소화한다:

$$F = E_q[\ln q(s) - \ln p(o, s)]$$

여기서 $q(s)$ 는 환자 상태에 대한 신념, $p(o, s)$ 는 관찰과 상태의 결합 분포이다. 임상적으로 이는 "예상한 결과와 실제 결과의 차이를 최소화하는 개입을 선택한다"는 의미이다.

2.2 4-벡터 상태 표현

벡터	의미	측정
V1 State	현재 상태	HRV, QEEG, 자기보고 (PHQ-9, GAD-7)
V2 Desire	욕구·동기	회기 목표, 가치 평가, 동기 면담
V3 Skill	기술 수준	Fischer 수준 (L7-L13), CPT, N-back
V4 Trajectory	궤적	주간 변화율, 적응 재경로화 신호

2.3 OMR (Observable Model Refinement)

OMR은 임상가와 환자의 관찰을 시스템 모델 갱신에 통합하는 메커니즘이다:

- 임상가 관찰: 회기 후 5축 점수 입력 + 자유 텍스트 노트
- 환자 자기보고: 회기 중 실시간 정서·인지 보고
- 시스템 추정: 베이지안 사후 확률 + 4-벡터 갱신
- 3자 협업: 불일치 시 임상가 결정 우선, 시스템은 학습 데이터로 저장

OMR은 USPTO 임시특허 6번째 후보로 출원 준비 중이다.

3. 9-루프 아키텍처

DAI 시스템은 9 개 루프로 구성된 폐쇄 시스템이다:

#	루프	기능
1	Sense (감지)	환자 현재 상태 측정 — 생체 신호, 자기보고, 행동 데이터
2	Locate (위치)	4-벡터 공간에서 환자 위치 결정
3	Decide (결정)	Step 0 조절 선택자 + 강한 필터 + 약한 점수 + LLM 재순위 + OMR 생성
4	Deliver (전달)	선택된 개입을 환자에게 전달 (UI, 임상가 안내, 콘텐츠)
5	Update (갱신)	개입 후 새 상태로 4-벡터 갱신
6	Summarize	임상가용 회기 요약 + 다음 회기 권고
7	Feedback	임상가 평가 입력 → OMR 학습 신호
8	Audit (감사)	의사결정 로그 검토 + 편향 검출
9	Catcher World	시스템 전체 학습 — 모든 환자 데이터에서 패턴 발견

4. Step 0 조절 선택자

4.1 안전성 우선 필터링

Decide 루프(루프 3)의 첫 단계는 안전성 검토이다. Step 0 조절 선택자는 다음 기준에서 부적합한 개입을 사전 차단한다:

- 자살 사고 / 자해 위험 신호 시 — 위기 프로토콜로 전환
- 약물 상호작용 가능성 — 임상가 확인 요청
- 외상 이력 + 노출 기반 개입 — 신중한 단계화 필요
- 동의 상태 미확정 — 추가 동의 절차 트리거

4.2 하드 필터 + 소프트 점수

Step 0 통과 후 다단계 필터링이 적용된다:

- 하드 필터: 의학적 금기, 동의 부재, 연령 부적합 등 — 절대 제외
- 소프트 점수: 효과 크기, 환자 선호도, 임상가 경험 — 가중 합산
- LLM 재순위: 자연어 임상 노트와 개입 옵션의 의미적 일치도 평가
- OMR 생성: 최종 선택된 개입에 대한 임상가 관찰 점 자동 생성

5. 임상 적용

5.1 베타 운영 현황

DAI 프레임워크는 NeuroCatchers Decision Engine 으로 구현되어 학습 + 최고 수행 임상에서 베타 운영 중이다(2026 년 5 월 22 일 D-Day).

- 대상: 5 명의 임상 클라이언트 (성인, 직접 지불, BCN+PhD 웰니스 범주)
- 측정: Fischer 5 축 종이 시트 (디지털 측정 ML 백엔드는 M2-M3)
- 타임라인: D+28 일 적응 재경로화, D+60 일 8 주 결과, D+90 일 평가
- 향후 N=200 전향 다기관 시험 (IRB 승인 후)

5.2 통합 임상 시나리오

예시 회기 흐름 (가상 환자, 30 분 회기):

- Sense: 도착 시 HRV 측정 (RMSSD = 28ms, 평소 35ms 대비 낮음)
- Locate: V1 State = 스트레스 상태, V2 Desire = 오늘 집중 훈련 원함, V3 Skill = L9, V4 Trajectory = 지난주 양호
- Step 0: 자살 신호 없음, 동의 유효, 약물 변화 없음 → 통과
- Decide: HRV 호흡 조절 5 분 → CPT 훈련 15 분 → 5 축 자기평가 → 권고: 작업기억 N-back L9 (Skill 일치)
- Deliver: 임상가가 환자에게 안내, 시스템이 측정 자동화
- Update: 회기 후 HRV 35ms 회복, 집중 점수 양호
- Summarize: 임상가 노트 자동 생성 + 다음 회기 권고

6. 논의

6.1 기존 시스템과의 차별점

- 정적 매뉴얼 vs DAI 동적 적응: 환자별 + 회기별 + 순간별 적응
- 규칙 기반 의사결정 시스템 vs 능동 추론: 불확실성과 목표를 동시 고려
- 개별 모달리티 도구 vs 9-루프 통합: 폐쇄 학습 루프
- AI 단독 결정 vs OMR: 임상가 권위 보존 + 시스템 학습 동시 가능

6.2 한계점

- 현재 ML 백엔드 6 개 엔드포인트는 모두 모의(mock) 상태 — M2-M3 에 진짜 구현 예정
- HIPAA BAA 미신청 — 실제 의료 환자 박혀 시작 전 필수
- OMR 메커니즘은 임상가 입력에 의존 — 임상가 부담 정량화 필요
- 자유 에너지 계산은 모델 가정에 민감 — 사전 분포 보정 필요

6.3 향후 방향

- ML 백엔드 진짜 구현 (Bayesian engine) — M2-M3
- HIPAA BAA 신청 + RLS 적용 — 실제 환자 진입 전
- OMR USPTO 특허 출원 (6 번째)
- N=200 전향 다기관 시험 설계 — M6
- 적응 신경피드백 프로토콜 통합 — M6-M12

주요 참고문헌

Friston, K. (2010). The free-energy principle: A unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience*, 11(2), 127-138.

Friston, K. (2023). From synapses to sentience. *Molecular Psychiatry*, 28, 256-268.

Pearl, J. (2018). *The Book of Why*. Basic Books.

Fischer, K. W. (1980). A theory of cognitive development. *Psychological Review*, 87(6), 477-531.

Hess, A. J., et al. (2025). Bayesian workflow for computational psychiatry. *Computational Psychiatry*, 9(1), 76-99.

Da Costa, L., Parr, T., et al. (2020). Active inference on discrete state-spaces: A synthesis. *Journal of Mathematical Psychology*, 99, 102447.

감사의 글

故 Kurt W. Fischer 교수께 깊은 감사. 동적 기술 이론의 사사가 본 적응 프레임워크의 토대를 이룬다.

저자: Alex Kwon, BCN, PhD

Boston Neuromind LLC · Harvard GSE Visiting Scholar · 2026 년 5 월

— 본 한국어판은 영문 원본의 핵심 내용을 요약 번역한 것이며, 전체 영문 원본(framework 1.3MB + summary 296KB)은 동일 카드의 EN 버전을 참조하시기 바랍니다.