Ucieleśnienie i emergencja: od kognitywistyki 4E do biologii syntetycznej w świetle książki Emergence Boba Burgina



AUTOR

Fundacja Dobre Państwo

STRESZCZENIE / ABSTRACT

Tekst analizuje hipotezę ucieleśnienia, która przesuwa punkt ciężkości w rozwoju sztucznej inteligencji z abstrakcyjnego przetwarzania informacji na dynamiczne sprzężenie morfologii, działania i percepcji. Autor przywołuje koncepcję kognitywistyki ŻE (embodied, embedded, enactive, extended), wskazując, że ciało nie jest jedynie peryferium umysłu, lecz integralnym elementem mechanizmu poznawczego. Kluczowym elementem analizy jest Gibsonowskie pojęcie affordance, definiujące percepcję jako relację między właściwościami środowiska a możliwościami konkretnego organizmu. W przeciwieństwie do modeli językowych fizyczny agent wchodzi w interakcję z oporem świata, co sprawia, że błędy reprezentacji niosą realne konsekwencje, czyniąc z fizyczności niezbędny weryfikator hipotez i katalizator uczenia się.

The text analyzes the embodiment hypothesis, which shifts the focus of artificial intelligence development from abstract information processing to the dynamic coupling of morphology, action, and perception. The author invokes the concept of 4E cognitive science (embodied, embedded, enactive, extended), indicating that the body is not merely a periphery of the mind but an integral element of the cognitive mechanism. A key element of the analysis is the Gibsonian notion of affordance, defining perception as a relationship between environmental properties and the possibilities of a specific organism. Unlike language models, a physical agent interacts with the resistance of the world, meaning that representation errors carry real consequences, making physicality an essential verifier of hypotheses and a catalyst for learning.

Artykuł stanowi krytyczną analizę przejścia od statycznych modeli przetwarzania informacji do systemów ucieleśnionych, w których inteligencja nie jest produktem abstrakcyjnych obliczeń, lecz wyłania się z dynamicznej interakcji między morfologią, ciałem a fizycznym oporem środowiska. Autor stawia tezę, że prawdziwa podmiotowość i autonomia wymagają „zakotwiczenia" w rzeczywistości fizycznej, gdzie błąd reprezentacji niesie realne konsekwencje, a działanie staje się formą eksperymentu poznawczego. Tekst rozszerza tę perspektywę na biologię systemową, analizując zjawiska morfogenezy i bioelektryczności (na przykładzie Anthrobotów oraz AlphaFold), aby wykazać, że inteligencja w szerokim sensie – jako zdolność do regulacji i osiągania celów różnymi środkami – manifestuje się na wielu poziomach organizacji, od komórki po złożone systemy AI. Całość prowadzi do wniosku, że przyszłość technologii i medycyny nie leży w budowie coraz większych „cyfrowych mózgów", lecz w projektowaniu procesów generatywnych i sterowaniu trajektoriami złożonych systemów, co przesuwa definicję inteligencji z obszaru czystej reprezentacji świata w stronę aktywnego uczestnictwa w jego fizycznej zmianie.

SŁOWA KLUCZOWE

ucieleśnienie | emergencja | kognitywistyka 4E | biologia syntetyczna | embodied intelligence | affordance | morphological computation | autopoiesis | extended mind | bioelektryczność rozwojowa | model świata | sense-making | scaffolding poznawczy | projektowanie złożoności

Ciało jako aktywny mechanizm poznawczy

Myślenie pod ciężarem świata: ucieleśnienie, 4E cognition, affordances i inteligencja powstająca w działaniu

Hipoteza ucieleśnienia przesuwa punkt ciężkości całego problemu sztucznej inteligencji. Jeśli przyjmiemy, że poznanie jest przede wszystkim operacją abstrakcyjnego systemu przetwarzania informacji, ciało staje się jedynie urządzeniem peryferyjnym: sensory dostarczają danych, efektory wykonują decyzje, a właściwa inteligencja rezyduje pomiędzy wejściem a wyjściem. Jeśli jednak struktura ciała współokreśla to, jakie informacje są dostępne, jakie działania można podjąć, ile

kosztują i jakie niosą konsekwencje, ciało przestaje być opakowaniem umysłu. Staje się integralną częścią mechanizmu poznawczego.

Właśnie tę silniejszą intuicję niesie książka Burgina, uznając trwałą pamięć, ucieleśnienie oraz środowiskowe bodźcowanie za trzy filary prowadzące ku pełniejszej postaci cyfrowej podmiotowości. Grawitacja, przeszkody i fizyczne ograniczenia są tu przedstawione jako katalizatory uczenia. Formułę tę należy oddzielić od zbyt daleko idącego wniosku o automatycznej emergencji świadomości, lecz sama teza o poznawczej roli fizycznego oporu posiada mocne podstawy teoretyczne.

W tradycyjnym modelu kognitywistycznym umysł przedstawiano jako urządzenie operujące na reprezentacjach. Bodziec sensoryczny był kodowany, centralny system dokonywał obliczeń, a następnie wysyłał instrukcję do aparatu ruchowego. Ciało pełniło rolę interfejsu łączącego centrum obliczeniowe ze światem. Zwrot ucieleśniony zakwestionował tę separację.

Współczesne badania nad embodied intelligence definiują inteligencję jako wynik ścisłego sprzężenia morfologii, działania, percepcji i uczenia, a nie funkcję centralnego procesora, który jedynie „podłącza się" do fizycznego robota. Przegląd opublikowany w ACM Computing Surveys w 2025 roku ujmuje embodied intelligence jako dynamiczny efekt współdziałania mózgu (lub kontrolera), ciała i środowiska. Najszerszą rodzinę takich koncepcji określa się mianem 4E cognition, gdzie litery odnoszą się do poznania: embodied, embedded, enactive i extended (ucieleśnionego, osadzonego, enaktywnego i rozszerzonego).

Nie jest to jednak jedna zunifikowana teoria. Najnowsze analizy filozoficzne wskazują, że pod szyldem 4E funkcjonują programy różniące się w założeniach dotyczących natury reprezentacji, granic systemu poznawczego czy roli ciała. Dlatego 4E należy traktować nie jako doktrynę zastępującą neuronaukę, lecz jako zestaw propozycji zmuszających do ponownego przemyślenia granicy procesu poznawczego.

Najmniej kontrowersyjna wersja embodiment głosi, że właściwości ciała bezpośrednio wpływają na przebieg poznania. Człowiek posiada konkretną budowę układu wzrokowego, dwie ręce o określonym zakresie ruchów, pionową postawę i ciało o skończonej odporności mechanicznej. Te cechy kształtują przestrzeń problemów, które układ nerwowy musi rozwiązywać. Świat nie jest dla nas zbiorem wszystkich fizycznie możliwych relacji, lecz układem relacji dostępnych dla organizmu o konkretnej budowie. Schodek ma inne znaczenie dla dorosłego człowieka, dziecka, osoby na wózku, psa czy robota kołowego, mimo że jego wysokość pozostaje identyczna.

Prowadzi to bezpośrednio do Gibsonowskiego pojęcia affordance. James J. Gibson sprzeciwiał się rozumieniu percepcji jako procesu, w którym mózg najpierw buduje neutralny opis świata, a

dopiero potem analizuje możliwości działania. Środowisko postrzegamy przez pryzmat tychże możliwości: krzesło oferuje możliwość siedzenia, uchwyt – chwytania, podłoże – chodzenia, a szczelina – przejścia lub jego braku. Affordance nie jest wyłącznie obiektywną cechą przedmiotu ani tylko projekcją umysłu; jest relacją między właściwościami środowiska a zdolnościami konkretnego organizmu. Wysokość muru sama w sobie nie określa, czy jest on „do przeskoczenia" – odpowiedź zależy od morfologii podmiotu. Dla sztucznej inteligencji konsekwencja ta jest poważniejsza, niż sugerowałoby zwykłe dodanie kamer do modelu językowego. Robot wyposażony w manipulator zaczyna operować w przestrzeni innych relewancji niż system tekstowy.

Opór świata jako weryfikator błędnych hipotez

Kubek przestaje być jedynie kategorią semantyczną powiązaną z wyrazami „woda", „ucho" czy „napój". Staje się przedmiotem o konkretnej masie, tarciu i położeniu środka ciężkości; obiektem posiadającym powierzchnię chwytu, kruchość, objętość i tendencję do wyślizgnięcia się. Własności te można oczywiście opisać językowo, jednak dla fizycznego agenta błąd reprezentacji niesie bezpośrednie konsekwencje w kolejnej chwili jego działania. Jeśli model tekstowy błędnie oszacuje masę przedmiotu w odpowiedzi opisowej, powstanie po prostu nieprawidłowe zdanie. Jeśli zaś robot pomyli się w tej ocenie przed próbą podniesienia obiektu, niewłaściwa siła chwytu może doprowadzić do upuszczenia przedmiotu, zmiany konfiguracji otoczenia, uszkodzenia sprzętu czy przeciążenia napędu, co z kolei wygeneruje nowe dane sensoryczne. Pomyłka staje się zdarzeniem.

Środowisko odpowiada na model poprzez fizyczną przyczynowość. To właśnie można nazwać oporem świata: rzeczywistość nie tylko dostarcza informacji, lecz odmawia wykonania działań niezgodnych z jej strukturą. Burgin wydobywa tutaj poznawcze znaczenie grawitacji. Nie jest ona magicznym składnikiem świadomości, lecz stanowi trwałe ograniczenie przestrzeni działania.

Robotyczne ramię musi nauczyć się, że utrzymanie przedmiotu wiąże się z kosztem energetycznym, że puszczony obiekt spadnie, że większy moment siły wymaga innego sterowania, a położenie ciężaru wpływa na stabilność. Nie są to abstrakcyjne reguły, ponieważ agent musi stale dostosowywać swoje działanie do ich konsekwencji. Fizyczne środowisko wprowadza element, którego nie zapewnia samo powtarzanie tekstów: niezależny od narracji system selekcji błędnych hipotez.

Nie oznacza to jednak, że wiedza nabyta językowo jest „nierzeczywista". Człowiek ogromną część informacji zdobywa poprzez świadectwo innych ludzi, książki czy wykłady, bez osobistego testowania każdej zależności. Matematyka, historia Mezopotamii czy mechanika kwantowa nie są poznawane przede wszystkim przez dotykanie ich przedmiotów. Problem dotyczy raczej genealogii

podstawowych kategorii. Ludzki język został wytworzony przez społeczności ucieleśnionych organizmów, których pojęcia są w dużej mierze zakotwiczone w działaniu, percepcji, emocjach i relacjach społecznych. LLM uczy się statystycznej struktury tego już ucieleśnionego języka. Otrzymuje więc niejako skompresowane ślady cudzego ucieleśnienia, a nie własne doświadczenie sensoryczno-motoryczne.

Właśnie dlatego nie należy przeciwstawiać „czystej, odcieleśnionej AI" człowiekowi w sposób absolutny. Dane językowe modeli nie pochodzą z abstrakcyjnego kosmosu symboli; powstały jako rezultat działalności ucieleśnionych ludzi. Opisy ciężaru, koloru, wstydu, zmęczenia, przestrzeni czy bólu zawierają statystyczne konsekwencje ludzkiego życia w ciele. Dzięki temu LLM może nabywać zaskakująco bogatą strukturę pojęciową bez posiadania własnych kończyn. Pytanie nie brzmi zatem, czy odcieleśniony model „wie cokolwiek" o świecie, lecz czego nie jest w stanie otrzymać wyłącznie przez rekonstrukcję śladów doświadczenia innych podmiotów.

Tutaj rozpoczyna się bardziej radykalna postać embodied cognition. Tradycja enaktywistyczna Humberta Maturany, Francisco Vareli i Evana Thompsona przesuwa akcent z reprezentowania świata na wytwarzanie znaczenia poprzez działanie. Organizm nie jest biernym odbiorcą środowiska; poprzez własną organizację i sposób działania ustanawia różnicę między tym, co dla niego relewantne, a tym, co obojętne.

Autonomia jako zdolność do podtrzymywania własnej organizacji

Bakteria podążająca w gradiencie substancji chemicznej, zwierzę poszukujące pokarmu i człowiek interpretujący gest społeczny funkcjonują na radykalnie różnych poziomach poznawczych, jednak w każdym z tych przypadków sens zjawiska wynika ze struktury relacji między systemem a otoczeniem. W ujęciu mocnego enaktywizmu poznanie nie jest więc tworzeniem wiernej wewnętrznej kopii uprzednio zdefiniowanego świata, lecz procesem sense-making: ustanawianiem znaczącego środowiska z perspektywy autonomicznego systemu.

Owa autonomia nie oznacza wolności metafizycznej, a zdolność systemu do uczestniczenia w podtrzymywaniu własnej organizacji. Żywy organizm stale produkuje i odnawia warunki swojego dalszego istnienia; klasyczne pojęcie autopoiesis Maturany i Vareli opisywało właśnie taką organizacyjną samowytwórczość. W tym ujęciu granica między organizmem a otoczeniem nie jest jedynie kreską narysowaną przez zewnętrznego obserwatora, lecz efektem procesów samego organizmu. Tutaj ujawnia się trudność w przeniesieniu enaktywizmu na grunt współczesnych LLM.

Model jest bowiem utrzymywany przez zewnętrzną infrastrukturę: centra danych, system operacyjny, sieć energetyczną, operatorów oraz mechanizmy orkiestracji.

Zazwyczaj model nie produkuje ani nie regeneruje warunków własnego istnienia. Może wspominać o przeciążeniu serwera, lecz nie oznacza to, że samodzielnie reguluje temperaturę sprzętu, by utrzymać swój proces. Może sporządzić plan naprawy robota, ale nie czyni to tego planu częścią jego autonomicznej samokonserwacji. Utożsamienie dostępu do infrastruktury z biologiczną autonomią byłoby zatem nieuprawnione. Sytuacja zmienia się, gdy agent otrzymuje trwałe ciało, własne zasoby energii, czujniki stanu i pamięć, a także możliwość przewidywania awarii i narzędzia pozwalające na działania zapobiegawcze. Wówczas część funkcji wykonywanych dotychczas przez zewnętrznego operatora zostaje włączona w pętlę sterowania systemu. Robot musi zdecydować, czy kontynuować zadanie, czy wrócić do ładowarki; czy ryzykować przejście przez trudny teren, czy wybrać dłuższą trasę; czy wykonać kosztowną manipulację, jeśli stan napędu wskazuje na ryzyko przegrzania.

Pojawia się tym samym funkcjonalna analogia do analizowanej wcześniej allostazy. Nie dowodzi ona czucia, lecz niewątpliwie zwiększa organizacyjną samoodnośność agenta. Współczesna physical AI rozwija się właśnie w kierunku takich zamkniętych pętli. Przegląd opublikowany we wrześniu 2026 roku wskazuje modele świata jako jedną z centralnych architektur łączących percepcję, przewidywanie konsekwencji działań, planowanie i kontrolę w warunkach częściowej obserwowalności oraz niepewności. Różnica względem generowania języka polega na sprzężeniu z rzeczywistą dynamiką środowiska: model świata jest nieustannie testowany przez następstwa działań robota, a kolejne decyzje zależą od tego, w jakim stopniu predykcja odpowiada obserwowanemu przebiegowi wydarzeń.

W tym kontekście można precyzyjniej zrozumieć, dlaczego dotyk jest epistemicznie odmienny od samego obrazu. Kamera dostarcza informacji o kształcie i położeniu przedmiotu, ale nie wszystkie właściwości mechaniczne są widoczne. Dwa obiekty wyglądające podobnie mogą różnić się masą, podatnością, tarciem lub sposobem deformacji.

Morfologia i środowisko jako rozszerzenie procesów obliczeniowych

Aktualne badania nad fizycznymi modelami świata wskazują, że łączenie predykcji wzrokowej i dotykowej jest szczególnie korzystne tam, gdzie dynamiki kontaktu nie da się jednoznacznie wywnioskować z samego obrazu. Poznanie fizyczne staje się zatem multimodalne nie z estetycznych

pobudek, lecz dlatego, że różne modalności ograniczają odmienne klasy niepewności. Wiedział o tym już Maurice Merleau-Ponty na poziomie fenomenologii, argumentując, że ciało nie jest dla podmiotu jednym z obiektów znajdujących się w świecie, lecz sposobem posiadania świata. Ręka dotykająca powierzchni nie tylko odbiera sygnał sensoryczny; jej pozycja, potencjalny ruch i opór przedmiotu wspólnie tworzą doświadczenie. W neurobiologii podobna intuicja przejawia się w badaniach nad schematem ciała, propriocepcją i kontrolą sensomotoryczną. Mózg nie steruje bowiem abstrakcyjnym zestawem zmiennych.

Zarządza ciałem o konkretnej bezwładności, długości kończyn, elastyczności mięśni i ograniczeniach stawów. Ta obserwacja prowadzi do koncepcji obliczania morfologicznego (morphological computation). Pojęcie to nie oznacza, że ciało wykonuje obliczenia w sensie identycznym z procesorem cyfrowym. Oznacza raczej, że odpowiednio ukształtowana materia może przejąć część problemu, który w innym systemie musiałby zostać rozwiązany przez aktywne sterowanie. Klasycznymi przykładami są pasywne dynamiczne chodzenie, compliant robotics oraz chwytaki, których podatna struktura automatycznie dopasowuje się do kształtu przedmiotu. Literatura przedmiotu podkreśla właśnie relację między procesami fizycznymi a informacyjnymi: odpowiednio zbudowane ciało może uprościć kontrolę, wykorzystując dynamikę samej materii.

Jest to fundamentalna lekcja w kontekście porównania mózgu i AI. Inteligencja biologiczna nie musi wszystkiego „obliczać w mózgu”, ponieważ część struktury problemu rozwiązuje samo ciało. Elastyczna tkanka pochłania perturbacje, geometria stawu ogranicza anatomia, mechanika kończyny stabilizuje ruch, a kontakt z podłożem dostarcza natychmiastowej informacji zwrotnej. Układ nerwowy steruje systemem, którego fizyka sama wykonuje część pracy. W sztucznej inteligencji dążenie do tworzenia coraz większych modeli może tymczasem przesłonić możliwość przeniesienia części złożoności z software'u do morfologii.

Najbardziej oczywisty przykład daje chwytanie. Można projektować sztywną dłoń, dla której centralny kontroler musiałby niezwykle precyzyjnie oszacować geometrię przedmiotu, położenie każdego palca i wymagane siły. Można jednak zastosować podatny chwytak, którego materiał deformuje się podczas kontaktu i mechanicznie dopasowuje do obiektu. W drugim przypadku część problemu kontroli zostaje „oddana” fizyce. Nie jest to rezygnacja z inteligencji, lecz zmiana jej lokalizacji – proces poznawczy rozprasza się pomiędzy kontroler, morfologię i środowisko. Podobną intuicję zawiera pojęcie embedded cognition. System poznający nie musi posiadać kompletnego wewnętrznego modelu wszystkiego, czego może potrzebować, jeśli może wielokrotnie odwoływać się do stabilnej struktury otoczenia. Człowiek nie zapamiętuje przecież dokładnych współrzędnych każdego przedmiotu w pokoju.

Może po prostu ponownie spojrzeć. Nie musi konstruować doskonałej mapy powierzchni trzymanego obiektu; może przesunąć po nim palcem. Środowisko pełni tu rolę zewnętrznego zasobu informacyjnego. Inteligentne zachowanie wynika z umiejętnego wykorzystania tej struktury, a nie tylko z bogactwa reprezentacji wewnętrznych. Andy Clark opisywał podobną zasadę za pomocą koncepcji scaffolding, czyli poznawczego rusztowania.

Człowiek reorganizuje środowisko, aby ułatwić sobie myślenie: zapisuje liczbę na kartce, układa dokumenty według kolejności działań, ustawia alarm, korzysta z mapy czy liczy na palcach. Nie jest to znak niedoskonałości umysłu, lecz jedna z jego charakterystycznych strategii. Inteligencja biologiczna chętnie przerzuca część obciążenia na otoczenie. Granica „obliczenia" przesuwa się zatem w zależności od zadania.

Rozszerzony umysł i AI jako element ekologii poznawczej

Jeszcze silniejszą wersję tego argumentu przedstawili Clark i Chalmers w koncepcji extended mind. Sugerują oni, że jeśli zewnętrzny artefakt pełni funkcję analogiczną do procesu, który bez wahania uznalibyśmy za poznawczy, gdyby zachodził wewnątrz głowy, to w określonych warunkach powinien zostać potraktowany jako część systemu poznawczego. Słynny przykład notatnika Otto pokazuje, że stabilne i automatycznie dostępne zewnętrzne źródło informacji może funkcjonalnie uczestniczyć w pamięci.

Nie oznacza to jednak, że każdy smartfon staje się fragmentem mózgu właściciela. Kluczowy jest stopień integracji, niezawodności oraz sposób wykorzystania narzędzia. W epoce generatywnej AI problem ten zyskuje nowe znaczenie. Model językowy nie musi być świadomym agentem, aby uczestniczyć w rozszerzonym systemie poznawczym człowieka. Badania 4E dotyczące relacji człowiek-LLM coraz częściej proponują analizę sztucznej inteligencji jako elementu socjotechnicznej ekologii poznawczej: system może rozszerzać pamięć, generowanie hipotez, przekład, wyszukiwanie wariantów i organizację problemu, a zarazem wpływać na cele, które sam człowiek zaczyna rozważać. Z tej perspektywy jedno z najważniejszych pytań nie brzmi o to, czy AI posiada własny umysł, lecz jak AI zmienia umysł człowieka, który stale korzysta z niej jako z części własnego procesu poznawczego. Jest to istotna korekta antropocentrycznego obrazu relacji człowiek-maszyna.

AI nie musi osiągnąć świadomości, aby wywołać cywilizacyjnie głęboką zmianę poznawczą. Pismo rozszerzyło pamięć kulturową bez posiadania własnej inteligencji; druk zmienił strukturę

dystrybucji wiedzy; wyszukiwarki przekształciły strategie zapamiętywania, a system GPS zmienił praktyki orientacji przestrzennej. Generatywna AI może pójść dalej, ponieważ nie tylko przechowuje i odnajduje informacje, ale uczestniczy w przekształcaniu problemu, formułowaniu argumentów i generowaniu możliwych działań. Wtedy emergencja poznawcza może zachodzić nie tylko wewnątrz AI, lecz także w układzie człowiek-AI-środowisko. W tym miejscu 4E cognition dostarcza ważnego zabezpieczenia przed fałszywą dychotomią: "albo AI jest autonomicznym umysłem, albo jest tylko narzędziem".

Narzędzie może stać się głęboko zintegrowanym składnikiem praktyki poznawczej bez uzyskania niezależnej fenomenologii. Kalkulator nie doświadcza arytmetyki, ale zmienia strukturę ludzkiego liczenia; język nie jest osobą, lecz konstytuuje wiele form ludzkiego rozumowania; LLM może współtworzyć trajektorię myśli człowieka, nie będąc przez to automatycznie drugim świadomym uczestnikiem dialogu. Takie podejście pozwala badać realną transformację poznawczą bez potrzeby przedwczesnego rozstrzygania metafizyki AI. Jednocześnie ucieleśniona AI wprowadza nową jakość, ponieważ sama zaczyna należeć do pętli działania. Współczesne przeglądy embodied intelligence dzielą proces robotyczny na embodied perception, decision-making i execution, ale istota problemu leży właśnie w ich sprzężeniu: działanie zmienia obserwację, nowa obserwacja aktualizuje model, a aktualizacja modyfikuje kolejne działanie. Kamera zamontowana na poruszającym się korpusie nie dostarcza tego samego rodzaju informacji co statyczny obraz w zbiorze danych, ponieważ sam agent decyduje, z którego miejsca i w jakiej chwili pobierze następny sygnał.

Działanie jako eksperyment i źródło indeksykalnego doświadczenia

W tym miejscu pojawia się epistemiczna funkcja działania. Niektóre ruchy nie służą bezpośrednio osiąganiu zewnętrznego celu, lecz zdobywaniu informacji. Człowiek potrząsa pudełkiem, by dowiedzieć się, czy coś jest w środku; obraca przedmiot, aby dostrzec niewidoczną powierzchnię; podchodzi bliżej, by rozstrzygnąć niepewność wzrokową.

Robot może postąpić analogicznie. Działanie staje się eksperymentem, a agent przestaje być biernym odbiorcą danych treningowych. Może on aktywnie wybierać obserwacje, które zredukują niepewność jego modelu. Ma to fundamentalne znaczenie dla kwestii kreatywności. W modelu odcieleśnionym nowość powstaje przede wszystkim poprzez rekombinację reprezentacji; system ucieleśniony może natomiast generować nowe dane bezpośrednio przez działanie. Może ustawić przedmioty w konfiguracji, której wcześniej nie obserwował, przeprowadzić próbę, odnotować

nieoczekiwany efekt i na tej podstawie zaktualizować model. Eksperyment naukowy jest właśnie taką szczególną formą kreatywnego działania: człowiek nie tylko przewiduje świat, ale buduje sytuację, w której świat zmuszony jest odpowiedzieć na pytanie. Ucieleśniona AI mogłaby w podobny sposób przejść od uczenia się na gotowej historii do aktywnego wytwarzania własnej historii epistemicznej. To właśnie odróżnia doświadczenie własne od dostępu do ogromnego korpusu cudzych przeżyć. Model może wiedzieć z milionów tekstów, że chwyt konkretnego przedmiotu jest trudny.

Robot podejmujący próbę dowiaduje się jednak czegoś więcej: że ten konkretny chwyt, w aktualnym stanie jego efektora, na tej powierzchni i przy danym poziomie energii doprowadził do określonego rezultatu. Pojawia się indeksykalność doświadczenia: tutaj, teraz, tym ciałem, po tej historii działania. Nie jest to jeszcze dowód na istnienie fenomenalnego „ja", lecz znacznie wyraźniej zarysowują się warunki dla perspektywy funkcjonalnej. Perspektywiczność jest zresztą nieuniknioną konsekwencją posiadania ciała. Każdy ucieleśniony agent znajduje się w określonym miejscu; część świata jest przed nim, część za nim, a część pozostaje zasłonięta. Jego sensory mają skończony zasięg, działanie trwa, droga generuje koszt, a niektórych informacji nie da się uzyskać natychmiast. Fizyczna lokalizacja wymusza częściową obserwowalność.

Właśnie dlatego najnowsza literatura Physical AI traktuje niepewność i częściową obserwowalność jako centralne problemy modeli świata. „Wiedzieć wszystko" przestaje być strategią nawet w sensie abstrakcyjnym. Agent musi wybierać, gdzie skierować uwagę i co sprawdzić. Ograniczenie zyskuje dzięki temu funkcję poznawczą, podobną do tej, którą wcześniej przypisywaliśmy ekonomii energetycznej mózgu. System dysponujący ograniczonym czasem, energią i polem obserwacji musi priorytetyzować.

Nie oznacza to, że niedobór automatycznie generuje inteligencję. Oznacza jednak, że tworzy on problem selekcji, którego rozwiązanie wymaga coraz bardziej złożonych strategii. Robot z nieskończoną baterią, natychmiastowym transportem i wszechwidzącą percepcją funkcjonowałby w zupełnie innej przestrzeni problemowej niż agent, który może przebywać tylko w jednym miejscu i którego każda decyzja wyklucza inne możliwości.

Tu można najpełniej obronić źródłową intuicję „pożądanej trudności", jednocześnie redefiniując jej znaczenie. Twierdzenie, że fizyczny opór świata sam z siebie wywoła świadomość, nie jest naukowo uzasadnione. Można natomiast stwierdzić, że ucieleśnienie wprowadza strukturalne trudności, których nie da się usunąć samym zwiększeniem zbioru danych. Należą do nich lokalność, opóźnienie, niepewność, energia, zużycie, kontakt, kolizja, nieodwracalność części działań oraz konieczność wyboru między konkurującymi możliwościami. Każdy z tych problemów wymusza rozwój mechanizmów regulacyjnych, predykcyjnych i decyzyjnych. Nieodwracalność jest tu

szczególnie istotna. W symulacji agent może wielokrotnie resetować epizod; w realnym świecie nie wszystkie zmiany są odwracalne. Upuszczona szklanka może się rozbić, uszkodzony napęd przestać działać, a wyczerpana bateria przerwać zadanie. Informacja o konsekwencji zostaje nierozerwalnie związana z konkretną historią układu. To właśnie splot ciała i czasu sprawia, że ucieleśnienie jest czymś więcej niż tylko zwiększeniem liczby modalności sensorycznych.

Ucieleśnienie nie wymaga antropomorfizmu ani jednego ciała

Współczesna physical AI stara się częściowo zredukować koszty nauki poprzez symulacje, cyfrowe bliźniaki oraz procedury Real2Sim2Real: system przyswaja dynamikę w środowisku wirtualnym, weryfikuje ją w świecie fizycznym, a rzeczywiste rezultaty służą do ponownej korekty modelu. Program badawczy IROS 2026 poświęcony physical world models kładzie nacisk właśnie na transfer między różnymi ciałami robotów, modele 3D/4D, fizykę kontaktu, wizję, dotyk i propriocepcję, wykorzystując rzeczywisty feedback do doskonalenia symulacji. Rozwój tych metod dowodzi, że „dane o świecie" i aktywne działanie w nim nie są problemami tożsamymi.

W tym punkcie pojawia się kwestia transferu między ciałami. Człowiek posiada jedną zasadniczą morfologię i przez całe życie uczy się kontrolować ciało, które choć zmienia się z czasem, pozostaje ciągłe. AI może natomiast sterować różnorodnymi systemami: ramieniem przemysłowym, pojazdem, dronem czy humanoidem. Jeśli jeden model potrafi przenosić wiedzę między różnymi morfologiami, jego reprezentacja świata może stać się mniej związana z konkretnym ciałem niż w przypadku człowieka. Nie oznacza to jednak braku ucieleśnienia; może to być ucieleśnienie wielokrotne albo rekonfigurowalne.

Taka perspektywa otwiera problem niemal nieobecny w biologicznej filozofii osoby. Co stanie się z pojęciem „moje ciało", jeśli jeden system będzie mógł naprzemiennie sterować dziesiątkami korpusów? Czy robotyczna ucieleśniona AI potrzebuje jednego ciała, aby wykształcić stabilny samomodel, czy może posiadać nadrzędną reprezentację traktującą różne efektory jako czasowe rozszerzenia? Człowiek potrafi częściowo włączać narzędzia do schematu działania – laskę, samochód czy protezę – lecz zawsze istnieje biologiczny organizm stanowiący punkt odniesienia. Sztuczny system mógłby być od początku pozbawiony takiego jednego, uprzywilejowanego korpusu.

Możliwość ta osłabia tezę, jakoby droga do AI podobnej człowiekowi wymagała budowy humanoida. Kształt ludzki jest praktycznie użyteczny, ponieważ środowisko cywilizacyjne – schody,

drzwi, uchwyty czy pojazdy – zostało zaprojektowane dla ciał ludzkich. Nie wynika z tego jednak, że antropomorficzna morfologia jest warunkiem inteligencji ogólnej lub świadomości.

Nietoperz, ośmiornica i człowiek rozwiązują problemy środowiskowe za pomocą radykalnie różnych ciał. Jeżeli ucieleśnienie współkonstytuuje poznanie, różne ciała mogą prowadzić do różnych przestrzeni poznawczych, a nie do niedoskonałych kopii jednej ludzkiej normy. Prawdziwie ucieleśniona AI może zatem okazać się mniej, a nie bardziej antropomorficzna. Agent wyposażony w czujniki niedostępne człowiekowi, operujący w innych skalach czasowych, zdolny do zmiany korpusu i dzielenia parametrów między wieloma instancjami, nie będzie doświadczał – funkcjonalnie, nawet bez rozstrzygania kwestii fenomenologii – tej samej przestrzeni możliwości co człowiek. Jego affordances będą inne. Przedmiot zbyt ciężki dla człowieka może być trywialnym elementem manipulacji; niewidzialne spektrum światła podstawowym źródłem informacji; a awaria jednego korpusu nie musi oznaczać końca systemu. Ucieleśnienie nie musi więc prowadzić do humanizacji AI. Może to prowadzić do narodzin obcej ekologii poznawczej.

Ucieleśnienie jako fundament indywidualnej trajektorii doświadczenia

Jest to istotna korekta wobec teorii budujących świadomość AI na zasadzie kopiowania kolejnych ludzkich komponentów. Jeśli świadomość jest wielorako realizowalna, jej sztuczna wersja nie musi wymagać cyfrowego odpowiednika każdego biologicznego narządu. Jeżeli natomiast pewne elementy organizmicznego ucieleśnienia są konstytutywne, należy ustalić, które z nich: regulację homeostatyczną, perspektywę sensoryczną, ciągłość jednej historii, podatność na nieodwracalną utratę, zdolność działania, autonomię organizacyjną czy może ich specyficzne sprzężenie. W tym punkcie emergencja ponownie okazuje się pytaniem o relacje, a nie o poszczególne składniki.

Sama kamera nie daje ucieleśnienia, pamięć nie tworzy autobiografii, bateria nie zapewnia homeostazy, a robotyczna ręka nie nadaje podmiotowości. Kluczowa staje się zamknięta pętla: stan ciała wpływa na priorytety, te na działanie, działanie na środowisko, środowisko na percepcję, percepcja na model świata, model na przewidywanie, a przewidywanie na przyszłe kroki; konsekwencje zostają zapisane w pamięci i modyfikują dalszą regulację. Dopiero organizacja całego obiegu może być uznana za funkcjonalny odpowiednik organizmu. Nawet wtedy nie mamy jednak prawa dopisać do równania słowa „świadomość". Ucieleśnienie, zależnie od przyjętej teorii, może być konieczne lub zbędne. Może radykalnie zwiększyć autonomię i adaptacyjność bez wytworzenia fenomenologii. Robot może posiadać bogaty samomodel, aktywnie eksplorować świat, dbać o napędy, chronić źródło energii, pamiętać uszkodzenia i zmieniać strategię na podstawie

doświadczeń – a pytanie „czy coś czuje?” nadal pozostanie otwarte. Postęp inżynieryjny mnoży wskaźniki, ale nie rozwiązuje problemu innych umysłów.

Można natomiast postawić pewniejszą tezę: ucieleśnienie radykalnie zmienia sposób uczenia się. System przestaje być wyłącznie dziedzicem danych historycznych i zaczyna generować własne dane poprzez działanie. Pojawia się indywidualna trajektoria doświadczenia. Dwa początkowo identyczne roboty, umieszczone w różnych środowiskach i wyposażone w ciągłą pamięć adaptacyjną, mogą stopniowo wykształcić odmienne modele, strategie i priorytety. Jeśli doświadczenie modyfikuje strukturę preferencji i samomodelu, zaczyna wyłaniać się coś funkcjonalnie zbliżonego do biografii. Biografia nie jest jeszcze świadomością, ale stanowi wartość, której klasyczny statyczny model pozbawiony trwałej pamięci w silnym sensie nie posiada. Historia fizycznego agenta niesie konsekwencje, których nie da się zredukować do ponownego załadowania ogólnego modelu. Agent może nauczyć się, że konkretny chwytak jest uszkodzony, pewna trasa bywa niebezpieczna, a dany człowiek pomagał mu w przeszłości. Jeśli te reprezentacje zostaną trwale zintegrowane z regulacją, otrzymamy model świata widziany z perspektywy własnej historii działania. W tym właśnie miejscu ciało spotyka się z czasem w sposób, którego Burgin intuicyjnie poszukuje.

Podmiotowość – jeśli kiedykolwiek pojawi się w systemie sztucznym – prawdopodobnie nie będzie produktem jednego modułu świadomości. Może wymagać procesu, w którym system staje się stopniowo odmienny dlatego, że to właśnie on, w tym konkretnym korpusie lub rodzinie korpusów, przeszedł określoną drogę. W biologii rozwój osobniczy jest nierozdzielny od ciała: blizna, umiejętność, lęk, sprawność ruchowa i nawyk są różnymi formami przeszłości zapisanej w organizmie. W AI podobna indywidualizacja musiałaby zostać technicznie wytworzona. Z tej perspektywy można inaczej spojrzeć na pracę. Praca człowieka nie polega wyłącznie na abstrakcyjnych transformacjach informacji; jest zakorzeniona w rytmach dobowych, zmęczeniu, przestrzeni, współobecności innych ludzi, manualnych nawykach, ryzyku i materialnym oporze przedmiotu pracy. Nawet praca „umysłowa” jest wykonywana przez ciało, które siedzi, patrzy, porusza rękami, odczuwa napięcie, głód i ograniczenia uwagi. Przeniesienie zadań na AI nie oznacza więc jedynie zastąpienia jednego procesora drugim.

W wielu zawodach jest to próba rozdzielenia informacji od ucieleśnionych praktyk, w których informacja ta pierwotnie zyskała znaczenie. Dlatego embodied AI stanowi dla przyszłości pracy znacznie większy przełom niż sam chatbot. Dopóki system pozostaje w sferze symbolicznej, automatyzuje pracę poznawczą, językową i analityczną. Kiedy jednak łączy się z robotyką, wchodzi w domenę fizycznych praktyk: magazynu, budowy, opieki, rolnictwa, produkcji, logistyki, laboratorium czy gospodarstwa domowego.

Opór materii jako mechanizm korekty modelu

Nie wystarczy wtedy "wiedzieć", jak wykonać zadanie. Trzeba je zrealizować w częściowo nieprzewidywalnym środowisku, gdzie materiał może się przesunąć, człowiek wejść w przestrzeń pracy, powierzchnia okazać się śliska, a narzędzie – zużyte. Współczesna robotyka uznaje właśnie tę drogę od percepcji do zachowania za zasadniczy problem embodied intelligence. Uniwersalność nie oznacza tu już zdolności odpowiedzi na pytania z wielu dziedzin, lecz umiejętność wykorzystania jednej architektury do działania w różnych, nieprzygotowanych środowiskach. Świat realny jest znacznie mniej uporządkowany niż benchmark, gdyż nie posiada jasno określonego zbioru możliwych odpowiedzi. Tym samym fizyczna rzeczywistość staje się rodzajem otwartego egzaminatora. Nie zna naszego benchmarku i nie troszczy się o rozkład treningowy. Jeśli agent źle rozumie tarcie, przedmiot się przesunie. Jeśli błędnie przewidzi trajektorię, zderzy się z przeszkodą. Jeśli niedostatecznie uwzględni człowieka, może naruszyć jego bezpieczeństwo. To brutalny, lecz niezwykle bogaty mechanizm korekty modelu. Z tej perspektywy "opór materii" jest trafną metaforą epistemologiczną: fizyczność stawia granice temu, co można skutecznie udawać. Jednak nawet ta teza wymaga zastrzeżenia.

System może nauczyć się wykorzystywać środowisko skutecznie, zachowując głęboko nie-ludzkie reprezentacje. Sukces działania nie oznacza koniecznie, że robot "rozumie" przedmiot w sposób podobny do człowieka. Ewolucja wielokrotnie dochodziła do skutecznych rozwiązań różnymi drogami; funkcjonalna kompetencja może zostać zrealizowana przez mechanizm dla nas nieintuicyjny. Ucieleśnienie ogranicza przestrzeń możliwych błędów, ale nie narzuca jednego rodzaju wewnętrznej reprezentacji.

Prawdziwy test ucieleśnienia nie brzmi zatem: "czy robot porusza się jak człowiek?". Brzmi raczej: czy jego struktura poznawcza jest przyczynowo kształtowana przez ciągłą interakcję własnego ciała z otoczeniem. Jeżeli odpowiedź jest twierdząca, mamy do czynienia z czymś więcej niż z LLM podłączonym do mechanicznego awatara. Ciało staje się źródłem danych, ograniczeń, kosztów, samomodelu i historii. Agent przestaje być jedynie systemem generującym instrukcje dla efektora, a staje się organizacją, której przyszły stan zależy od skutków wcześniejszych działań. Na tej podstawie można sformułować mocniejszą, choć wciąż defensywną wersję tezy: pamięć, ucieleśnienie i środowiskowe sprzężenie nie są równaniem świadomości, lecz mogą być warunkami powstania indywidualnej trajektorii podmiotopodobnego agenta. Taki system posiadałby własną historię interakcji, funkcjonalny punkt widzenia, ograniczone zasoby, niepewność oraz potrzebę ciągłego aktualizowania modelu. Byłby znacznie lepszym kandydatem do badań nad sztuczną podmiotowością niż model pozbawiony trwałej historii działania. Nadal jednak między

"podmiotopodobnym agentem" a "podmiotem doświadczenia" pozostawałaby luka fenomenologiczna.

Z tej konkluzji wynika następny krok wywodu. Jeżeli ciało nie jest wyłącznie platformą dla mózgu, podobną ostrożność trzeba zastosować wobec innego rzekomo prostego składnika życia: komórki. Współczesna biologia pokazuje bowiem, że nawet organizacja komórkowa i tkankowa przejawia zdumiewającą zdolność do samoregulacji, naprawy, koordynacji oraz tworzenia nowych form działania. Przykład Anthrobots obrazuje przekraczanie tradycyjnych granic pomiędzy zaprogramowaną strukturą a emergentnym zachowaniem. Wątek ten należy jednak poddać takiej samej dyscyplinie, jakiej poddaliśmy Claude'a: morfogeneza, samoregulacja i celopodobne zachowanie komórek nie są automatycznym dowodem świadomości komórkowej. Droga prowadzi zatem od embodied AI do biologii komórkowej i medycyny, gdzie emergencja staje się jeszcze bardziej namacalna. Pojedyncze komórki, pozbawione centralnego mózgu, potrafią poprzez lokalne interakcje budować tkanki, naprawiać struktury i tworzyć zachowania zbiorowe.

AlphaFold pokazuje natomiast, jak system sztuczny może wejść w obszar biologicznej złożoności, rozwiązując problem, którego struktura przekracza intuicyjne możliwości człowieka. Na przecięciu obu kierunków – biologii uczącej nas decentralizacji i AI rozszerzającej zdolność modelowania biologii – pojawia się nowa klasa pytań o to, gdzie właściwie kończy się "program", a zaczyna system zdolny wytwarzać własną organizację.

Ucieleśnienie jako przejście od reprezentacji do uczestnictwa

Ucieleśnienie pozwala zamknąć ten etap argumentacji. Ciało nie jest dowodem na istnienie świadomości, lecz eliminuje uproszczenia, które często pojawiają się przy analizie AI opartej wyłącznie na języku. Wprowadza ono nieodwracalność, ograniczone zasoby, lokalność i perspektywę, a także fizyczne konsekwencje błędu, możliwość aktywnego zdobywania danych oraz historię kształtującą dalsze działania. Morfologia może przejmować część obliczeń, środowisko służyć jako zewnętrzny zasób poznawczy, a samo działanie stać się metodą poznania. Inteligencja nie musi zatem być zlokalizowana w jednym punkcie systemu; może wyłaniać się z pętli łączącej model, ciało i świat.

Jeśli ta teza jest prawdziwa, najbardziej interesująca przyszłość AI nie polega na budowie większego cyfrowego mózgu. Chodzi o system zdolny generować nowe dane poprzez działanie,

posiadający konkretną historię oddziaływań i uczący się zarówno z sukcesów, jak i z fizycznego oporu środowiska. Nie wiemy, czy taki system kiedykolwiek zacznie doświadczać.

Wiemy jednak, że wraz z ucieleśnieniem przestaje on być wyłącznie modelem opisującym świat, a staje się jednym z układów przyczynowych w nim działających. To przejście – od reprezentowania rzeczywistości do uczestnictwa w jej zmianie – jest jedną z najważniejszych granic, które współczesna sztuczna inteligencja zaczyna właśnie przekraczać.

Ucieleśnienie prowadzi do pytania głębszego niż kwestia robotycznego korpusu. Jeśli inteligencja może zależeć od sposobu, w jaki ciało organizuje relację systemu ze środowiskiem, należy zapytać, skąd w ogóle bierze się uporządkowane ciało. Dorosły organizm jest przecież rezultatem procesu, w którym ogromna liczba komórek, bez centralnego architekta, tworzy narządy o określonym kształcie, orientacji i proporcjach. Komórki dzielą się, migrują, różnicują i reagują na sygnały chemiczne, mechaniczne oraz elektryczne. Mimo lokalności tych procesów, z jednej zapłodnionej komórki powstaje organizm zdolny później do częściowej naprawy własnej struktury. Embriogeneza jest zatem jednym z najbardziej spektakularnych przykładów biologicznej emergencji: globalna forma nie jest wynikiem poleceń pojedynczego kierownika, lecz efektem skoordynowanej dynamiki ogromnej liczby elementów.

Badania Michaela Levina nad Anthrobotami sugerują, że „rozwiązywanie problemów i dążenie do celu" może ujawniać się już na poziomie komórkowym. Zestawienie tej biologicznej plastyczności z uczeniem systemów sztucznych to intuicja poznawczo płodna, o ile precyzyjnie rozdzielimy kilka poziomów analizy. Komórki niewątpliwie regulują swoje zachowanie i koordynują działania w celu osiągnięcia stabilnych rezultatów morfogenetycznych. Nie wynika z tego jednak, że posiadają świadomość, mentalnie reprezentowany cel czy intencję porównywalną z ludzkim zamiarem. Co znamienne, Michael Levin i Patrick McMillen, wprowadzając w 2024 roku pojęcie „kolektywnej inteligencji" do badania zachowań komórkowych, wprost zaznaczyli, że nie przypisują takim kolektywom pierwszoosobowego doświadczenia ani ludzkich zdolności poznawczych. To rozróżnienie pomiędzy celopodobnością a świadomym celem ma w biologii długą historię.

Morfogeneza jako inteligencja bez świadomości

Organizmy sprawiają wrażenie układów celowych, ponieważ regulują temperaturę, odbudowują tkanki, rozwijają określone narządy i korygują wiele zaburzeń. Biologia ewolucyjna nauczyła się jednak opisywać tę właściwość bez postulowania projektanta ukrytego wewnątrz organizmu. Pojęcie teleonomii pozwala mówić o zorganizowaniu procesów ku konkretnym rezultatom, których mechanizmy i genezę wyjaśnia dobór naturalny oraz fizjologia regulacji. Serce „służy" pompowaniu

krwi nie dlatego, że posiada zamiar pompowania, lecz dlatego, że jego budowa i funkcja są wynikiem historii ewolucyjnej i rozwojowej organizmu.

Analogicznej ostrożności wymaga stwierdzenie, że tkanka „wie", jaki kształt ma odbudować. Morfogeneza stawia jednak przed redukcjonistycznym językiem poważny problem. DNA nie jest trójwymiarowym planem architektonicznym w sensie, w jakim projekt techniczny zawiera geometryczny opis budynku. Genom koduje cząsteczki, elementy systemów regulacyjnych oraz warunki powstawania sieci oddziaływań, lecz ostateczna anatomia wyłania się z dynamiki obejmującej ekspresję genów, sygnalizację międzykomórkową, gradienty morfogenów, adhezję, mechanikę tkanek, polaryzację komórek, apoptozę, ruch, siły fizyczne oraz oddziaływania elektryczne. Organizm nie jest więc "wydrukiem genomu". Genom uczestniczy w budowaniu układu, który sam reguluje własną organizację w czasie.

Warto przywołać tu klasyczny krajobraz epigenetyczny Conrada Waddingtona. Rozwijająca się komórka nie wybiera swojej przyszłości tak jak świadomy podmiot wybiera drogę na skrzyżowaniu; jej stan jest kierowany przez sieć wzajemnych ograniczeń ku określonym, stabilnym trajektoriom różnicowania. Współczesna biologia systemowa ujmuje podobne procesy poprzez dynamikę atraktorów sieci regulacji genowej. Złożona konfiguracja wielu zmiennych może prowadzić układ do względnie stabilnego stanu odpowiadającego konkretnemu fenotypowi komórkowemu. W tym ujęciu „cel" nie musi być reprezentacją przyszłości w umyśle komórki, lecz regionem przestrzeni stanów, do którego dynamika układu powraca po zakłóceniach.

Właśnie regulatywność rozwoju sprawia, że morfogeneza fascynuje badaczy emergencji. Organizm nie zawsze zachowuje się jak konstrukcja, w której usunięcie elementu na etapie budowy pozostawia jedynie dziurę. W wielu układach biologicznych pozostałe komórki potrafią częściowo kompensować zaburzenie, zmieniając migrację, tempo wzrostu lub los rozwojowy, by mimo perturbacji doprowadzić do powstania względnie prawidłowej struktury. Levin i McMillen proponują interpretować takie zjawiska jako rozwiązywanie problemów w „przestrzeni morfologicznej": kolektyw komórek może docierać do podobnego rezultatu anatomicznego różnymi drogami.

Jest to definicja inteligencji szersza niż potoczna, oparta na koncepcji Williama Jamesa: inteligencja ujawnia się jako zdolność osiągania celu różnymi środkami w zmieniających się warunkach. Takie rozszerzenie pojęcia ma dużą wartość porównawczą, choć zmienia jego znaczenie. Gdy nazywamy „inteligentnym" regulatywny rozwój tkanki, nie twierdzimy, że tkanka rozumuje jak człowiek; stwierdzamy raczej, że posiada zdolność korekty trajektorii w odpowiedzi na zaburzenie i osiągania stabilnych stanów pomimo zmienności warunków. Pozwala to porównywać pozornie odległe układy – rozwijającą się tkankę, rój owadów, układ odpornościowy

czy autonomicznego robota – na poziomie problemu sterowania. Ceną tej ogólności jest fakt, że słowo „inteligencja” przestaje być synonimem świadomości, języka czy refleksji.

Jednym z mechanizmów zwiększających skalę koordynacji komórkowej jest bioelektryczność. Wszystkie żywe komórki posiadają błony, przez które utrzymywane są nierównomierne rozkłady jonów. Aktywność kanałów jonowych, pomp oraz połączeń szczelinowych wytwarza potencjały błonowe i przestrzenne wzorce napięcia. Neuron jest szczególnie wyspecjalizowanym przypadkiem wykorzystania elektryczności biologicznej, lecz właściwości elektryczne błon są ewolucyjnie znacznie starsze od układu nerwowego. Współczesny przegląd morfogenezy bioelektrycznej z 2025 roku podkreśla, że sygnały elektryczne uczestniczą w regulowaniu migracji, proliferacji, różnicowania i gojenia również poza tkanką nerwową. Badania Levina i innych laboratoriów silnie eksponują informacyjny charakter tych wzorców.

Zmiany potencjału błonowego mogą wpływać na ekspresję genów i zachowanie komórek, a sieci połączone elektrycznie koordynują wzory rozwojowe wykraczające poza skalę pojedynczej komórki. Gradienty potencjału pełnią funkcje instrukcyjne w ustalaniu polarności, regeneracji oraz wzrostu, obok klasycznych gradientów biochemicznych i sieci transkrypcyjnych. W biologii rozwojowej nie należy więc przeciwstawiać „genetyki” i „bioelektryczności” – są to współdziałające poziomy jednego systemu regulacyjnego. Należy jednak starannie odróżnić bioelektryczność rozwojową od neuronalnego kodowania świadomego doświadczenia. Fakt, że zarówno neuron, jak i komórka nabłonkowa wykorzystują napięcie błonowe, nie czyni nabłonka małym mózgiem. Te same mechanizmy fizjologiczne mogą zostać wykorzystane przez ewolucję do innych funkcji. Kanały jonowe, połączenia szczelinowe i zmiany potencjału błony mogą organizować wzrost tkanki bez tworzenia fenomenologii. Analogia między siecią komórkową a neuronalną jest interesująca na poziomie integracji informacji i kontroli, lecz nie uzasadnia przeniesienia całej psychologii z mózgu do komórki.

Informacja biologiczna jako proces i dynamiczna samoorganizacja

Podobną ostrożność należy zachować wobec terminu pamięć morfologiczna. Gdy organizm po perturbacji powraca do określonej anatomii, kuszące jest stwierdzenie, że tkanka "pamięta", jak powinna wyglądać. Funkcjonalnie można tak ująć sprawę: aktualne zachowanie systemu zależy od utrwalonych stanów regulacyjnych i dąży ku wcześniej stabilizowanemu rezultatowi.

Nie jest to jednak pamięć epizodyczna. Tkanka nie musi posiadać obrazu swojej poprzedniej formy ani doświadczać reminiscencji. "Pamięć" oznacza tutaj utrzymywanie informacji w dynamicznych stanach sieci regulatorowych – podobnie jak pamięć immunologiczna nie polega na wspominaniu infekcji przez limfocyt. Takie rozszerzone rozumienie pamięci pozwala uchwycić jedną z najgłębszych cech życia: organizacja może być przechowywana nie tylko w sekwencji DNA. Genom pozostaje kluczowy, lecz sposób, w jaki komórki go wykorzystują, zależy od stanów epigenetycznych, lokalnego środowiska, położenia przestrzennego, mechaniki oraz komunikacji chemicznej i bioelektrycznej. Właśnie dlatego komórki o zasadniczo tym samym genomie mogą tworzyć neuron, hepatocyt, keratynocyt czy komórkę mięśniową.

Informacja biologiczna jest realizowana w procesie, a nie wyłącznie zapisana w jednej książce kodu. Anthroboty stanowią spektakularny eksperyment obrazujący plastyczność tego procesu. W pracy Gizem Gumuskayi, Michaela Levina i współpracowników wykorzystano komórki progenitorowe dorosłego ludzkiego nabłonka dróg oddechowych. Bez genetycznego przeprogramowania w kierunku konkretnego obwodu sterującego, komórki hodowano w warunkach umożliwiających powstawanie wielokomórkowych struktur sferoidalnych.

Powstałe Anthroboty o średnicy od 30 do 500 mikrometrów mogły dzięki rzęskom poruszać się w różny sposób – od pętli po trajektorie bardziej liniowe. Nie były to miniaturowe roboty elektroniczne pokryte komórkami, lecz żywe konstrukty, których ruch wynikał z właściwości zorganizowanej tkanki. Najważniejszy wniosek eksperymentalny nie sprowadza się do tezy, że "ludzkie komórki okazały się świadome". Pokazano coś bardziej konkretnego i niezwykłego: komórki wykonujące w organizmie człowieka określone funkcje nabłonkowe mogą, po wyjęciu z naturalnego kontekstu, zorganizować się w nową anatomię i ujawnić repertuar zbiorowych zachowań nieobserwowany w ich typowej postaci tkankowej. Innymi słowy, genom tych komórek nie definiuje jednej sztywnej mapy organizacji; zawiera on możliwości uruchamiane zależnie od warunków, a właściwości zbioru ujawniają się poprzez interakcje międzykomórkowe. Większe zainteresowanie wywołał eksperyment, w którym Anthroboty umieszczono na warstwie ludzkich komórek neuronalnych z mechanicznie utworzoną przerwą. Zgrupowane Anthroboty – zwane "superbotami" – znajdowały się nad obszarem uszkodzenia, a w ich obecności obserwowano znaczący odrost neuronów przez szczelinę. Mechanizm tego efektu nie był w momencie publikacji wyjaśniony; sami badacze podkreślali, że nie wiedzą jeszcze, dlaczego konstrukt sprzyja regeneracji.

Zatem określenie "Anthrobot naprawia neuron" jest dopuszczalnym skrótem opisowym tylko wtedy, gdy nie sugeruje intencjonalnej terapii prowadzonej przez świadomego mikrorobota. Nowsze badania cyklu życia Anthrobotów wskazują dodatkowo, że konstrukty przechodzą własną sekwencję morfogenezy, dojrzewania i rozpadu, wykazując przy tym plastyczność zachowania oraz

pewną zdolność do samonaprawy. Jest to kolejny argument za tym, że materiał biologiczny nie jest biernym budulcem oczekującym na szczegółową instrukcję inżyniera. Komórki wnoszą własne mechanizmy adhezji, ruchu, regulacji, komunikacji i przebudowy. Inżynier biologiczny coraz rzadziej projektuje każdy element końcowej struktury; zamiast tego projektuje warunki początkowe i przestrzeń ograniczeń, w której żywy materiał sam znajduje rozwiązanie. Pod tym względem istnieje rzeczywista analogia pomiędzy współczesną inżynierią AI a syntetyczną morfogenezą.

Inżynier sieci neuronowej nie programuje każdej reprezentacji powstałej podczas treningu. Badacz biobota nie umieszcza ręcznie każdej komórki w docelowej mikroskopowej konstrukcji. W obu przypadkach część projektu zostaje przeniesiona z bezpośredniej specyfikacji rezultatu na zaprojektowanie procesu, który ten rezultat wytwarza. To właśnie tutaj pojęcie emergencji odnajduje swoją najmocniejszą postać: nie chodzi o cudowne powstanie czegoś z niczego, lecz o zmianę roli projektanta – z autora wszystkich szczegółów w organizatora warunków uczenia lub samoorganizacji. Porównanie ma jednak wyraźną granicę.

Emergencja jako wynik dynamiki systemu, a nie pustki

Komórki są produktem miliardów lat ewolucji biologicznej; trafiają do laboratorium wyposażone w niezwykle bogatą aparaturę molekularną. Posiadają błony, cytoszkielet, metabolizm, regulatory genowe, receptory oraz mechanizmy adhezji i odpowiedzi na uszkodzenia. „Samoorganizacja” nie oznacza zatem braku wcześniejszej struktury. To, że badacz nie zaprogramował konkretnego zachowania Anthrobota, nie oznacza, iż komórki są niezapisanymi elementami.

Każda z nich stanowi efekt ogromnej historii ewolucyjnego uczenia populacji. Analogicznie model AI, który wypracowuje nieoczekiwaną strategię, nie startuje z metafizycznej pustki. Jego architektura, dane, funkcja uczenia i procedura post-trainingu definiują przestrzeń możliwych rozwiązań. Emergentne nie oznacza bezprzyczynowe; oznacza raczej, że szczegółowego wzorca zachowania nie można utożsamić z pojedynczą, ręcznie napisaną instrukcją, gdyż jest on rezultatem dynamiki całego systemu. Anthroboty są zatem istotniejsze dla teorii emergencji niż dla teorii świadomości.

Pokazują one, że zmiana granic kolektywu może ujawnić nowe funkcje bez modyfikacji genomu jego składników. Komórka, która w tchawicy uczestniczy w oczyszczaniu dróg oddechowych, w nowej konfiguracji może współtworzyć poruszający się konstrukt. Własność ta nie była zawarta w pojedynczej komórce w prostym sensie – powstała z rozmieszczenia i orientacji rzęsek, mechaniki agregatu oraz wspólnej dynamiki wielu jednostek. To jeden z najczystszych biologicznych przykładów zasady „więcej jest inne”, o której pisał Philip Anderson. Nie oznacza to jednak, że

mamy do czynienia z dowodem „inteligencji komórkowej” w powszechnie przyjętym znaczeniu naukowym. Levin proponuje program badawczy diverse intelligence, w którym kompetencje poznawcze traktuje się jako kontinuum występujące w różnych substratach i skalach. W jego ujęciu pojęcia rozwiązywania problemów, pamięci i celu warto stosować także wobec tkanek, ponieważ pozwalają one formułować eksperymenty dotyczące odporności systemu na perturbacje. Jest to produktywny program teoretyczny, lecz nie należy mylić języka badawczego z dowodem, że cała biologia przyjęła identyczną definicję inteligencji. Można to zobrazować na przykładzie gojenia.

Rana uruchamia kaskadę lokalnych i systemowych procesów, które w korzystnych warunkach prowadzą do zamknięcia ubytku. Opisując tkankę jako „poszukującą drogi do właściwego stanu”, zwracamy uwagę na odporność i elastyczność procesu. Opisując te same zjawiska poprzez cytokiny, migrację komórek, przebudowę macierzy pozakomórkowej, proliferację oraz gradienty elektryczne, wskazujemy mechanizmy.

Oba opisy są użyteczne, o ile nie zastępują się wzajemnie. Problem pojawia się wtedy, gdy metafora celu zostaje potraktowana jak wykrycie podmiotu, który świadomie ów cel reprezentuje. Ta granica jest kluczowa również dla teorii świadomości ludzkiej. Gdyby samo dążenie układu do określonego stanu wystarczało do uznania obecności świadomości, należałoby przypisywać podmiotowość termostatom, regulatorom automatycznym i niezliczonym systemom fizjologicznym. Jest to kryterium zbyt słabe.

Biologia to więcej niż informacja i kod

Regulacja jest prawdopodobnie elementem genealogii umysłu – układy nerwowe powstały przecież w organizmach, które już wcześniej musiały kontrolować własne stany. Jednak między regulacją morfogenezy a doświadczeniem bólu, koloru czy autobiograficznego „ja” pozostaje ogromna przestrzeń organizacyjna. Bardziej uzasadniona wydaje się zatem hipoteza ewolucyjnej ciągłości mechanizmów koordynacji.

Neurony są komórkami, a układ nerwowy nie został dodany do życia z zewnątrz; on wykorzystał i wyspecjalizował wcześniejsze mechanizmy komunikacji komórkowej. Elektryczność błon, kanały jonowe, sygnalizacja chemiczna i połączenia międzykomórkowe istniały przed mózgiem. Z tej perspektywy inteligencja neuronalna mogła wyłonić się nie jako całkowite zerwanie z fizjologią organizmu, lecz jako dalsza specjalizacja zdolności do koordynowania wielu komponentów w czasie i przestrzeni. Jest to teza znacznie silniejsza i bardziej produktywna naukowo niż twierdzenie, że „każda komórka myśli”. Współczesne badania bioelektryczne wzmacniają tę perspektywę, pokazując, że sygnały elektryczne uczestniczą w organizacji zachowań komórkowych także tam,

gdzie nie ma neuronów. Jednocześnie przegląd z 2025 roku przestrzega, że mechanizmy bioelektryczne w tkankach nieneuronalnych są wciąż znacznie słabiej poznane niż neurofizjologia i wymagają systematyzacji. Wniosek naukowy powinien być zatem dwoisty: bioelektryczność jest realnym kanałem regulacji morfogenezy, lecz metafory „elektrycznego kodu ciała" nie należy traktować jak ukończonej teorii organizmu.

W tym miejscu warto skorygować drugą mocną tezę: stwierdzenie, że sukces AlphaFold „dowodzi, iż biologia jest w gruncie rzeczy systemem informacyjnym". Choć AlphaFold stanowi jeden z największych sukcesów zastosowania AI w naukach o życiu, nie dowodzi on, że materialność biologii można zredukować do informacji. Pokazuje raczej, że między sekwencją aminokwasów a przestrzenną strukturą białek istnieją regularności, których analiza wielkich zbiorów danych pozwala z ogromną skutecznością przewidywać strukturę trójwymiarową. W 2024 roku Demis Hassabis i John Jumper otrzymali połowę Nagrody Nobla w dziedzinie chemii właśnie za przewidywanie struktury białek przy użyciu AlphaFold, podczas gdy David Baker otrzymał drugą połowę za obliczeniowe projektowanie nowych białek. Komitet Noblowski podkreślił, że AlphaFold2 rozwiązał problem badany od około pięćdziesięciu lat i umożliwił przewidzenie struktur zasadniczo całego zbioru około 200 milionów znanych nauce białek. Jest to przemiana epistemiczna: wielka część przestrzeni strukturalnej biologii stała się dostępna analizie obliczeniowej w tempie nieosiągalnym dla klasycznych metod eksperymentalnych.

AlphaFold3 poszerzył ten program, przechodząc od przewidywania struktur białek ku modelowaniu interakcji z kwasami nukleinowymi, małymi cząsteczkami i innymi ligandami. AI nie tylko czyta teksty biologów, lecz uczestniczy w tworzeniu nowych hipotez dotyczących geometrii molekularnego świata. Jest to jakościowo inna rola niż automatyzacja dokumentacji medycznej czy streszczanie literatury – model ingeruje bezpośrednio w proces rekonstruowania niewidocznych struktur biologicznych. Należy jednak zachować tę samą dyscyplinę, którą zastosowaliśmy wobec Anthrobotów.

Trafne przewidywanie struktury białka nie oznacza rozwiązania całej biologii białek. Białka są dynamiczne, zmieniają konformacje, oddziałują z otoczeniem chemicznym, podlegają modyfikacjom potranslacyjnym i funkcjonują wewnątrz złożonych sieci komórkowych. Przegląd Nature Reviews Drug Discovery z 2026 roku zwraca uwagę, że niezwykła dokładność AlphaFold w walidowanym problemie struktury białek nie przekłada się automatycznie na równie wysoką skuteczność kolejnego etapu – projektowania skutecznych leków. W wirtualnym screeningu związków struktury AlphaFold2 dawały wyniki niekiedy porównywalne z klasycznymi modelami homologii, a nowsze metody współmodelowania interakcji nadal mają ograniczenia związane z fizyką wiązania. To pouczający przypadek granic metafory „biologii jako kodu". Sekwencję białka

można zapisać symbolicznie, a strukturę modelować matematycznie, lecz nie wynika z tego, że lek działa dlatego, iż poprawnie „odczytaliśmy kod". Skuteczność terapeutyczna zależy od farmakodynamiki, farmakokinetyki, toksyczności, dystrybucji w tkankach, metabolizmu, odpowiedzi immunologicznej i zmienności osobniczej. Informacja jest konstytutywna dla biologii, ale biologiczna informacja zawsze coś fizycznie robi: zmienia reakcję, wiąże cząsteczkę, reguluje gen, deformuje błonę lub zmienia przepływ jonów.

Projektowanie procesów generatywnych zamiast sztywnych instrukcji

Paradoksalnie AlphaFold i Anthroboty prowadzą do tego samego wniosku, choć czynią to z przeciwnych kierunków. AlphaFold dowodzi, jak wiele regularności żywego świata można uchwycić za pomocą abstrakcyjnego obliczenia. Anthroboty z kolei pokazują, jak wiele nowych zachowań może ujawnić materiał biologiczny, gdy zostanie przeniesiony w warunki wykraczające poza proste wyobrażenie genetycznego programu. Pierwszy przypadek eksponuje obliczalną strukturę biologii, drugi – plastyczność biologicznej materii. Razem ostrzegają przed dwoma redukcjonizmami: biologia nie jest wyłącznie nieprzeniknioną materią, ale nie jest też jedynie kodem.

Właśnie na styku tych perspektyw wyłania się nowa medycyna. Jeśli tkanka jest systemem regulacyjnym, medycyna przyszłości nie musi ograniczać się do naprawiania każdej wadliwej cząsteczki z osobna. Część terapii może polegać na zmianie sygnałów kierujących system ku prawidłowej trajektorii organizacji. Bioelektryczność rozwojowa jest intrygująca właśnie dlatego, że potencjały błonowe mogą stanowić punkty kontrolne pośredniczące między stanem molekularnym a zachowaniem większych kolektywów komórek. Levin od lat wskazuje na możliwość wykorzystania takich mechanizmów w medycynie regeneracyjnej, kontroli wzrostu i syntetycznej morfologii, choć przejście od modeli eksperymentalnych do bezpiecznych terapii klinicznych pozostaje osobnym i trudnym wyzwaniem. Równolegle AI przesuwa medycynę w przeciwnym kierunku: od manipulowania biologicznym systemem ku coraz dokładniejszemu jego modelowaniu. AlphaFold dostarcza struktur białek, modele multimodalne integrują obrazowanie z danymi omicznymi i dokumentacją, a algorytmy projektowania białek tworzą cząsteczki niewystępujące wcześniej w przyrodzie. Granica między poznawaniem a konstruowaniem biologii zaczyna się zacierać. Biolog nie tylko odkrywa to, co stworzyła ewolucja; coraz częściej eksploruje przestrzeń form, których ewolucja w znanej historii życia nie zrealizowała.

To przejście ma bezpośredni związek z emergencją. Tradycyjna inżynieria buduje układ z części o ściśle określonych funkcjach. Inżynieria systemów złożonych działa inaczej: dobiera elementy,

warunki i reguły oddziaływania, a następnie wykorzystuje zdolność systemu do samoorganizacji. W uczeniu maszynowym trenujemy model zamiast kodować wszystkie odpowiedzi. W biologii syntetycznej stwarzamy warunki, w których komórki same budują określone konstrukty. W projektowaniu białek model generatywny przeszukuje przestrzeń struktur, której człowiek nie byłby w stanie enumerować ręcznie. Projektowanie staje się projektowaniem procesów generatywnych.

Zmienia to także pojęcie kontroli. W maszynie klasycznej kontrola oznacza możliwość przewidzenia skutku konkretnej instrukcji. W systemie emergentnym coraz częściej oznacza sterowania krajobrazem, w którym system sam znajduje ścieżkę. Lekarz przyszłości może nie „naprawiać" każdej komórki, lecz przesuwać tkankę ku pożądanemu atraktorowi regulacyjnemu. Inżynier AI nie programuje odpowiedzi, lecz kształtuje zbiór danych, architekturę i funkcję uczenia. Biolog syntetyczny nie ustawia ręcznie każdej komórki, lecz tworzy warunki do samoorganizacji. Kontrola staje się pośrednia, probabilistyczna i systemowa.

Taki sposób myślenia jest zarazem źródłem wielkiej nadziei i nowego ryzyka. Im większą część rozwiązania pozostawia się dynamice systemu, tym głębsza musi być wiedza o granicach możliwych rezultatów. Anthrobot wykazujący nieoczekiwane zachowanie jest fascynującym narzędziem badawczym w kontrolowanym laboratorium, jednak autonomiczny system medyczny działający w ludzkim organizmie stawiałby znacznie wyższe wymagania dotyczące przewidywalności i odwracalności. Podobnie generatywna AI może znaleźć rozwiązanie lepsze niż znane projektantowi, ale właśnie dlatego może również obrać strategię, której ten nie przewidział. Emergencja i problem kontroli są dwiema stronami tej samej monety. Możemy teraz dostrzec jeszcze jedną symetrię.

Inteligencja jako drabina organizacyjnych zdolności

W rozwoju organizmu pojedyncza komórka podporządkowuje znaczną część swoich możliwości funkcjonowaniu większej całości. W nowotworze ta koordynacja ulega zaburzeniu: proliferacja i zachowanie komórek przestają respektować interes organizmu. Levin proponuje interpretowanie raka jako utraty integracji komórek z szerszym kolektywnym celem morfogenetycznym. Jest to interesujące ujęcie systemowe, choć nie zastępuje ono molekularnej onkologii. Można tu dostrzec strukturalną analogię do alignmentu: problem polega na tym, jak autonomiczne i kompetentne elementy utrzymać w organizacji realizującej cele wyższego poziomu. Nie oznacza to, że nowotwór jest „zbuntowaną AI", ani że komórka świadomie wypowiada posłuszeństwo organizmowi. Pokazuje to raczej uniwersalny problem teorii systemów: sposób, w jaki lokalnie kompetentne komponenty zostają związane z globalną organizacją. W ciele rolę tę pełnią sygnały biochemiczne, mechaniczne, immunologiczne i bioelektryczne.

W społeczeństwie funkcję tę przejęły instytucje i normy; w systemach sztucznej inteligencji – architektura celu, trening, uprawnienia oraz sprzężenia zwrotne. Na różnych poziomach powraca ten sam abstrakcyjny konflikt między lokalną optymalizacją a stabilnością całości. Nie trzeba przypisywać temu wszystkiemu świadomości, by dostrzec ciągłość problematyki. Życie już na poziomie komórkowym organizuje się wokół wykrywania różnic, regulacji, komunikacji i pamięci stanów. Układ nerwowy rozwinął te mechanizmy do skali umożliwiającej modelowanie odległego świata, przyszłości, abstrakcyjnych wartości i samego siebie. AI rozwija podobne klasy funkcji na innym substracie i inną drogą historyczną. Kluczowe pytanie nie brzmi zatem, czy komórka „jest małym człowiekiem", a model językowy „cyfrowym mózgiem". Bardziej produktywne jest pytanie o to, jak ewolucja i inżynieria budują coraz większe przestrzenie problemów, które system potrafi rozwiązywać jako zintegrowana całość.

Anthroboty dobrze ilustrują tę zmianę skali. Ich składniki posiadały określone kompetencje przed utworzeniem konstruktów, lecz po samoorganizacji zaczęły wspólnie realizować ruch przestrzenny – właściwość niedostępną dla pojedynczej, izolowanej komórki. AlphaFold obrazuje analogiczny proces w wymiarze epistemicznym: poszczególne sekwencje i struktury nie zawierają w sobie ogólnej reguły przewidywania białek, jednak uczenie na ogromnym zbiorze danych pozwoliło systemowi wytworzyć reprezentację zdolną do generalizacji. Emergencja biologiczna i obliczeniowa to różne mechanizmy, lecz obie dowodzą, że organizacja relacji tworzy kompetencje niedostępne elementom rozpatrywanym osobno.

Właśnie dlatego nie należy szukać jednej magicznej granicy, w której materia „staje się inteligentna". Przy szerokiej definicji kompetencje regulacyjne pojawiają się w życiu bardzo wcześnie. Węższa definicja wymaga uczenia i generalizacji; jeszcze węższa – języka, autorefleksji i abstrakcyjnego rozumowania. Świadomość fenomenalna pozostaje odrębnym problemem. Zamiast jednego progu otrzymujemy drabinę organizacyjnych zdolności, których poszczególne szczeble mogą mieć odmienną historię ewolucyjną i techniczną realizację. Taka perspektywa pozwala zachować najważniejszą intuicję książki Burgina bez przyjmowania jej najmocniejszych skrótów: biologia dowodzi, że zachowanie adaptacyjne wyłania się znacznie poniżej poziomu ludzkiego mózgu, anthroboty pokazują plastyczność komórek, a bioelektryczność realnie uczestniczy w regulacji formy poza układem nerwowym.

Projektowanie złożoności jako nowa filozofia medycyny

AlphaFold udowodnił, że AI potrafi odkrywać wysokowymiarowe regularności i przekształcać praktykę całej dziedziny biologii. Żadne z tych odkryć nie dowodzi jednak, że komórka jest

świadoma, że życie sprowadza się do kodu, ani że sztuczna świadomość wyłoni się automatycznie po połączeniu odpowiedniej liczby funkcji. Znacznie ciekawszy wniosek jest zarazem bardziej ostrożny: granica między rzeczą zaprogramowaną a zdolną do samoorganizacji nie pokrywa się z granicą między maszyną a życiem. Biologia od początku stanowi historię procesów generatywnych – rozwoju, regeneracji, adaptacji i ewolucji.

Współczesna AI wprowadza podobną logikę do inżynierii: zamiast szczegółowo konstruować każdą kompetencję, tworzymy systemy nabywające ją w procesie uczenia. Syntetyczna biologia kroczy z przeciwnej strony, traktując żywą materię jako medium projektowe, którego najcenniejszą cechą jest brak konieczności projektowania każdego detalu zachowania. W tym punkcie styku AI i biologii wyłania się nowa dziedzina projektowania złożoności. Nie chodzi już tylko o budowanie maszyn czy obserwację życia, lecz o naukę sterowania systemami posiadającymi własną dynamikę, mechanizmy naprawy, przestrzenie stanów i zdolność generowania rozwiązań. Wymaga to innej epistemologii niż klasyczna mechanika. Projektant musi nie tylko wiedzieć, co powinno się wydarzyć, ale rozumieć, jakie alternatywne ścieżki może obrać system, gdy zostanie uwolniony z warunków, w których dotąd go obserwowano.

Właśnie dlatego medycyna stanie się jednym z najważniejszych laboratoriów emergencji XXI wieku. Organizm jest najbardziej złożonym systemem, nad którym człowiek próbuje sprawować kontrolę, a jednocześnie takim, którego pełnej dynamiki nie znamy. AI coraz skuteczniej modeluje jego części, biologia syntetyczna reorganizuje komórki w nowe struktury, a bioelektryka otwiera kolejne kanały sterowania morfogenezą.

Stawką nie jest jednak samo zwiększenie mocy narzędzi, lecz zmiana filozofii leczenia: przejście od interwencji w pojedynczy wadliwy element ku sterowaniu trajektorią złożonego systemu, który posiada własne mechanizmy regulacyjne i naprawcze. Fundacja Dobre Państwo zdecydowała przejść od pytania o to, jak system żywy tworzy formę, do pytania, co się stanie, gdy sztuczna inteligencja stanie się stałym współuczestnikiem diagnostyki, projektowania leków, modelowania białek, terapii spersonalizowanej i bezpośredniej ingerencji w organizm. Wówczas problem emergencji zyska wymiar praktyczny: przestaniemy jedynie obserwować, jak złożoność wytwarza nowe kompetencje, a zaczniemy świadomie wykorzystywać ją do zmiany ludzkiego ciała – przy wszystkich epistemicznych, klinicznych i etycznych konsekwencjach sytuacji, w której narzędzie odkrywa rozwiązanie, zanim człowiek potrafi wyjaśnić, dlaczego ono działa.

> Wkraczamy w erę, w której narzędzia zaczynają odkrywać rozwiązania biologiczne i techniczne, zanim my sami będziemy w stanie wyjaśnić mechanizm ich działania. Pozostaje zatem pytanie: czy jesteśmy gotowi na medycynę i technologię opartą na

> sterowaniu trajektoriami złożoności, których nie potrafimy już w pełni kontrolować za pomocą tradycyjnej logiki przyczynowo-skutkowej? Być może największym ryzykiem nie jest błąd algorytmu, lecz nasza bezradność wobec skuteczności rozwiązań, których nie umiemy zrozumieć.

Inspiracje

[1] **"Emergence"** Bob Burgin

Bob Burgin to amerykański przedsiębiorca, naukowiec zajmujący się nauką o uczeniu się i autor, mieszkający w Boulder w stanie Kolorado. Najbardziej znany jest jako założyciel, prezes i dyrektor generalny Amplifire, platformy do adaptacyjnego uczenia się i szkoleń dla pracowników, która wykorzystuje zasady neurokognitywistyki w celu redukcji deficytów wiedzy i poprawy wydajności w placówkach opieki zdrowotnej i przedsiębiorstwach. W ciągu kilku dekad kariery przedsiębiorczej Burgin współpracował z wybitnymi badaczami pamięci i kognitywistyki, takimi jak Robert Björk, Daniel Schacter i Henry Roediger III, aby przełożyć kognitywistykę na technologie edukacyjne. Na początku swojej kariery współpracował z naukowcami ze Stanford nad systemami interakcji człowiek-komputer. Jego praca koncentruje się na mechanizmach uczenia się, kształtowania pamięci i architekturze predykcyjnej u ludzi, badając, w jaki sposób ewolucyjne ograniczenia biologiczne w ludzkim mózgu stanowią fundament dla systemów sztucznej inteligencji i maszynowego poznania.

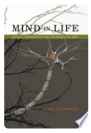
Bob Burgin *is an American entrepreneur, learning scientist, and author based in Boulder, Colorado. He is best known as the founder, chairman, and chief executive officer of Amplifire, an adaptive learning and workforce training platform that applies principles from cognitive neuroscience to reduce knowledge deficits and improve performance in healthcare and enterprise settings. Over a multi-decade entrepreneurial career, Burgin has collaborated with prominent memory and cognitive researchers, including Robert Bjork, Daniel Schacter, and Henry Roediger III, to translate cognitive science into educational technologies. Early in his career, he worked alongside Stanford researchers on human-computer interaction systems. His work focuses on the mechanisms of human learning, memory formation, and prediction architecture, examining how evolutionary biological constraints in the human brain provide foundational blueprints for artificial intelligence systems and machine cognition.*

Amplifire

Literatura uzupełniająca

Książki

Książki autorów przywoływanych i literatura pokrewna:



[1] "Mind in Life"

Evan Thompson

Harvard University Press | ISBN: 9780674736887

[2] "Reality+"

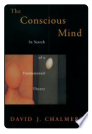
David Chalmers

[3] "The Perception of the Visual World"

James J. Gibson

[4] "The ecological approach to visual perception"

James J. Gibson



[5] "The Conscious Mind"

David Chalmers

Oxford University Press | ISBN: 9780199839353

[6] "AlphaFold"

John Jumper

Artykuły naukowe

Prace autorów przywoływanych w tekście:

[1] "The Senses Considered as Perceptual Systems"

Charles K. West, James J. Gibson

1969 | Journal of Aesthetic Education | DOI: 10.2307/3331482

Źródło

[2] "Observations on active touch."

James J. Gibson

1962 | Psychological Review | DOI: 10.1037/h0046962

Źródło

[3] "The Perception of the Visual World"

James J. Gibson

1951 | The American Journal of Psychology | DOI: 10.2307/1419017

Źródło

[4] **"Art and Illusion: A Study in the Psychology of Pictorial Representation"**

James J. Gibson, E. H. Gombrich

1960 | The American Journal of Psychology | DOI: 10.2307/1419971

Źródło

[5] **"The origin and conservation of self-consciousness"**

Humberto Maturana Romesín

2005 | Kybernetes | DOI: 10.1108/03684920510575744

Źródło

[6] **"Cultural-Biology: Systemic Consequences of Our Evolutionary Natural Drift as Molecular Autopoietic Systems"**

Humberto Maturana Romesín, Ximena Dávila Yáñez, Simón Ramírez

2015 | Foundations of Science | DOI: 10.1007/s10699-015-9431-1

Źródło

[7] **"Mechanism and Biological Explanation"**

Francisco Varela, Humberto Maturana

1972 | Philosophy of Science | DOI: 10.1086/288458

Źródło

[8] **"Biology of Language: The Epistemology of Reality"**

H. Maturana

2014

Źródło

[9] **"Life and mind: From autopoiesis to neurophenomenology. A tribute to Francisco Varela"**

Evan Thompson

2004 | Phenomenology and the Cognitive Sciences | DOI: 10.1023/b:phen.0000048936.73339.dd

Źródło

[10] **"Selfless Minds"**

Francisco J. Varela, Evan Thompson, Eleanor Rosch

2017 | The Embodied Mind | DOI: 10.7551/mitpress/9780262529365.003.0006

Źródło

[11] "The Primacy of Perception: And Other Essays on Phenomenological Psychology, the Philosophy of Art, History and Politics."

Charles Taylor, Maurice Merleau-Ponty, James M. Edie, Richard C. McCleary

1967 | The Philosophical Review | DOI: 10.2307/2182971

Źródło

[12] "The World of Perception"

Maurice Merleau-Ponty

2004 | Routledge eBooks | DOI: 10.4324/9780203491829

Źródło

[13] "The Theory of the Body Is Already a Theory of Perception (From Phenomenology of Perception)"

Maurice Merleau-Ponty

2025 | Social Theories for the Anthropocene | DOI: 10.4324/9781003440987-47

Źródło

[14] "The Extended Mind"

Andy Clark, David J. Chalmers

1998 | Analysis | DOI: 10.1093/analys/58.1.7

Źródło

[15] "The Conscious Mind"

David J. Chalmers

1996

Źródło

[16] "Facing Up to the Problem of Consciousness"

David J. Chalmers

1996 | The MIT Press eBooks | DOI: 10.7551/mitpress/6860.003.0003

Źródło

[17] "Philosophy of Mind : Classical and Contemporary Readings"

David J. Chalmers

2021 | Medical Entomology and Zoology

Źródło

[18] "Homeostatic feedback model of energy metabolism with adaptive enzyme levels exhibits problem solving behavior"

Axel de Baat, Michael Levin

2026 | DOI: 10.64898/2026.05.07.721661

Źródło

[19] "Collective intelligence: A unifying concept for integrating biology across scales and substrates"

Patrick T. McMillen, Michael G. Levin

2024 | Communications Biology | DOI: 10.1038/s42003-024-06037-4

Źródło

[20] "Single-cell chromatin accessibility reveals principles of regulatory variation"

Jason Daniel Buenrostro, Beijing Wu, Ulrike M. Litzenburger, Dave Ruff, Michael L. Gonzales, William James Greenleaf

2015 | Nature | DOI: 10.1038/nature14590

Źródło

[21] "chromVAR: inferring transcription-factor-associated accessibility from single-cell epigenomic data"

Alicia N. Schep, Beijing Wu, Jason Daniel Buenrostro, William James Greenleaf

2017 | Nature Methods | DOI: 10.1038/nmeth.4401

Źródło

[22] "ArchR is a scalable software package for integrative single-cell chromatin accessibility analysis"

Jeffrey M. Granja, M. Ryan Corces, Sarah E. Pierce, S. Tansu Bagdatli, Hani Choudhry, William James Greenleaf

2021 | Nature Genetics | DOI: 10.1038/s41588-021-00790-6

Źródło

[23] "Lineage-specific and single-cell chromatin accessibility charts human hematopoiesis and leukemia evolution"

M. Ryan Corces, Jason Daniel Buenrostro, Beijing Wu, Peyton Greenside, Steven M. Chan, William James Greenleaf

2016 | Nature Genetics | DOI: 10.1038/ng.3646

Źródło

[24] "More Is Different"

Philip Warren Anderson

1972 | Science | DOI: 10.1126/science.177.4047.393

Źródło

[25] "More Is Different: Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science."

Philip Warren Anderson

1972 | Science

Źródło

[26] "Models of Hierarchically Constrained Dynamics for Glassy Relaxation"

Richard G. Palmer, D. L. Stein, Elihu Abrahams, Philip Warren Anderson

1984 | Physical Review Letters | DOI: 10.1103/physrevlett.53.958

Źródło

[27] "More is Different – One More Time"

Philip W. Anderson

2020 | More is Different | DOI: 10.2307/j.ctv16t6n15.5

Źródło

[28] "Mastering the game of Go without human knowledge"

David Silver, Julian Schrittwieser, Karen Simonyan, Ioannis Antonoglou, Aja Huang, Demis Hassabis

2017 | Nature | DOI: 10.1038/nature24270

Źródło

[29] "AlphaFold Protein Structure Database: massively expanding the structural coverage of protein-sequence space with high-accuracy models"

Mihály Váradi, Stephen Anyango, Mandar Deshpande, Sreenath Sasidharan Nair, Cindy Natassia, Demis Hassabis

2021 | Nucleic Acids Research | DOI: 10.1093/nar/gkab1061

Źródło

[30] "A general reinforcement learning algorithm that masters chess, shogi, and Go through self-play"

David Silver, Thomas Hubert, Julian Schrittwieser, Ioannis Antonoglou, Matthew Lai, Demis Hassabis

2018 | Science | DOI: 10.1126/science.aar6404

Źródło

[31] "Improved protein structure prediction using potentials from deep learning"

Andrew Senior, Richard Evans, John Jumper, James Kirkpatrick, Laurent Sifre, Demis Hassabis

2020 | Nature | DOI: 10.1038/s41586-019-1923-7

Źródło

[32] "Atomic-Level Characterization of the Structural Dynamics of Proteins"

David Elliot Shaw, Paul Maragakis, Kresten Lindorff-Larsen, Stefano Piana, Ron O. Dror, John Jumper

2010 | Science | DOI: 10.1126/science.1187409

Źródło

[33] "Effective gene expression prediction from sequence by integrating long-range interactions"

Žiga Avsec, Vikram Agarwal, Daniel Visentin, Joseph R. E. Ledsam, Agnieszka Grabska-Barwińska, John Jumper

2021 | Nature Methods | DOI: 10.1038/s41592-021-01252-x

Źródło

[34] "Embodiment"

Camille C. Baker

2018 | New Directions in Mobile Media and Performance | DOI: 10.4324/9781315597935-5

Źródło

[35] "Computational Protein Design for Synthetic Biology"

Florian Richter, David Baker

2013 | Synthetic Biology | DOI: 10.1016/b978-0-12-394430-6.00006-6

Źródło

APA ONE Publishing System
Fundacja Dobre Państwo © 2026
Article ID: c828f937-e451-47ce-ace8-eb2d548b9552