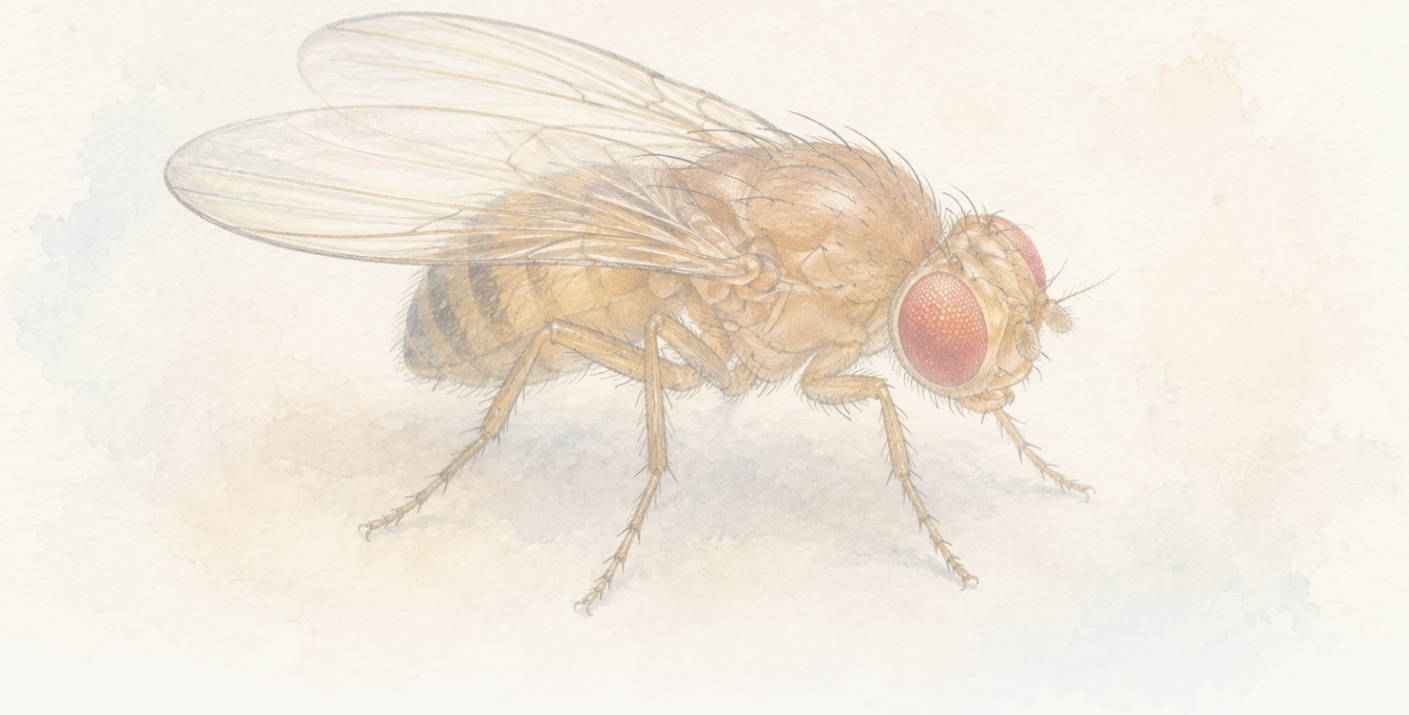


The Clean Paper

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

Muha lahko izgubi vonj in se vseeno obrne nazaj. V virtualnem vonjavnem oblaku ji je pomagala zapomnjena smer

Privezane vinske mušice so se po hoji v čist zrak večkrat vrnile na mejo vonja. Vedenje, modeliranje in nevronske perturbacije podpirajo kompaktni spomin smeri, ne popolnega zemljevida. Rezultat izhaja iz nadzorovanega preizkusa navidezne resničnosti in še ne kaže iste strategije pri prostem naravnem letu.

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

Muha lahko izgubi vonj in se kljub temu obrne nazaj proti njemu

Muha je vonj pustila za sabo.

Še naprej je hodila skozi čist zrak, včasih več deset sekund in več sto virtualnih milimetrov. Nato se je obrnila proti meji, ki jo je prej prečkala, in znova našla vonj. V tistem trenutku je sam vonj ni mogel usmeriti nazaj.

To je osrednje opažanje nove študije v Nature o navigaciji vinskih mušic. Raziskovalci trdijo, da so muhe uporabljale kompakten spomin na smer: ne zemljevida celotnega vonjalnega oblaka in ne spomina na prepotovano razdaljo, temveč zapomnjeno smer proti meji, ki je niso več mogle zaznati.

Rezultat je zanimiv, ker pokaže, kako malo shranjenih informacij je lahko dovolj. Hkrati ga je lahko pretiravati. Te muhe niso prosto letele skozi naravno pokrajino. Hodile so privezane na zračno podprti krogli v strogo nadzorovanem virtualnem svetu. Študija v tej napravi podpira strategijo, ki temelji na vektorju; ne kaže, da muhe gradijo miselne zemljevide, ne razloži vseh načinov, kako živali sledijo vonjem, in ne določi celic, v katerih je spomin fizično shranjen.

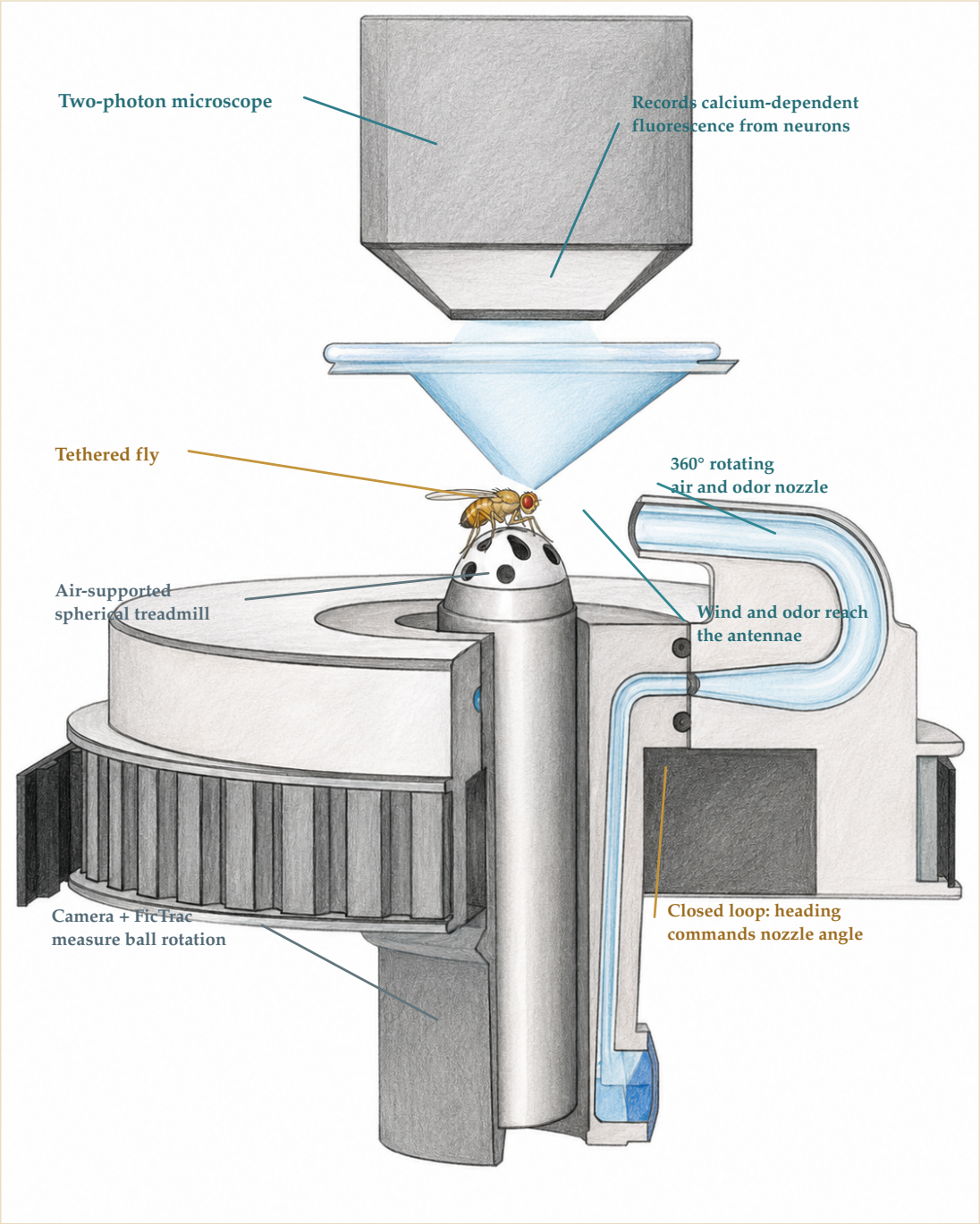
Nevidni koridor je ustvarila programska oprema

Vonjalni oblak je premikajoče se območje vonja, ki ga nosi zrak. Na prostem se tak oblak zvija, razpada in ponovno povezuje, ko se veter spreminja. Zato je težko natančno vedeti, kaj je žival zaznala v vsakem trenutku.

Raziskovalci so problem naredili obvladljiv z **virtualno resničnostjo v zaprti povratni zanki**. Telo muhe je bilo pritrjeno na mestu nad lahko kroglo, ki je lebdela na zraku. Ko je muha hodila, je kamera približno 60-krat na sekundo merila vrtenje krogle. Programska oprema je to vrtenje pretvorila v virtualni dvodimenzionalni položaj in smer.

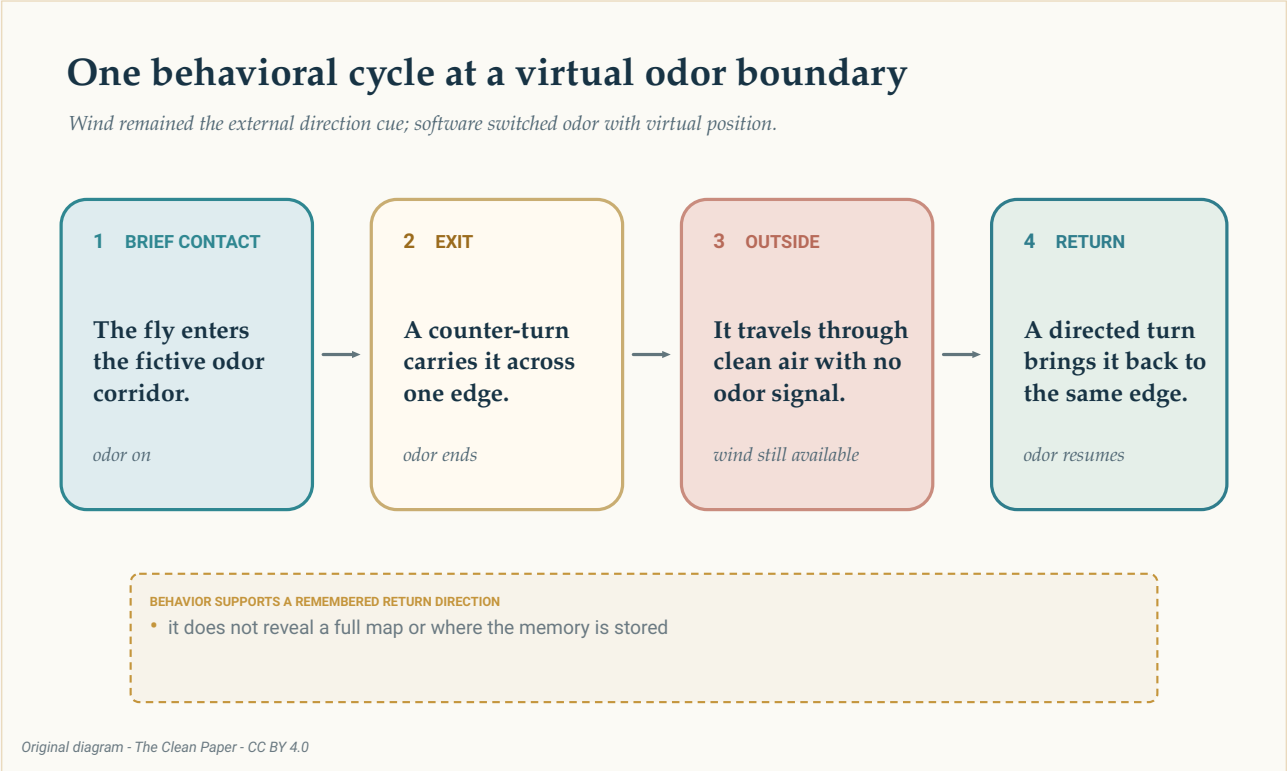
Ta smer je nadzorovala motorizirano šobo, ki se je lahko vrtela za 360 stopinj. Ko je muha spreminjala svojo virtualno smer, se je šoba vrtela okoli nje, da je veter ostal poravnan s stalno smerjo v njenem virtualnem svetu. Hkrati so regulatorji pretoka spreminjali delež čistega zraka ali vonja po jabolčnem kisu, ki je dosegal tipalnice, glede na virtualni položaj muhe. Prečkanje programsko določene meje je tako vklopilo ali izklopilo vonj ter ustvarilo navidezni koridor, širok 50 milimetrov in dolg en meter, čeprav muha nikoli ni zapustila krogle.

Naprava je ustvarila sinhroniziran zapis virtualnega položaja muhe, smeri, stanja vonja in nastavitev zračnega toka v vsakem trenutku. Iz tega zapisa so raziskovalci rekonstruirali poti, označili vsak vstop in izstop ter izmerili, kako neposredno se je muha vrnila. Veter je dajal zunanji orientacijski znak; lastno gibanje muhe je določalo, kdaj je naletela na eno ali drugo stran virtualne meje vonja.



Muha je ostala pritrjena nad zračno podprto kroglo. Kamera in FicTrac sta vrtenje krogle pretvarjala v virtualno gibanje in smer; programska oprema je nato vrtela šobo za zrak in vonj ter vklapljala vonj glede na virtualni položaj. V ločenih poskusih slikanja živčne aktivnosti je dvofotonski mikroskop nad muho beležil od kalcija odvisno fluorescenco nevronov EPG ali FC2, kar je omogočilo poravnavo živčne aktivnosti z vedenjem. Mikroskop ni bil potreben pri vsakem vedenjskem poskusu.

The Clean Paper CC BY 4.0



V nadzorovanem testu je muha za kratek čas vstopila v virtualni vonjalni koridor, ga zapustila, se premikala skozi zrak brez vonja in nato usmerjeno vrnila. Vedenje podpira idejo zapomnjene smeri vrnitve; ne razkrije, kje je ta informacija shranjena.

The Clean Paper CC BY 4.0

V glavnem poskusu z **navpičnim koridorjem** je **40 muh** večkrat vstopilo v območje vonja, se obrnilo iz njega in se vrnilo k istemu robu. »Navpičen« je ime članka za geometrijo pri 0 stopinjah: dolga os koridorja je bila vzporedna s smerjo proti vetru. Ne pomeni, da je bila naprava postavljena pokonci.

Avtorji ta vzorec imenujejo **sledenje robu**. **Epizoda** je ena neprekinjena faza med prečkanjema meje: notranja epizoda traja od vstopa do izstopa, zunanja pa od izstopa do vrnitve muhe. V 755 notranjih epizodah je obisk v povprečju trajal 4,9 sekunde. Med vračanjem je bila povprečna razdalja od meje 10,4 milimetra. Manj kot 4 % od 793 epizod je seglo vse do nasprotnega roba koridorja.

Zadnji dve številki opisujeta epizode, ne stotine neodvisnih muh. To je pomembno, ker lahko ista žival prispeva veliko epizod.

Vračanje ni bilo le fiksni refleks proti vetru

Več poskusov je preverilo preprostejše razlage.

Raziskovalci so najprej spremenili, kaj se dogaja **vzdolž** koridorja, ko je muha hodila proti vetru. Vonj je lahko postajal močnejši proti virtualnemu izvoru, ostal stalen ali postal šibkejši. Muhe so v vseh treh primerih ustvarile podobne poti. Preprosto pravilo »pojdi tja, kjer vonj postaja močnejši« zato ne more razložiti sledenja robu v tej napravi.

Nato so **prečni** rob koridorja zmehčali v Gaussov profil, kjer se je koncentracija spreminjala postopoma namesto nenadno. Muhe so se zbirale ob boku, kjer se je koncentracija najhitreje spreminjala, ne v sredini, kjer je bil vonj najmočnejši. Pomemben znak je bila torej prečna sprememba, ki je označevala učinkovito mejo, ne nujno naraščanje koncentracije proti izvoru vzdolž koridorja.

To ne pomeni, da koncentracijski gradienti v naravi nikoli niso pomembni. Pomeni le, da pri preizkušenih pogojih za to vedenje ni bilo potrebno naraščanje vonja proti izvoru.

Raziskovalci so spremenili tudi orientacijo koridorja. Ločene skupine so sledile navpičnim koridorjem, koridorjem pod 45 stopinjami in pod 90 stopinjami, še ena skupina pa je naletela na koridor, ki je po izstopu skočil vstran. Velikosti skupin so bile 40, 21, 20 in 24 muh. Njihove poti zunaj vonja so se spreminjale z geometrijo. Splošno pravilo »vedno se obrni proti vetru« te prilagodljivosti ne more pojasniti.

V tej napravi je vonj dosegel obe tipalnici v približno dveh milisekundah. Dvostranska optogenetska aktivacija, združena z vetrom, je lahko reproducirala vzorec, podoben sledenju robu. **Optogenetika** uporablja na svetlobo občutljive beljakovine za spreminjanje aktivnosti izbranih celic. Tukaj rezultat kaže, da razlika med levim in desnim časom prihoda vonja za to vedenje ni bila nujna. Ne pomeni pa, da dvostranska primerjava ni pomembna pri prosto gibajočih se živalih v drugih vonjalnih oblakih.

Vektor je manjši od zemljevida

Vektor je smer skupaj z velikostjo. Tukaj je bila uporabna shranjena količina predvsem smerna: v katero smer naj se muha obrne, da doseže mejo vonjalnega oblaka? Študija ni našla dokazov, da bi muha shranjevala celoten razpored oblaka ali svoj položaj v njem.

Avtorji so najprej ustvarili umetne poti z naključnim premešanjem sestavin resničnega gibanja muh. Iz opazovanih dolžin tekov in kotov obratov so naključno črpali vrednosti in jih sestavljali v nove poti. Nekateri sintetični sprehajalci so sčasoma spet zadeli mejo vonja, vendar so tavali dlje in se vračali manj neposredno kot resnične muhe. Tudi dodatek običajne težnje muh, da se obrnejo proti vetru, ni reproduciral kratkih, usmerjenih vrnitev. Resnično vedenje je torej vsebovalo več smerne informacije kot naključno premešana različica istih gibov.

Raziskovalci so nato zgradili model z dvema načinoma: **oddaljevanje od meje** in **vračanje k meji**. Ta načina nista bila oznaki za vsak trenutek znotraj ali zunaj vonja. Bila sta alternativni pravili krmiljenja, med katerima je model lahko preklapljal med gibanjem muhe.

Vsako prečkanje meje je modelu dalo smer, ki si jo je bilo treba zapomniti. Ob izstopu je posodobil smer, uporabljeno med oddaljevanjem. Ob vstopu je posodobil ločeno smer vrnitve: v praksi »ko sem našla mejo, sem se gibala v to smer«. Pri poznejšem vračanju je ta zapomnjena smer usmerjala simulirano muho nazaj proti robu.

Model so prilagodili potem skozi koridorje pri 0, 45 in 90 stopinjah. V povzetni primerjavi so 72 resničnih muh in 75 simulacij dale podobne statistike poti. Ko so odstranili smer vrnitve, naučeno ob vstopu, je sledenje postalo manj učinkovito pri vseh orientacijah koridorja. To podpira uporabnost

spomina na smer ob vstopu; ne dokazuje, da možgani muhe dobesedno izvajajo enačbe modela.

> **Kaj v tem članku pomeni »spomin«?**
>
> Raziskovalci niso neposredno prebrali shranjene puščice iz možganov muhe. »Smerni spomin« je sklep, ki ga podpirajo vedenje, model in živčne meritve. Model kaže, da lahko nekaj spreminjajočih se smeri reproducira pomembne statistike poti. Ne dokazuje, da muha dobesedno izvaja enačbe ali da je ena imenovana skupina nevronov kraj shranjevanja spomina.

Dodatna izkušnja s segmentom pri nasprotno usmerjenih 45 stopinjah je spremenila poznejše vedenje pri 10 muhah, skupaj z 29 modelnimi simulacijami. To naredi smerno razlago bolj specifično od naknadnega opisa, vendar ostaja modelna interpretacija.

Referenca smeri in trenutni cilj

Študija je nato merila in motila aktivnost v **centralnem kompleksu** mušjih možganov, regiji, povezani z navigacijo.

> **Dva signala z različnima nalogama**
>
> EPG in FC2 sta imeni dveh populacij nevronov v centralnem kompleksu. Aktivnost EPG deluje kot odčitek kompasa: sledi smeri, v katero je muha trenutno obrnjena glede na veter. Aktivnost FC2 je povezana s smerjo, v katero muha poskuša potovati. Nižje ležeče krmilno vezje lahko primerja trenutno smer s tem ciljem. Študija preizkuša obe populaciji, vendar ne pokaže, da bi katerakoli sama shranjevala ves spomin.

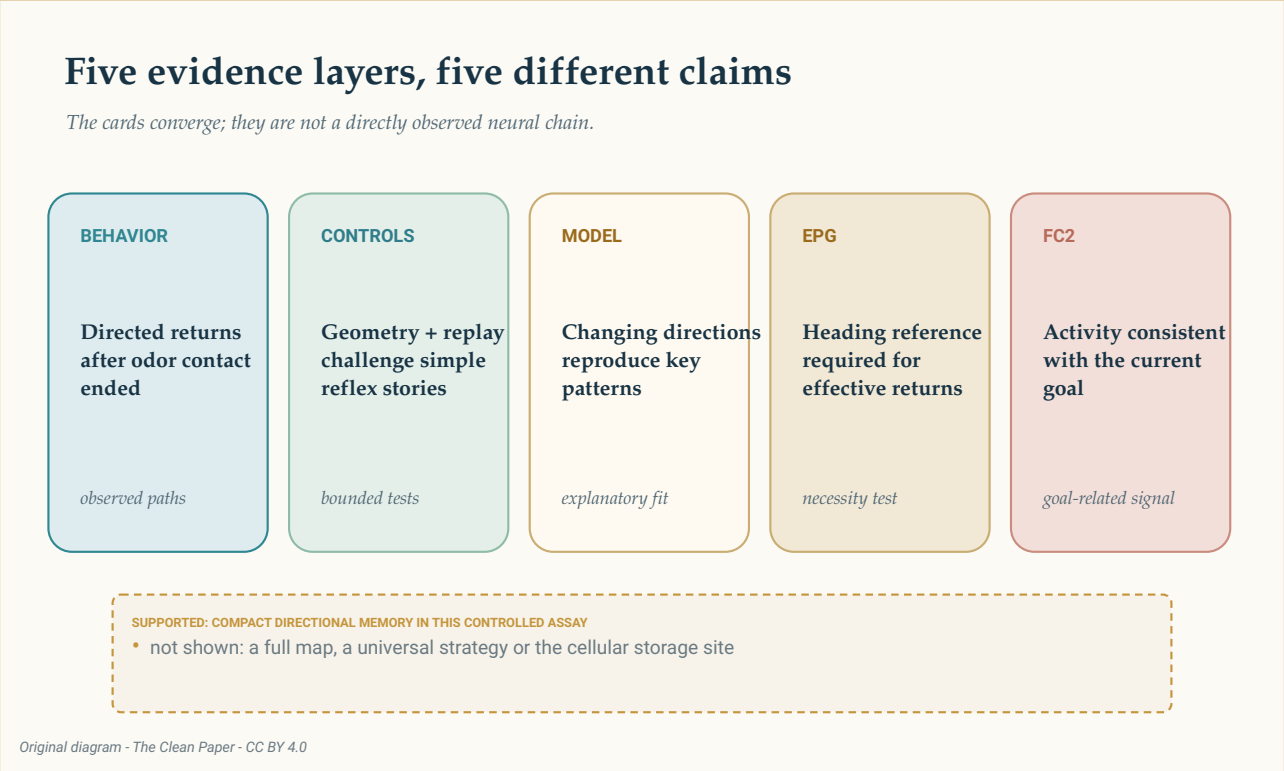
Nevroni EPG nosijo signal smeri: vzorec njihove aktivnosti sledi smeri, v katero je muha obrnjena glede na zunanji znak. S slikanjem kalcija, posrednim optičnim odčitkom živčne aktivnosti, so raziskovalci ugotovili, da je faza aktivnosti EPG med sledenjem robu sledila smeri glede na veter. Analiza je uporabila 16 poskusov pri 9 muhah.

Za zaviranje nevronov EPG so jih gensko spremenili tako, da so izražali **GtACR1**, anionski kanal, ki se vključi z zeleno svetlobo. LED je med celotnim preizkusnim poskusom ostala prižgana, aktivirala kanal in zavirala izbrane nevrone; ista osvetlitev ni prizadela muh v genetski kontrolni skupini.

Ko so na ta način zavrli nevrone EPG, je 12 poskusnih muh opravljalo manj učinkovite usmerjene vrnitve kot 6 genetsko kontrolnih muh. Omejeni sklep je, da je bila referenca smeri, ki jo je nosila aktivnost EPG, potrebna za učinkovito sledenje robu v preizkušenih pogojih. To ni dokaz, da so nevroni EPG sami shranjevali smer meje.

Nevroni FC2 so kazali drugačen odnos. Njihova populacijska aktivnost je bila povezana s trenutnim navigacijskim ciljem in je pred obrati v testu kazala proti meji vonjalnega oblaka. Pri slikanju so

uporabili 6 muh, primerjave pri utišanju pa skupine od 9 do 14 muh, odvisno od analize. Utišanje je poslabšalo sledenje robu.



Vedenje, spremenjena geometrija vonjalnega oblaka, prilagojen model in dve motnji živčne aktivnosti podpirajo različne dele razlage s smernim spominom. Skupaj podpirajo kompakten cilj v smeri v tem nadzorovanem testu, ne popolnega zemljevida ali dokazanega celičnega mesta shranjevanja.

The Clean Paper CC BY 4.0

To so konvergentni dokazi, ne fotografirana veriga vzrokov. Aktivnost EPG je zagotavljala potrebno referenco smeri. Aktivnost FC2 je bila skladna s ciljno smerjo in potrebna za učinkovito vedenje. Poskusi niso našli enega samega spominskega »engrama« in niso dokazali, da smer fizično shranjujejo sinapse FC2.

Kot grobo človeško analogijo si predstavljajte, da stopite iz ozkega pasu megle, medtem ko vam enakomeren veter še vedno pove, kje je sever. Kompas vam pove, v katero smer gledate, toda za vrnitev v meglo potrebujete tudi zapomnjeno smer do njenega roba. Primerjava trenutne smeri z želeno pove, v katero smer se obrniti. Takšno delitev dela tukaj nakazujeta signala EPG in FC2. Gre za razlagalno analogijo, ne dokaz, da ljudje uporabljajo iste celice ali algoritem.

Spomin je bil odvisen od dejanja, ne samo od časovnega zaporedja vonja

V poskusu ponovitve so muhe prejele isto zaporedje časov vonja kot prej, vendar časovni potek ni bil več povezan s tem, kar so trenutno počele. Naučena smerna pristranskost je skozi zaporedne epizode ponovitve oslabela. To podpira **operantno**, z dejanjem povezano posodabljanje: pomembna ni bila samo pasivna izpostavljenost zaporedju vonja, temveč odnos med vonjem in gibanjem muhe.

Imenovalec se med temi analizami spreminja. Plošče razširjenih podatkov vključujejo 8 ali 9 muh, odvisno od primerjave; serija zaporednih epizod uporablja 8 muh; prikazi poti zahtevajo najmanj 10 učinkovitih vstopov; povezane plošče modela pa uporabljajo 21 simuliranih poti, ki prav tako dosežejo ta prag. To ni en združen vzorec osmih muh.

Bolj nepravilen oblak je bil koristen, vendar še vedno virtualen

Raziskovalci so predvajali tudi prej posnet, bolj nepravilen vonjalni oblak. V prostoru in času so ga povečali petkrat, da so ga privezane muhe lahko dovolj pogosto srečevale. **Deset od 12 muh** je prišlo na manj kot 50 virtualnih milimetrov od njegovega izvora.

To ni deset muh, ki bi našle resnični izvor na prostem. Gre za uspešnost v nadzorovanem predvajanju naravnemu podobnega oblaka.

Za vsak tip dinamičnega oblaka je model ustvaril 2.000 poti. Primerjava s povečanim oblakom je analizirala 1.850 od 2.000, potem ko je zahtevala učinkovit vstop in izključila poti, ki so se začele preblizu izvora. Spomin je bolj pomagal blizu izvora, kjer so zaporedna srečanja ohranila koherentno smerno strukturo, in manj v bolj turbulentnem območju dlje z vetrom.

Ta omejitev je del rezultata. Kompaktna smer lahko pomaga le, če svet ostane dovolj koherenten, da prejšnje srečanje pove nekaj uporabnega o naslednjem.

Česa študija ne pokaže

- **Ne** pokaže, da muha gradi popoln prostorski zemljevid.
- **Ne** pokaže prostega leta skozi nespremenjen naravni vonjalni oblak.
- **Ne** vzpostavi, da vsa navigacija po vonju uporablja to strategijo.
- **Ne** pokaže, da so nevroni EPG ali FC2 izključno fizično mesto shranjevanja spomina.
- **Ne** spremeni prilagojenega modela v dobesedni biološki algoritem muhe.
- **Ne** posploši neposredno na človeško navigacijo.

Študija je najmočnejša tam, kjer je najbolj specifična. Nadzor v zaprti povratni zanki je raziskovalcem dal natančen dostop do vsakega srečanja z vonjem. Spremembe geometrije, ponovitev, modeliranje, slikanje kalcija in utišanje so nato preizkusili različne dele ene razlage. Vendar so bile vedenjske skupine, skupine za slikanje in za utišanje ločene; velikosti vzorcev niso bile vnaprej določene; zbiranje in analiza podatkov nista bila randomizirana ali slepa; manj kot 10 % privezanih muh pa je bilo izključenih zaradi težav s privajanjem, odzivanjem ali sledenjem.

Te omejitve pojava ne izbrišejo. Določijo njegove meje.

Kratek povzetek

Privezane vinske mušice, ki so hodile skozi virtualni vonjalni koridor, so se po tem, ko so vonj pustile za sabo, večkrat vrnile k meji. Spremembe koncentracije in geometrije koridorja, prilagojen preklopni model, slikanje živčne aktivnosti in optogenetsko utišanje podpirajo razlago, po kateri muha uporablja kompakten zapomnjen smerni podatek namesto popolnega zemljevida. Nevroni EPG so zagotavljali potrebno referenco trenutne smeri, aktivnost FC2 pa je bila skladna s trenutno ciljno smerjo. Rezultat je omejen na nadzorovan test hoje; ne določa celičnega mesta shranjevanja spomina in ne pokaže istega izračuna pri prostem naravnem letu.

Preverjanje brez olepševanja

Kaj članek pokaže: V privezanem testu z zaprto povratno zanko so se muhe usmerjeno vračale k virtualnim mejam vonja, ki jih niso več mogle zaznati. Več vedenjskih kontrol, modeliranje in živčne motnje podpirajo strategijo, ki temelji na vektorju.

Kaj je sklepano: Da vedenje uporablja kompakten smerni spomin in da populacijska aktivnost FC2 predstavlja trenutni navigacijski cilj. Vsebina spomina ni bila neposredno prebrana.

Česa članek ne pokaže: Popolnega miselnega zemljevida, univerzalne strategije za navigacijo po vonju, uspešnosti v prostem letu skozi naravni oblak, enega mesta shranjevanja spomina ali človeškega analoga.

Glavne omejitve: Ena vrsta in nadzorovana naprava; različne skupine muh in različne enote analize med poskusi; posredni kalcijevi signali; testi nujnosti, ki ne dokazujejo zadostnosti; ter naravnemu podoben oblak, ki je bil predvajan in prostorsko-časovno povečan.

Koliko zaupanja naj ima splošni bralec? Veliko zaupanje, da je pojav usmerjenega vračanja v tej napravi resničen in da sta za vedenje pomembna signala trenutne smeri in cilja v centralnem kompleksu. Zmerno zaupanje v model kot kompaktno razlago. Malo zaupanja v trditve, ki bi ga nespremenjenega razširile na odprto okolje ali ga imenovale popoln zemljevid.

Viri

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