The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

O musculiță poate pierde mirosul și totuși se poate întoarce. Într-un panaș virtual, a ajutat-o o direcție reținută

Musculițele de oțet fixate au revenit în mod repetat la o limită odorantă după ce au intrat în aer curat. Comportamentul, modelarea și perturbările neurale susțin o memorie compactă a direcției, nu o hartă completă. Rezultatul provine dintr-un test controlat de realitate virtuală și nu arată încă aceeași strategie în zbor natural liber.

Written by Matteo · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Matteo, Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *A vector-based strategy for olfactory navigation in Drosophila*, Andrew F. Siliciano, Sun Minni, Chad Morton, Charles K. Dowell, Noelle B. Eghbali, Silas E. Busch, Juliana Y. Rhee, L. F. Abbott and Vanessa Ruta, Nature (2026) · DOI: 10.1038/s41586-026-10827-7

O musculiță poate pierde mirosul și totuși se poate întoarce spre el

Musculița lăsase mirosul în urmă.

A continuat să meargă prin aer curat, uneori timp de zeci de secunde și sute de milimetri virtuali. Apoi s-a întors spre limita pe care o traversase și a regăsit mirosul. În acel moment, mirosul însuși nu îi mai putea indica drumul înapoi.

Aceasta este observația centrală a unui nou studiu din Nature despre navigația musculițelor de oțet. Cercetătorii susțin că musculițele au folosit o memorie compactă a direcției: nu o hartă a întregului panaș odorant și nici memoria distanței parcurse, ci orientarea reținută către o limită care nu mai putea fi detectată.

Rezultatul este remarcabil deoarece arată cât de puțină informație stocată poate fi suficientă. Dar este și ușor de exagerat. Aceste musculițe nu au zburat liber printr-un peisaj natural. Au mers, fiind fixate deasupra unei bile susținute de aer, într-o lume virtuală strict controlată. Studiul susține o strategie bazată pe vectori în acel aparat; nu arată că musculițele construiesc hărți mentale, nu explică toate modurile în care animalele urmăresc mirosurile și nu identifică celulele în care memoria este stocată fizic.

Coridorul invizibil era creat de software

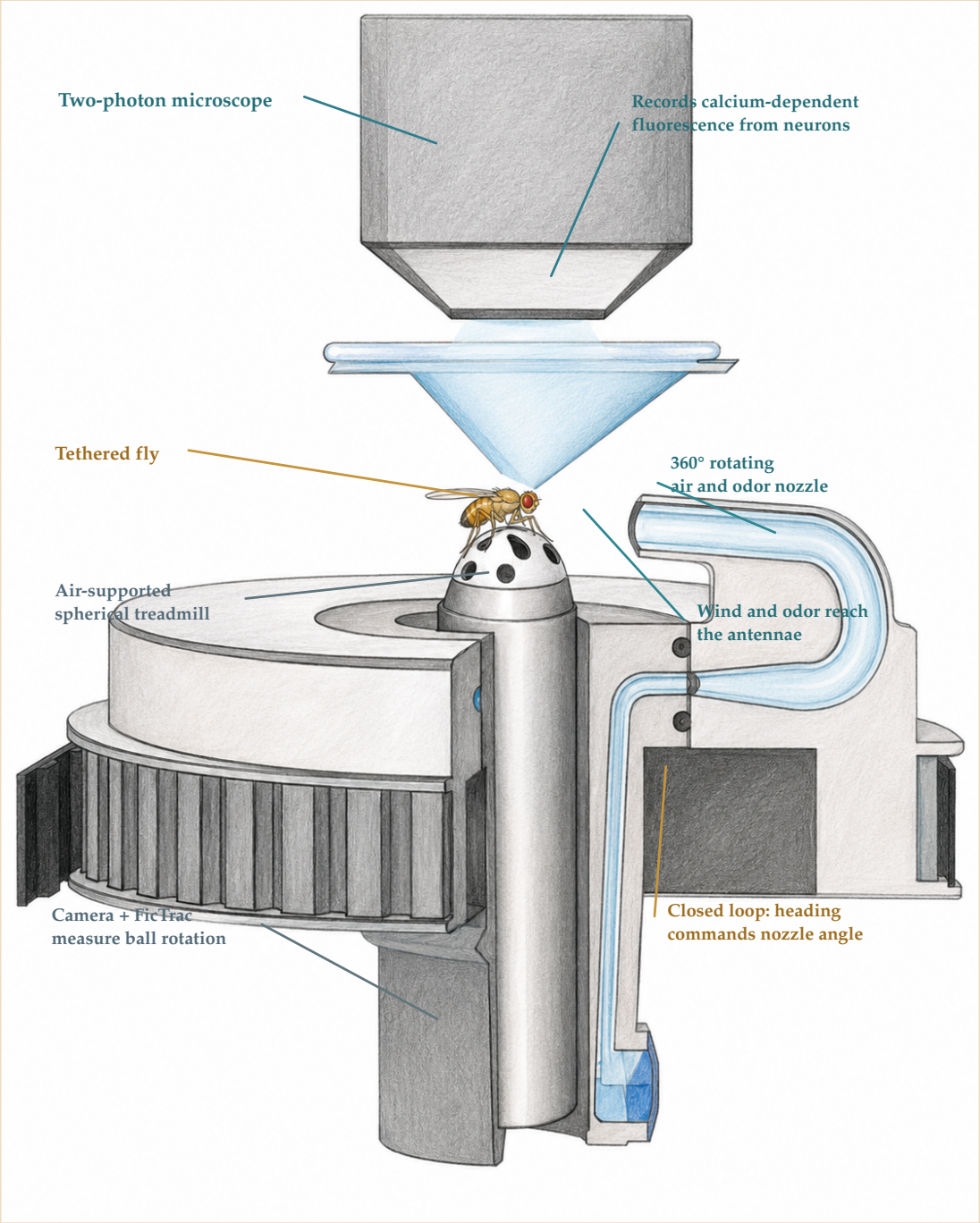
Un panaș odorant este regiunea mobilă de miros transportată de aer. În exterior, panașul se curbează, se fragmentează și se reunește pe măsură ce vântul se schimbă. De aceea este dificil de știut exact ce a mirosit un animal în fiecare moment.

Cercetătorii au făcut problema controlabilă prin **realitate virtuală în buclă închisă**. Corpul musculiței era fixat deasupra unei bile ușoare care plutea pe aer. Pe măsură ce musculița mergea, o cameră măsura rotația bilei de aproximativ 60 de ori pe secundă. Software-ul transforma acea rotație într-o poziție virtuală bidimensională și o orientare.

Orientarea controla o duză motorizată care se putea roti la 360 de grade. Când musculița își schimba direcția virtuală, duza se deplasa în jurul ei astfel încât vântul să rămână aliniat cu o direcție stabilă din lumea virtuală. În același timp, regulatoarele debitului masic modificau cantitatea de aer curat sau de miros de oțet de mere care ajungea la antene, în funcție de poziția virtuală a musculiței. Traversarea unei limite definite prin software pornea sau oprea mirosul, creând un coridor fictiv cu lățimea de 50 de milimetri și lungimea de un metru, chiar dacă musculița nu părăsea niciodată bila.

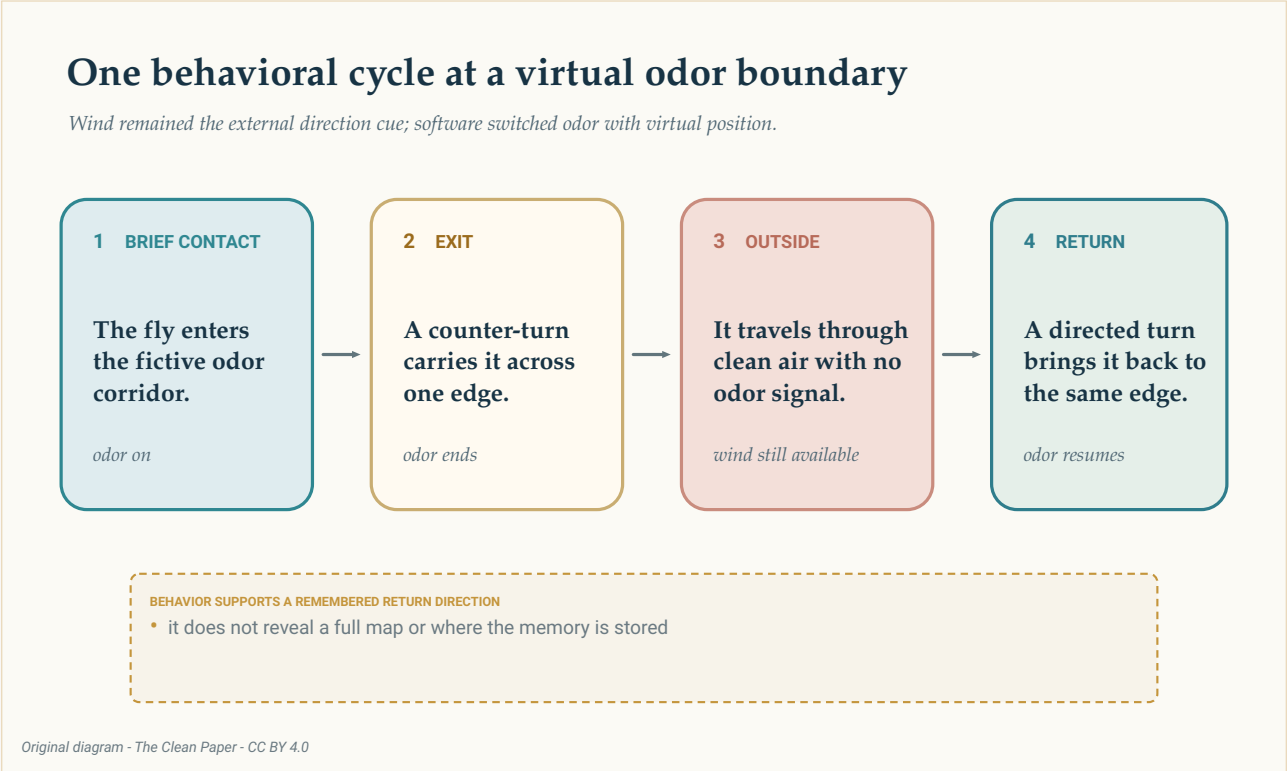
Aparatul producea la fiecare moment o înregistrare sincronizată a poziției virtuale, orientării, stării mirosului și comenzilor fluxului de aer. Din această înregistrare, cercetătorii au reconstruit traiectoriile, au marcat fiecare intrare și ieșire și au măsurat cât de direct revenea musculița. Vântul furniza reperul direcțional extern; mișcarea musculiței determina momentul în care întâlnea fiecare dintre

cele două margini ale limitei odorante virtuale.



Musculița rămânea fixată deasupra unei bile susținute de aer. O cameră și FicTrac transformau rotația bilei în mișcare și orientare virtuală; software-ul rotea apoi duza de aer și miros și comuta mirosul în funcție de poziția virtuală. În timpul unor experimente separate de imagistică neurală, microscopul cu doi fotoni aflat deasupra musculiței înregistra fluorescența dependentă de calciu a neuronilor EPG sau FC2, permițând alinierea activității neurale cu comportamentul. Microscopul nu era necesar în fiecare test comportamental.

The Clean Paper CC BY 4.0



În testul controlat, o musculiță intra pentru scurt timp în coridorul odorant virtual, îl părăsea, se deplasa prin aer fără miros și revenea direcționat. Comportamentul susține existența unei direcții de întoarcere reținute, dar nu arată unde este stocată informația.

The Clean Paper CC BY 4.0

În principalul experiment cu **coridor vertical**, **40 de musculițe** au intrat repetat în zona cu miros, au făcut o contraîntoarcere ieșind din ea și au revenit la aceeași margine. „Vertical” este denumirea folosită în articol pentru geometria la 0 grade: axa lungă a coridorului era paralelă cu direcția din care venea vântul. Nu înseamnă că aparatul era așezat vertical.

Autorii numesc acest tipar **urmărirea marginii**. Un **episod** este o secvență continuă între două traversări ale limitei: episodul interior se întinde de la intrare la ieșire, iar cel exterior de la ieșire până la revenirea musculiței. În cele 755 de episoade interioare, o vizită a durat în medie 4,9 secunde. În timpul revenirilor, distanța medie față de limită a fost de 10,4 milimetri. Mai puțin de 4% dintre cele 793 de episoade au traversat complet coridorul până la marginea opusă.

Ultimele două numere descriu episoade, nu sute de musculițe independente. Distincția contează, deoarece un singur animal poate contribui cu numeroase episoade.

Revenirea nu era doar un reflex fix de orientare împotriva vântului

Mai multe experimente au testat explicații mai simple.

Cercetătorii au modificat mai întâi ceea ce se întâmpla **de-a lungul** coridorului când o musculiță mergea împotriva vântului. Mirosul putea deveni mai puternic către sursa virtuală, putea rămâne constant sau putea deveni mai slab. Musculițele au produs traiectorii similare în toate cele trei cazuri. Prin urmare, o regulă simplă precum „continuă în direcția în care mirosul devine mai puternic” nu poate explica urmărirea marginii în acest aparat.

Apoi au estompat marginea **laterală** a coridorului într-un profil gaussian, în care concentrația se modifica treptat, nu printr-o comutare bruscă. Musculițele s-au concentrat în apropierea flancului unde concentrația se schimba cel mai rapid, nu în centru, unde mirosul era cel mai puternic. Indiciul relevant era, așadar, schimbarea laterală care marca o limită efectivă, nu o creștere obligatorie către sursă de-a lungul coridorului.

Aceasta nu înseamnă că gradienții de concentrație nu contează niciodată în natură. Înseamnă că o creștere către sursă nu a fost necesară pentru acest comportament în condițiile testate.

Cercetătorii au schimbat și orientarea coridorului. Grupuri separate au urmărit coridoare la 0, 45 și 90 de grade, iar un alt grup a întâlnit un coridor care sărea lateral după ieșiri. Grupurile au inclus 40, 21, 20 și, respectiv, 24 de musculițe. Traiectoriile lor exterioare s-au schimbat odată cu geometria. O regulă generică precum „întoarce-te întotdeauna împotriva vântului” nu poate explica această flexibilitate.

În această configurație, mirosul ajungea la cele două antene într-un interval de aproximativ două milisecunde. Asocierea activării optogenetice bilaterale cu vântul a putut reproduce un tipar asemănător urmăririi marginii. **Optogenetica** folosește proteine sensibile la lumină pentru a modifica activitatea unor celule selectate. Aici, rezultatul sugerează că o diferență stânga–dreapta în momentul sosirii mirosului nu era necesară pentru acest comportament. Nu înseamnă că comparația bilaterală este irelevantă pentru animalele care se deplasează liber prin alte tipuri de panaș.

Un vector este mai mic decât o hartă

Un **vector** este o direcție împreună cu o mărime. Cantitatea stocată utilă în acest caz era în principal direcțională: în ce direcție trebuie să se întoarcă musculița pentru a ajunge la limita panașului? Studiul nu a găsit dovezi că musculița stoca o reprezentare completă a panașului sau propria poziție în interiorul lui.

Autorii au creat mai întâi traiectorii artificiale prin amestecarea componentelor mișcării musculițelor reale. Au extras aleatoriu lungimi observate ale deplasărilor și unghiuri de întoarcere și le-au unit. Unii dintre acești deplasatori sintetici au ajuns în cele din urmă din nou la limita mirosului, dar au rătăcit mai departe și au urmat trasee mai puțin directe decât musculițele reale. Nici adăugarea tendinței obișnuite a musculițelor de a se orienta împotriva vântului nu a reprodus revenirile scurte și direcționate. Comportamentul real conținea, prin urmare, mai multă informație direcțională decât o recombinare aleatorie a acelorași mișcări.

Cercetătorii au construit apoi un model cu două moduri: **îndepărtarea de limită** și **revenirea la**

limită. Aceste moduri nu erau etichete pentru fiecare moment petrecut în interiorul sau în exteriorul mirosului. Erau reguli alternative de ghidare care se puteau schimba pe măsură ce musculița se deplasa.

Fiecare traversare a limitei îi oferea modelului o direcție de reținut. La ieșire, modelul actualiza o direcție folosită în timpul îndepărtării. La intrare, actualiza o direcție separată de revenire: în esență, „când am găsit limita, mă deplasam în această direcție". În timpul unei reveniri ulterioare, direcția reținută influența mișcarea musculiței simulate către margine.

Cercetătorii au ajustat modelul la traiectoriile din coridoarele la 0, 45 și 90 de grade. În comparația de sinteză, 72 de musculițe reale și 75 de simulări au produs statistici similare ale traseelor. Când direcția de revenire învățată la intrare a fost eliminată, urmărirea a devenit mai puțin eficientă pentru toate orientările coridorului. Aceasta susține utilitatea unei memorii a direcției de intrare; nu demonstrează că creierul musculiței execută literalmente ecuațiile modelului.

> **Ce înseamnă „memorie" în acest articol?**
>
> Cercetătorii nu au citit direct o săgeată stocată în creierul musculiței. „Memoria direcțională" este o inferență susținută de comportament, model și măsurători neurale. Modelul arată că un număr mic de direcții variabile poate reproduce statistici importante ale traiectoriilor. Nu demonstrează că musculița implementează literalmente ecuațiile și nici că un anumit grup de neuroni este locul în care informația este stocată.

O experiență suplimentară cu un segment orientat la 45 de grade în sens opus a deplasat comportamentul ulterior al unui grup de 10 musculițe, alături de 29 de simulări ale modelului. Aceasta face explicația direcțională mai specifică decât o descriere construită după observarea rezultatelor, dar ea rămâne o interpretare bazată pe model.

Un reper pentru orientare și un obiectiv curent

Studiul a măsurat și perturbat apoi activitatea din **complexul central** al creierului musculiței, o regiune implicată în navigație.

> **Două semnale cu roluri diferite**
>
> EPG și FC2 sunt denumirile a două populații de neuroni din complexul central. Activitatea EPG funcționează ca indicația unei busole: urmărește direcția în care este orientată musculița în raport cu vântul. Activitatea FC2 este asociată cu direcția în care musculița încearcă să se deplaseze. Un circuit de comandă din aval poate compara orientarea curentă cu acel obiectiv. Studiul testează ambele populații, dar nu arată că vreuna dintre ele stochează singură întreaga memorie.

Neuronii EPG poartă un semnal de orientare: tiparul activității lor urmărește direcția în care este ori-

entată musculița în raport cu un reper extern. Prin imagistică de calciu, o măsurare optică indirectă a activității neurale, cercetătorii au constatat că faza activității EPG urmărea orientarea față de vânt în timpul urmăririi marginii. Analiza a folosit 16 teste de la 9 musculițe.

Pentru a inhiba neuronii EPG, cercetătorii i-au modificat genetic astfel încât să exprime **GtACR1**, un canal anionic activat de lumină verde. Un LED a rămas aprins pe durata întregului test, activând canalul și suprimând neuronii selectați; aceeași iluminare nu a afectat musculițele din grupul de control genetic.

Când neuronii EPG au fost inhibați astfel, 12 musculițe experimentale au realizat reveniri direcționate mai puțin eficiente decât cele 6 musculițe de control genetic. Concluzia delimitată este că reperul de orientare purtat de activitatea EPG era necesar pentru urmărirea eficientă a marginii în condițiile testate. Nu este o dovadă că neuronii EPG stocau singuri direcția limitei.

Neuronii FC2 au prezentat o relație diferită. Activitatea populației lor era asociată cu obiectivul curent al navigației și indica spre limita panașului înaintea întoarcerilor din test. Imagistica a folosit 6 musculițe, iar comparațiile prin inactivare au utilizat grupuri de 9–14 musculițe, în funcție de analiză. Inactivarea a afectat urmărirea marginii.

Comportamentul, schimbarea geometriei panașului, un model ajustat și două perturbări neurale susțin părți diferite ale explicației prin memorie direcțională. Împreună, ele susțin un obiectiv direcțional compact în acest test controlat, nu o hartă completă sau un loc celular de stocare demonstrat.

The Clean Paper CC BY 4.0

Acestea sunt dovezi convergente, nu fotografierea unui lanț cauzal. Activitatea EPG furniza un reper de orientare necesar. Activitatea FC2 era compatibilă cu o direcție-țintă și era necesară pentru un comportament eficient. Experimentele nu au localizat o singură „engramă” a memoriei și nu au

demonstrat că sinapsele FC2 stocau fizic direcția.

Ca analogie aproximativă la scară umană, imaginați-vă că ieșiți dintr-o fâșie îngustă de ceață, în timp ce un vânt constant continuă să vă indice nordul. O busolă vă poate arăta în ce direcție priviți, dar revenirea la ceață necesită și reținerea orientării către marginea ei. Compararea orientării curente cu cea dorită vă spune în ce direcție să vă întoarceți. Aceasta este împărțirea rolurilor sugerată aici pentru semnalele EPG și FC2. Este o analogie explicativă, nu o dovadă că oamenii folosesc aceleași celule sau același algoritm.

Memoria depindea de acțiune, nu doar de succesiunea mirosurilor

Într-un experiment de redare, musculițele au primit aceeași succesiune temporală a mirosurilor ca înainte, dar momentele nu mai depindeau de ceea ce făceau atunci. Tendința direcțională învățată s-a diminuat de-a lungul episoadelor de redare. Aceasta susține o actualizare **operantă**, legată de acțiune: conta nu doar expunerea pasivă la o succesiune de mirosuri, ci relația dintre miros și mișcarea musculiței.

Numitorul se schimbă între aceste analize. Panourile din datele extinse includ 8 sau 9 musculițe, în funcție de comparație; seria episoadelor succesive folosește 8 musculițe; panourile de traiectorii necesită cel puțin 10 intrări eficiente; iar panourile pereche ale modelului folosesc 21 de traiectorii simulate care îndeplinesc și ele acest prag de intrare. Acestea nu formează un singur eșantion comun de opt musculițe.

Un panaș mai neregulat a fost util, dar a rămas virtual

Cercetătorii au redat și un panaș mai neregulat, înregistrat anterior. L-au mărit de cinci ori în spațiu și timp pentru ca musculițele fixate să îl poată întâlni suficient de des. **Zece dintre cele 12 musculițe** au ajuns la mai puțin de 50 de milimetri virtuali de sursa lui.

Aceasta nu înseamnă că zece musculițe au găsit o sursă reală în aer liber. Este performanță într-o redare controlată a unui panaș cu aspect naturalist.

Pentru fiecare tip de panaș dinamic, modelul a generat 2.000 de traiectorii. Comparația pentru panașul mărit a analizat 1.850 dintre cele 2.000, după impunerea condiției unei intrări eficiente și excluderea traiectoriilor care începeau prea aproape de sursă. Memoria a ajutat mai mult în apropierea sursei, unde întâlnirile succesive păstrau o structură direcțională coerentă, și mai puțin în regiunea mai turbulentă aflată mai departe în direcția vântului.

Această precizare face parte din rezultat. O direcție compactă poate ajuta numai când lumea rămâne suficient de coerentă încât o întâlnire anterioară să ofere informații utile despre următoarea.

Ce nu arată studiul

- **Nu** arată că musculița construiește o hartă spațială completă.
- **Nu** arată zbor liber printr-un panaș natural nemodificat.
- **Nu** stabilește că toate formele de navigație ghidată de miros folosesc această strategie.
- **Nu** arată că neuronii EPG sau FC2 sunt locul fizic exclusiv în care este stocată memoria.
- **Nu** transformă modelul ajustat în algoritmul biologic literal al musculiței.
- **Nu** se generalizează direct la navigația umană.

Studiul este cel mai solid acolo unde este cel mai specific. Controlul în buclă închisă le-a oferit cercetătorilor acces precis la fiecare întâlnire cu mirosul. Modificările geometriei, redarea, modelarea, imagistica de calciu și inactivarea au testat apoi părți diferite ale aceleiași explicații. Dar cohortele pentru comportament, imagistică și inactivare au fost separate; dimensiunile eșantioanelor nu au fost stabilite în prealabil; colectarea și analiza datelor nu au fost randomizate sau realizate în orb; iar mai puțin de 10% dintre musculițele fixate au fost excluse din cauza aclimatizării, răspunsului sau problemelor de urmărire.

Aceste limite nu șterg fenomenul. Îl delimitează.

Pe scurt

Musculițele de oțet fixate, care mergeau printr-un coridor odorant virtual, reveneau în mod repetat la o limită după ce lăsau mirosul în urmă. Modificările concentrației și geometriei coridorului, un model cu comutare ajustat, imagistica neurală și inactivarea optogenetică susțin o explicație în care musculița folosește o direcție compactă reținută, nu o hartă completă. Neuronii EPG furnizau un reper de orientare necesar, iar activitatea FC2 era compatibilă cu direcția-țintă curentă. Rezultatul este limitat la un test controlat de mers; nu identifică locul celular în care este stocată memoria și nu arată aceeași procesare în zbor natural liber.

Verificare fără exagerări

Ce arată articolul: Într-un test cu musculițe fixate și buclă închisă, animalele au revenit direcționat la limite odorante virtuale pe care nu le mai puteau detecta. Mai multe controale comportamentale, modelarea și perturbările neurale susțin o strategie bazată pe vectori.

Ce este dedus: Că acest comportament folosește o memorie direcțională compactă și că activitatea populației FC2 reprezintă un obiectiv curent de navigație. Conținutul memoriei nu a fost citit direct.

Ce nu arată: O hartă mentală completă, o strategie olfactivă universală, performanța în zbor liber printr-un panaș natural, un singur loc de stocare a memoriei sau un analog uman.

Limitările principale: O singură specie și un aparat controlat; cohorte de musculițe și unități de anal-

iză diferite între experimente; semnale indirecte de calciu; teste de necesitate care nu demonstrează suficiența; și un panaș naturalist care a fost redat și scalat.

Câtă încredere ar trebui să aibă un cititor nespecialist? Încredere mare că fenomenul revenirii direcționate este real în acest aparat și că activitatea complexului central asociată orientării și obiectivului contează. Încredere moderată în model ca explicație compactă. Încredere mică în orice afirmație care îl extinde neschimbat la aer liber sau îl numește o hartă completă.

Surse

Siliciano et al., A vector-based strategy for olfactory navigation in Drosophila, Nature (2026)
https://doi.org/10.1038/s41586-026-10827-7

Siliciano et al., data archive for A vector-based strategy for olfactory navigation in Drosophila
https://doi.org/10.5281/zenodo.20751812

Ruta Laboratory, Edge-Tracking-Model
https://github.com/rutalaboratory/Edge-Tracking-Model