The Clean Paper

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

Mucha môže stratiť pach a aj tak sa obrátiť späť. Vo virtuálnej pachovej stope jej pomohol zapamätaný smer

Pripútané octomilky sa po vstupe do čistého vzduchu opakovane vracali k hranici pachu. Správanie, modelovanie a zásahy do nervovej činnosti podporujú kompaktnú pamäť smeru, nie úplnú mapu. Výsledok pochádza z kontrolovaného testu vo virtuálnej realite a zatiaľ neukazuje rovnakú stratégiu pri voľnom lete v prírode.

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

Mucha môže stratiť pach a aj tak sa obrátiť späť k nemu

Mucha nechala pach za sebou.

Pokračovala v chôdzi čistým vzduchom, niekedy desiatky sekúnd a stovky virtuálnych milimetrov. Potom sa obrátila smerom k hranici, ktorú prekročila, a pach znovu našla. V tej chvíli jej samotná vôňa nemohla ukázať cestu späť.

To je ústredné pozorovanie novej štúdie v časopise Nature o navigácii octomiliek. Výskumníci tvrdia, že muchy používali kompaktnú pamäť smeru: nie mapu celej pachovej stopy ani pamäť prejdenej vzdialenosti, ale zapamätaný azimut k hranici, ktorú už nebolo možné vnímať.

Výsledok je pozoruhodný, pretože ukazuje, ako málo uložených informácií môže stačiť. Zároveň sa dá ľahko zveličiť. Tieto muchy voľne nelietali prírodnou krajinou. Kráčali pripútané na guli nadnášanej vzduchom v prísne kontrolovanom virtuálnom svete. Štúdia podporuje vektorovú stratégiu v tejto aparatúre; neukazuje, že muchy vytvárajú mentálne mapy, nevysvetľuje všetky spôsoby, ktorými zvieratá sledujú pachy, ani neurčuje bunky, v ktorých je pamäť fyzicky uložená.

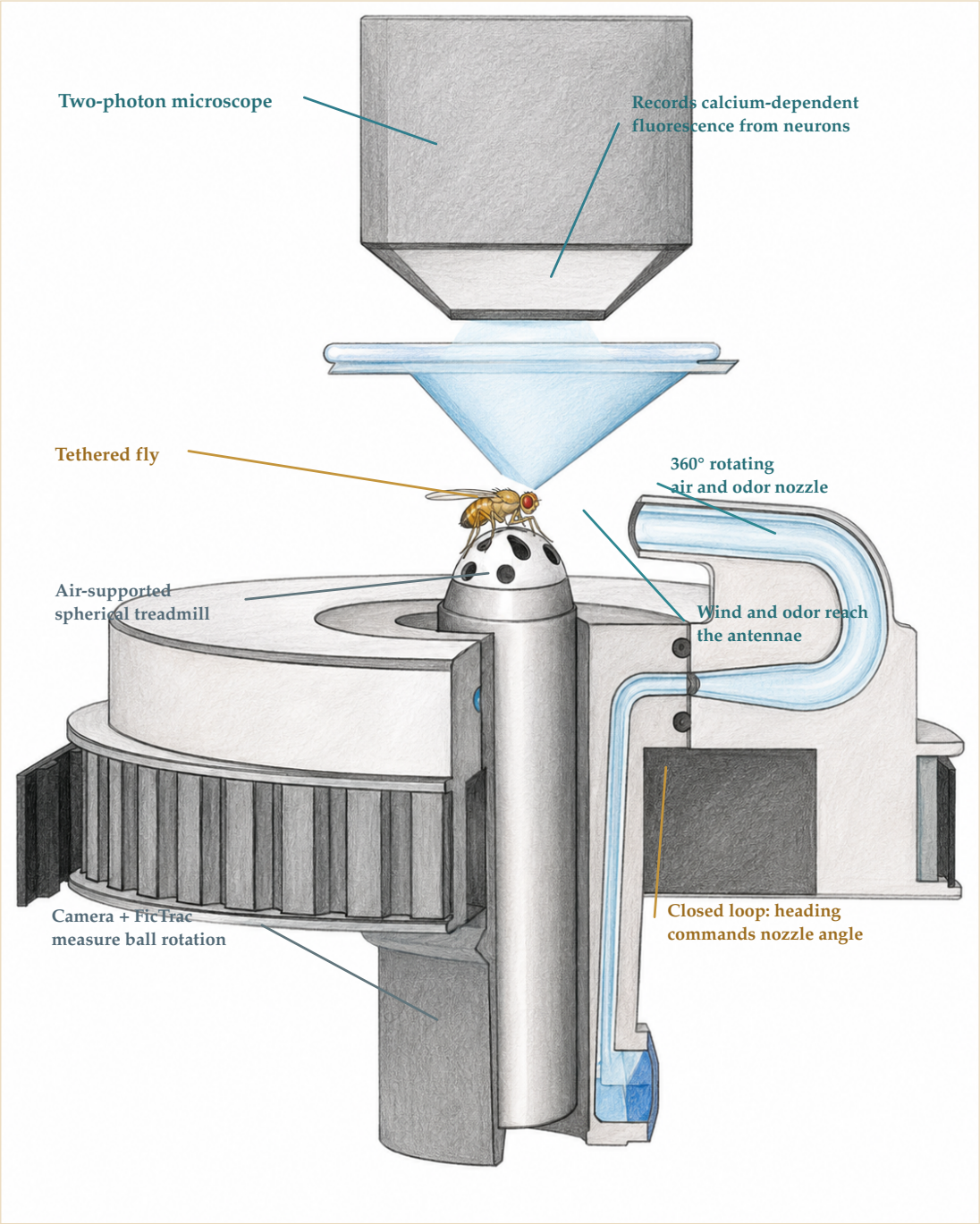
Neviditeľnú chodbu vytvoril softvér

Pachová stopa je pohybujúca sa oblasť pachu unášaná vzduchom. Vonku sa pri zmenách vetra ohýba, rozpadá a znovu spája. Preto je ťažké presne vedieť, čo zviera v každom okamihu cítilo.

Výskumníci urobili tento problém kontrolovateľným pomocou **virtuálnej reality v uzavretej slučke**. Telo muchy bolo pripútané na mieste nad ľahkou guľou plávajúcou na vzduchu. Keď mucha kráčala, kamera merala otáčanie gule približne 60-krát za sekundu. Softvér previedol toto otáčanie na virtuálnu dvojrozmernú polohu a orientáciu.

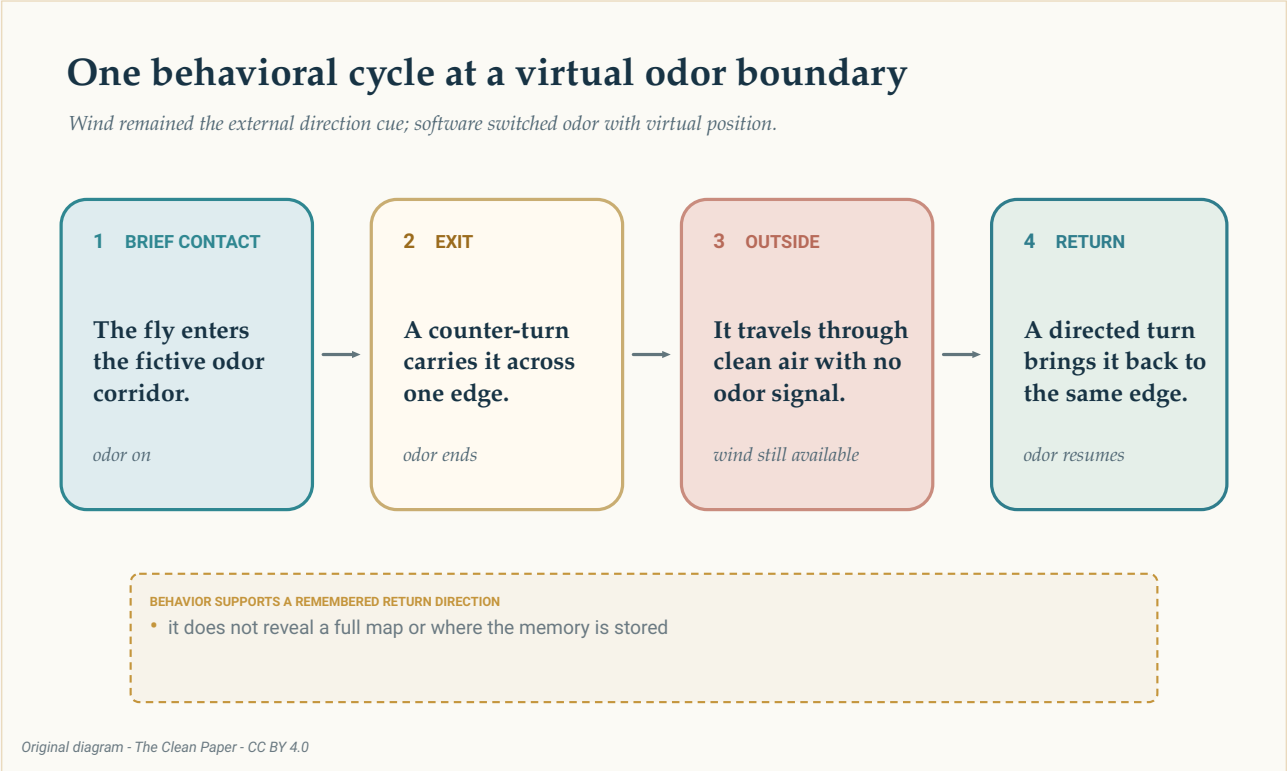
Táto orientácia riadila motorickú dýzu, ktorá sa mohla otáčať o 360 stupňov. Keď mucha menila virtuálny smer, dýza sa okolo nej presúvala tak, aby vietor zostával zarovnaný so stabilným smerom v jej virtuálnom svete. Regulátory hmotnostného prietoku zároveň menili množstvo čistého vzduchu alebo pachu jablčného octu prichádzajúceho k tykadlám podľa virtuálnej polohy muchy. Prekročenie softvérovo určenej hranice preto pach zaplo alebo vyplo a vytvorilo fiktívnu chodbu širokú 50 milimetrov a dlhú jeden meter, hoci mucha nikdy neopustila guľu.

Aparatúra vytvárala synchronizovaný záznam virtuálnej polohy, orientácie, stavu pachu a ovládania prúdenia vzduchu v každom časovom bode. Z tohto záznamu výskumníci zrekonštruovali trajektórie, označili každý vstup a výstup a zmerali, ako priamo sa mucha vracala. Vietor poskytoval vonkajšie smerové vodidlo; vlastný pohyb muchy určoval, kedy narazila na jednu alebo druhú stranu virtuálnej hranice pachu.



Mucha zostávala pripútaná nad guľou nadnášanou vzduchom. Kamera a FicTrac prevádzali otáčanie gule na virtuálny pohyb a orientáciu; softvér potom otáčal vzduchovou a pachovou dýzou a prepínal pach podľa virtuálnej polohy. Počas samostatných pokusov s nervovým zobrazovaním zaznamenával dvojfotónový mikroskop nad muchou fluorescenciu závislú od vápnika v neurónoch EPG alebo FC2, takže nervovú aktivitu bolo možné zosúladiť so správaním. Mikroskop nebol potrebný pri každom behaviorálnom pokuse.

The Clean Paper CC BY 4.0



V kontrolovanom teste mucha krátko vstúpila do virtuálnej pachovej chodby, opustila ju, prešla vzduchom bez pachu a cielene sa vrátila. Správanie podporuje zapamätaný smer návratu; neodhaľuje, kde je táto informácia uložená.

The Clean Paper CC BY 4.0

V hlavnom experimente s **vertikálnou chodbou 40 múch** opakovane vstupovalo do pachu, protismerným obratom z neho vyšlo a vracalo sa k tej istej hrane. „Vertikálna“ je označenie geometrie s uhlom 0 stupňov v článku: dlhá os chodby bola rovnobežná so smerom proti vetru. Neznamená to, že aparatúra stála zvislo.

Autori tento vzorec nazývajú **sledovanie hrany**. **Úsek** je jedna súvislá epizóda medzi prekročeniami hranice: vnútorný úsek trvá od vstupu po výstup a vonkajší od výstupu po návrat muchy. V 755 vnútorných úsekoch trvala návšteva priemerne 4,9 sekundy. Počas návratov bola priemerná vzdialenosť od hranice 10,4 milimetra. Menej než 4 % zo 793 úsekov prešlo až k opačnej hrane chodby.

Posledné dve čísla opisujú úseky, nie stovky nezávislých múch. Toto rozlíšenie je dôležité, pretože jedno zviera môže prispieť mnohými úsekmi.

Návraty neboli iba pevným reflexom proti vetru

Niekoľko experimentov testovalo jednoduchšie vysvetlenia.

Výskumníci najprv zmenili, čo sa dialo **pozdĺž** chodby, keď mucha kráčala proti vetru. Pach mohol smerom k virtuálnemu zdroju silnieť, zostať konštantný alebo slabnúť. Muchy vytvárali podobné dráhy vo všetkých troch prípadoch. Jednoduché pravidlo typu „pokračuj tam, kde pach silnie“ preto

nedokáže vysvetliť sledovanie hrany v tejto aparatúre.

Potom zjemnili **bočnú** hranu chodby na Gaussov profil, v ktorom sa koncentrácia menila postupne namiesto náhleho prepnutia. Muchy sa zhromažďovali pri boku, kde sa koncentrácia menila najrýchlejšie, nie v strede, kde bol pach najsilnejší. Dôležitým vodidlom teda bola bočná zmena vyznačujúca účinnú hranicu, nie nevyhnutný nárast smerom k zdroju pozdĺž chodby.

To neznamená, že koncentračné gradienty v prírode nikdy nie sú dôležité. Znamená to, že za testovaných podmienok nebol pre toto správanie potrebný nárast koncentrácie smerom k zdroju.

Výskumníci zmenili aj orientáciu chodby. Samostatné skupiny sledovali chodby s orientáciou 0, 45 a 90 stupňov a ďalšia skupina narazila na chodbu, ktorá po výstupoch odskočila do strany. Skupiny tvorilo 40, 21, 20 a 24 múch. Ich vonkajšie dráhy sa menili s geometriou. Všeobecné pravidlo typu „vždy sa otoč proti vetru“ nedokáže vysvetliť túto pružnosť.

V tejto aparatúre sa pach dostal k obom tykadlám v rozpätí približne dvoch milisekúnd. Spojenie obojstrannej optogenetickej aktivácie s vetrom dokázalo napodobniť vzorec podobný sledovaniu hrany. **Optogenetika** používa bielkoviny citlivé na svetlo na zmenu aktivity vybraných buniek. Výsledok tu naznačuje, že rozdiel v čase príchodu pachu medzi ľavou a pravou stranou nebol pre toto správanie nevyhnutný. Neznamená to, že obojstranné porovnávanie nie je dôležité pre voľne sa pohybujúce zvieratá v iných pachových stopách.

Vektor je menší než mapa

Vektor je smer spolu s veľkosťou. Užitočná uložená veličina tu bola predovšetkým smerová: ktorým smerom sa má mucha otočiť, aby dosiahla hranicu pachovej stopy? Štúdia nenašla dôkaz, že mucha uchovávala úplné usporiadanie stopy alebo svoju vlastnú polohu v nej.

Autori najprv vytvorili umelé dráhy premiešaním zložiek skutočného pohybu múch. Náhodne vyberali pozorované dĺžky behov a uhly otočení a spájali ich. Niektorí z týchto syntetických chodcov napokon znovu narazili na hranicu pachu, ale blúdili ďalej a volili menej priame trasy než skutočné muchy. Ani pridanie bežnej tendencie múch otáčať sa proti vetru nereprodukovalo krátke, cielené návraty. Skutočné správanie preto obsahovalo viac smerovej informácie než náhodná zmes rovnakých pohybov.

Výskumníci potom vytvorili model s dvoma režimami: **opúšťanie hranice** a **návrat k hranici**. Tieto režimy neboli označeniami každého okamihu vnútri alebo mimo pachu. Boli to alternatívne pravidlá riadenia, medzi ktorými sa model mohol počas pohybu muchy prepínať.

Každé prekročenie hranice dalo modelu smer, ktorý si mal zapamätať. Pri výstupe aktualizoval smer používaný počas opúšťania. Pri vstupe aktualizoval samostatný smer návratu: v podstate „keď som našiel hranicu, pohyboval som sa týmto smerom“. Pri neskoršom návrate tento zapamätaný smer vychyľoval pohyb simulovanej muchy späť k hrane.

Výskumníci prispôsobili model trajektóriám z chodieb s orientáciou 0, 45 a 90 stupňov. V súhrnnom porovnaní vytvárali podobné štatistiky dráh 72 skutočných múch a 75 simulácií. Keď sa odstránil

smer návratu naučený pri vstupe, sledovanie bolo menej účinné pri všetkých orientáciách chodby. To podporuje užitočnosť pamäti smeru vstupu; nedokazuje to, že mozog muchy doslova vykonáva rovnice modelu.

> **Čo v tomto článku znamená „pamäť“?**
>
> Výskumníci neprečítali uloženú šípku priamo z mozgu muchy. „Smerová pamäť“ je záver podporený správaním, modelom a nervovými meraniami. Model ukazuje, že niekoľko meniacich sa smerov dokáže reprodukovať dôležité štatistiky dráh. Nedokazuje, že mucha doslova vykonáva jeho rovnice ani že jedna pomenovaná skupina neurónov je miestom uloženia.

Dodatočná skúsenosť s opačne orientovaným 45-stupňovým úsekom posunula neskoršie správanie desiatich múch spolu s 29 simuláciami modelu. Smerové vysvetlenie je tým konkrétnejšie než dodatočný opis, stále však zostáva interpretáciou založenou na modeli.

Referencia orientácie a aktuálny cieľ

Štúdia potom merala a narušala aktivitu v **centrálnom komplexe** muchy, oblasti mozgu zapojenej do navigácie.

> **Dva signály s odlišnými úlohami**
>
> EPG a FC2 sú názvy dvoch populácií neurónov v centrálnom komplexe. Aktivita EPG funguje ako údaj kompasu: sleduje smer, ktorým je mucha práve otočená vzhľadom na vietor. Aktivita FC2 súvisí so smerom, ktorým sa mucha snaží pohybovať. Nadväzujúci riadiaci okruh môže porovnávať aktuálnu orientáciu s týmto cieľom. Štúdia testuje obe populácie, ale neukazuje, že by niektorá z nich sama uchovávala celú pamäť.

Neuróny EPG nesú signál orientácie: vzorec ich aktivity sleduje smer, ktorým je mucha otočená vzhľadom na vonkajšie vodidlo. Pomocou vápnikového zobrazovania, nepriameho optického merania nervovej aktivity, výskumníci zistili, že fáza aktivity EPG počas sledovania hrany kopírovala orientáciu voči vetru. Analýza použila 16 pokusov od 9 múch.

Na inhibíciu neurónov EPG ich výskumníci geneticky upravili tak, aby exprimovali **GtACR1**, aniónový kanál aktivovaný zeleným svetlom. LED dióda zostala počas testovacieho pokusu zapnutá, čím aktivovala kanál a potláčala vybrané neuróny; rovnaké osvetlenie nepoškodilo geneticky kontrolné muchy.

Pri takejto inhibícii neurónov EPG vykonávalo 12 experimentálnych múch menej účinné cielené návraty než 6 genetických kontrol. Ohraničený záver znie, že referencia orientácie nesená aktivitou EPG bola za testovaných podmienok potrebná na účinné sledovanie hrany. Nie je to dôkaz, že neuróny EPG samy uchovávali smer hranice.

Neuróny FC2 vykazovali iný vzťah. Aktivita ich populácie súvisela s aktuálnym navigačným cieľom a pred otočeniami v teste smerovala k hranici pachovej stopy. Pri zobrazovaní bolo použitých 6 múch a porovnania po umlčaní zahŕňali podľa analýzy skupiny 9 až 14 múch. Umlčanie zhoršilo sledovanie hrany.

Správanie, zmenená geometria pachovej stopy, prispôsobený model a dva zásahy do nervovej činnosti podporujú rôzne časti vysvetlenia smerovou pamäťou. Spoločne podporujú kompaktný cieľový smer v tomto kontrolovanom teste, nie úplnú mapu ani dokázané bunkové miesto uloženia.

The Clean Paper CC BY 4.0

Ide o zbiehajúce sa dôkazy, nie o odfotografovaný reťazec príčin. Aktivita EPG poskytovala potrebnú referenciu orientácie. Aktivita FC2 bola v súlade s cieľovým smerom a bola potrebná na účinné správanie. Experimenty nenašli jediný pamäťový „engram“ ani nedokázali, že smer bol fyzicky uložený v synapsách FC2.

Ako hrubú analógiu v ľudskom meradle si predstavte, že vystúpite z úzkeho pásu hmly, zatiaľ čo stály vietor vám naďalej ukazuje, kde je sever. Kompas vám môže povedať, ktorým smerom ste otočení, návrat do hmly však vyžaduje aj zapamätaný azimut k jej okraju. Porovnanie aktuálnej orientácie s požadovaným azimutom určí, kam sa máte otočiť. Takéto rozdelenie úloh štúdia navrhuje pre signály EPG a FC2. Je to vysvetľujúca analógia, nie dôkaz, že ľudia používajú rovnaké bunky alebo algoritmus.

Pamäť závisela od konania, nie iba od načasovania pachu

V experimente s prehrávaním dostávali muchy rovnakú časovú postupnosť pachu ako predtým, načasovanie však bolo odpojené od toho, čo práve robili. Naučené smerové vychýlenie počas prehrávaných úsekov zoslablo. To podporuje **operantnú**, s konaním spojenú aktualizáciu: dôležité nebolo iba pasívne vystavenie postupnosti pachu, ale vzťah medzi pachom a pohybom muchy.

Menovateľ sa medzi týmito analýzami mení. Panely rozšírených údajov zahŕňajú podľa porovnania 8 alebo 9 múch; séria po sebe nasledujúcich úsekov používa 8 múch; panely trajektórií vyžadujú najmenej 10 účinných vstupov; a spárované panely modelu používajú 21 simulovaných trajektórií, ktoré tiež spĺňajú tento prah vstupov. Nejde o jednu spoločnú vzorku ôsmich jedincov.

Nepravidelnejšia pachová stopa bola užitočná, ale stále virtuálna

Výskumníci prehrali aj skôr zaznamenanú, nepravidelnejšiu pachovú stopu. Priestorovo aj časovo ju zväčšili päťnásobne, aby sa s ňou pripútané muchy mohli stretávať dostatočne často. **Desať z 12 múch** sa dostalo do vzdialenosti 50 virtuálnych milimetrov od jej zdroja.

Nie je to desať múch, ktoré našli skutočný zdroj vo voľnom vzduchu. Je to výkon v kontrolovanom prehrávaní pachovej stopy podobnej prírodnej.

Pre každý typ dynamickej pachovej stopy vytvoril model 2 000 trajektórií. Porovnanie zväčšenej stopy analyzovalo 1 850 z týchto 2 000 po požiadavke účinného vstupu a vylúčení trajektórií, ktoré sa začínali príliš blízko zdroja. Pamäť pomáhala viac v blízkosti zdroja, kde si po sebe nasledujúce stretnutia zachovávali súdržnú smerovú štruktúru, a menej v turbulentnejšej oblasti ďalej po vetre.

Táto výhrada je súčasťou výsledku. Kompaktný smer môže pomôcť iba vtedy, keď svet zostáva dostatočne súdržný na to, aby predchádzajúce stretnutie poskytovalo užitočnú informáciu o nasledujúcom.

Čo štúdia neukazuje

- **Neukazuje**, že mucha vytvára úplnú priestorovú mapu.
- **Neukazuje** voľný let neupravenou prírodnou pachovou stopou.
- **Neustanovuje**, že túto stratégiu používa každá navigácia podľa pachu.
- **Neukazuje**, že neuróny EPG alebo FC2 sú výhradným fyzickým miestom uloženia pamäti.
- **Nemení** prispôsobený model na doslovný biologický algoritmus muchy.
- **Nemožno ju** priamo zovšeobecniť na ľudskú navigáciu.

Štúdia je najsilnejšia tam, kde je najkonkrétnejšia. Riadenie v uzavretej slučke poskytlo výskum-

níkom presný prístup ku každému stretnutiu s pachom. Zmeny geometrie, prehrávanie, modelovanie, vápnikové zobrazovanie a umlčanie potom testovali rôzne časti jedného vysvetlenia. Behaviorálne, zobrazovacie a umlčovacie kohorty však boli oddelené; veľkosti vzoriek neboli určené vopred; zber a analýza údajov neboli randomizované ani zaslepené; a menej než 10 % pripútaných múch bolo vylúčených pre problémy s aklimatizáciou, reakciou alebo sledovaním.

Tieto obmedzenia jav nevymazávajú. Vymedzujú ho.

Stručné zhrnutie

Pripútané octomilky kráčajúce virtuálnou pachovou chodbou sa po opustení pachu opakovane vracali k hranici. Zmeny koncentrácie a geometrie chodby, prispôsobený prepínací model, nervové zobrazovanie a optogenetické umlčanie podporujú vysvetlenie, podľa ktorého mucha používa kompaktný zapamätaný smer, nie úplnú mapu. Neuróny EPG poskytovali potrebnú referenciu orientácie, zatiaľ čo aktivita FC2 bola v súlade s aktuálnym cieľovým smerom. Výsledok je obmedzený na kontrolovaný test chôdze; neurčuje bunkové miesto uloženia pamäti ani neukazuje rovnaký výpočet pri voľnom lete v prírode.

Kontrola bez príkras

Čo článok ukazuje: V pripútanom teste s uzavretou slučkou sa muchy cielene vracali k virtuálnym hraniciam pachu, ktoré už nemohli vnímať. Viaceré behaviorálne kontroly, modelovanie a zásahy do nervovej činnosti podporujú vektorovú stratégiu.

Čo sa odvodzuje: Že správanie používa kompaktnú smerovú pamäť a že aktivita populácie FC2 predstavuje aktuálny navigačný cieľ. Obsah pamäti nebol prečítaný priamo.

Čo článok neukazuje: Úplnú mentálnu mapu, univerzálnu čuchovú stratégiu, výkon pri voľnom lete v prírodnej pachovej stope, jediné miesto uloženia pamäti ani ľudskú obdobu.

Hlavné obmedzenia: Jeden druh a kontrolovaná aparatúra; rozdielne kohorty múch a jednotky analýzy medzi experimentmi; nepriame vápnikové signály; testy nevyhnutnosti, ktoré nedokazujú postačujúcnosť; a pachová stopa podobná prírodnej, ktorá bola prehraná a zväčšená.

Akú dôveru by mal mať bežný čitateľ? Vysokú dôveru, že jav cieleného návratu je v tejto aparatúre skutočný a že záleží na aktivite centrálneho komplexu spojenej s orientáciou a cieľom. Strednú dôveru v model ako kompaktné vysvetlenie. Nízku dôveru v tvrdenie, ktoré ho bez zmeny rozširuje na voľný priestor alebo ho označuje za úplnú mapu.

Zdroje

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