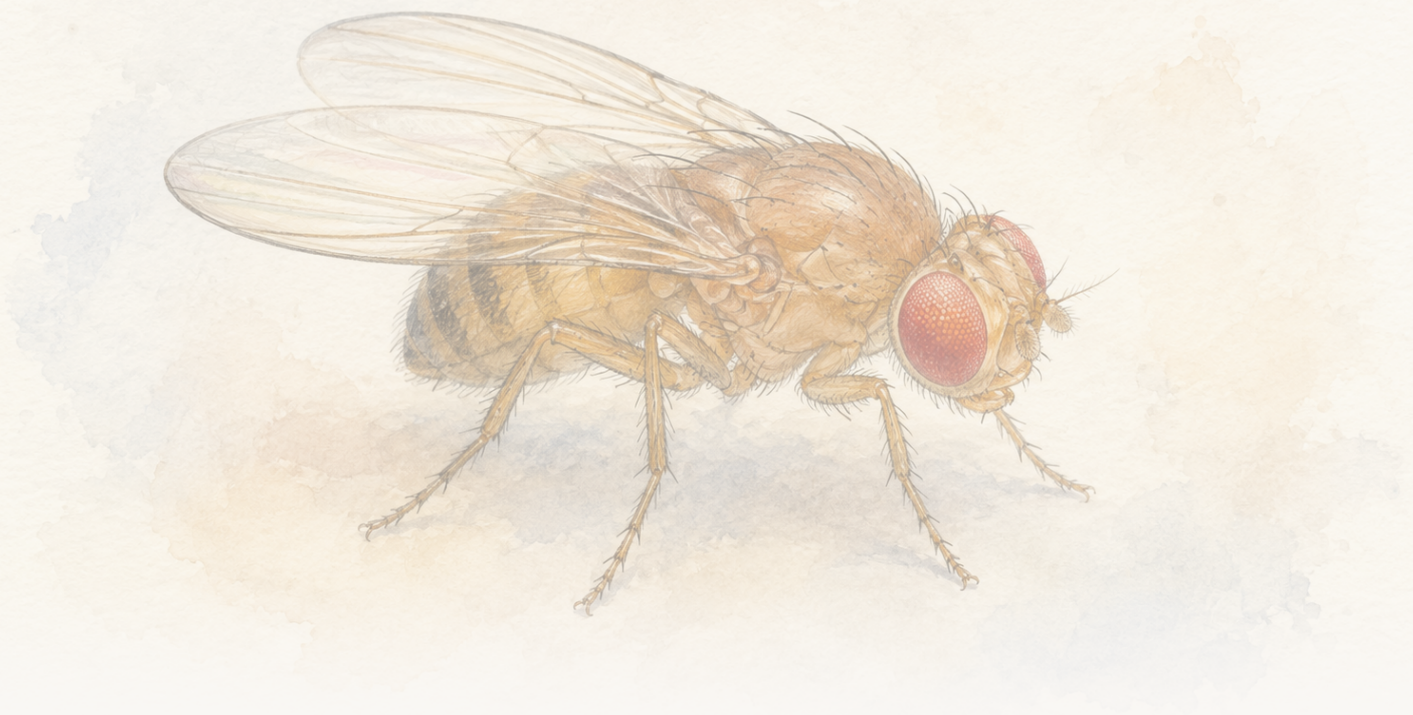


The Clean Paper

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

Muva može izgubiti miris i ipak se okrenuti nazad. U virtuelnom mirisnom tragu pomogao joj je zapamćeni smer

Privezane vinske mušice više puta su se vraćale granici mirisa nakon što bi ušle u čist vazduh. Ponašanje, modeliranje i neuronske perturbacije podržavaju kompaktnu memoriju smera, a ne potpunu kartu. Rezultat dolazi iz kontrolisanog eksperimenta u virtuelnoj stvarnosti i još ne pokazuje istu strategiju u slobodnom prirodnom 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

Muva može izgubiti miris i ipak se okrenuti nazad prema njemu

Muva je ostavila miris iza sebe.

Nastavila je hodati kroz čist vazduh, ponekad desecima sekundi i stotinama virtuelnih milimetara. Zatim se okrenula prema granici koju je prešla i ponovo pronašla miris. U tom trenutku sam miris više nije mogao pokazati put nazad.

To je centralno opažanje nove studije u Natureu o navigaciji vinskih mušica. Istraživači tvrde da su muve koristile kompaktnu memoriju smera: ne kartu celog mirisnog traga i ne memoriju pređene udaljenosti, nego zapamćeni pravac prema granici koju više nisu mogle osetiti.

Rezultat je upečatljiv jer pokazuje koliko malo sačuvanih informacija može biti dovoljno. Takođe ga je lako preuveličati. Te muve nisu slobodno letele prirodnim pejzažom. Hodale su privezane na kugli nošenoj vazduhom unutar strogo kontrolisanog virtuelnog sveta. Studija podržava strategiju zasnovanu na vektoru u toj aparaturi; ne pokazuje da muve grade mentalne karte, ne objašnjava svaki način na koji životinje slede mirise niti identifikuje ćelije u kojima je memorija fizički sačuvana.

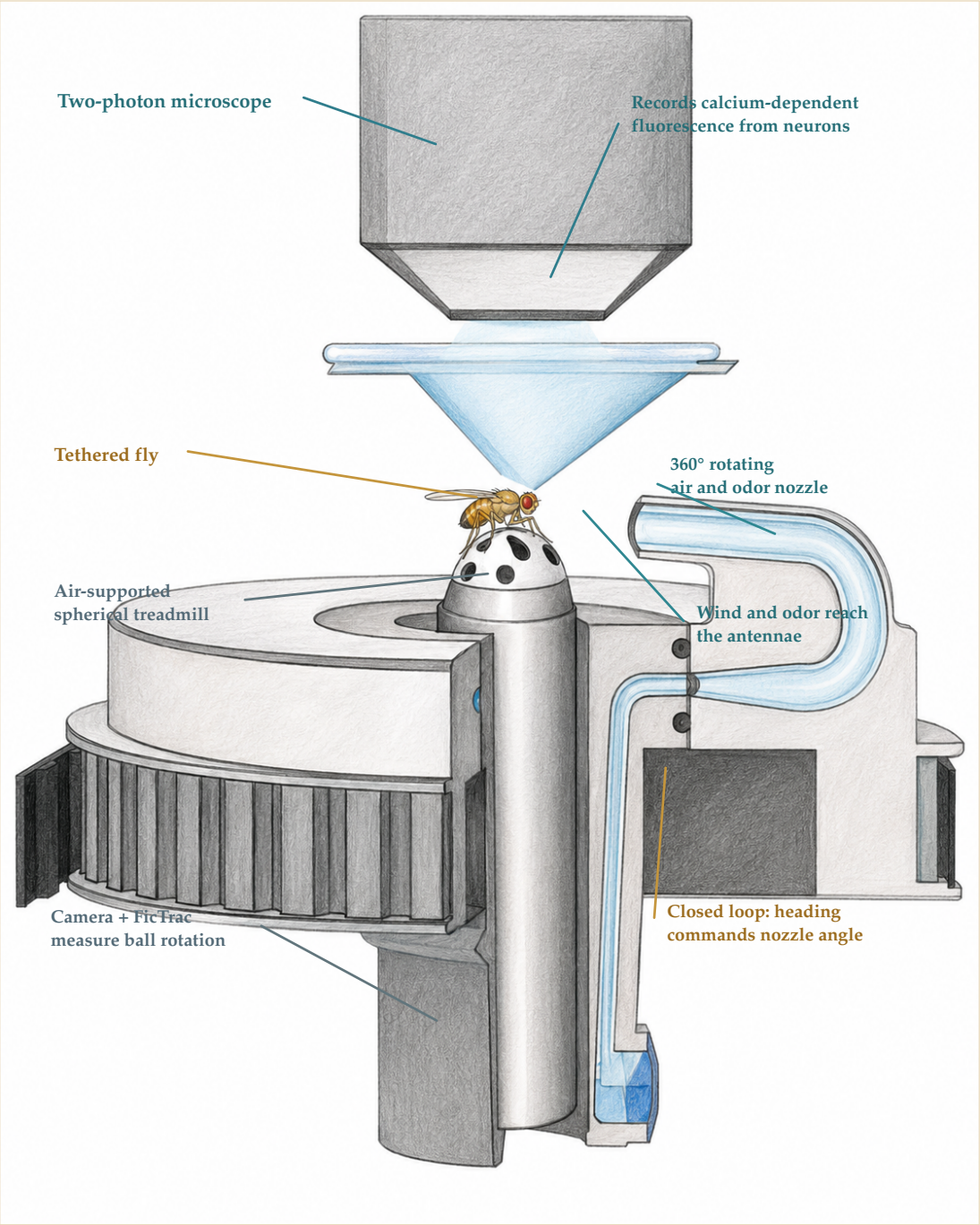
Nevidljivi koridor stvorio je softver

Mirisni trag je pokretno područje mirisa koje nosi vazduh. Na otvorenom se trag savija, prekida i ponovo spaja kako se vetar menja. Zbog toga je teško tačno znati što je životinja mirisala u svakom trenutku.

Istraživači su problem učinili kontrolisanim pomoću **virtuelne stvarnosti sa zatvorenom petljom**. Telo muve bilo je privezano na mestu iznad lagane kugle koja lebdi na vazduhu. Dok je muva hodala, kamera je merila rotaciju kugle oko 60 puta u sekundi. Softver je tu rotaciju pretvarao u virtuelni dvodimenzionalni položaj i smer.

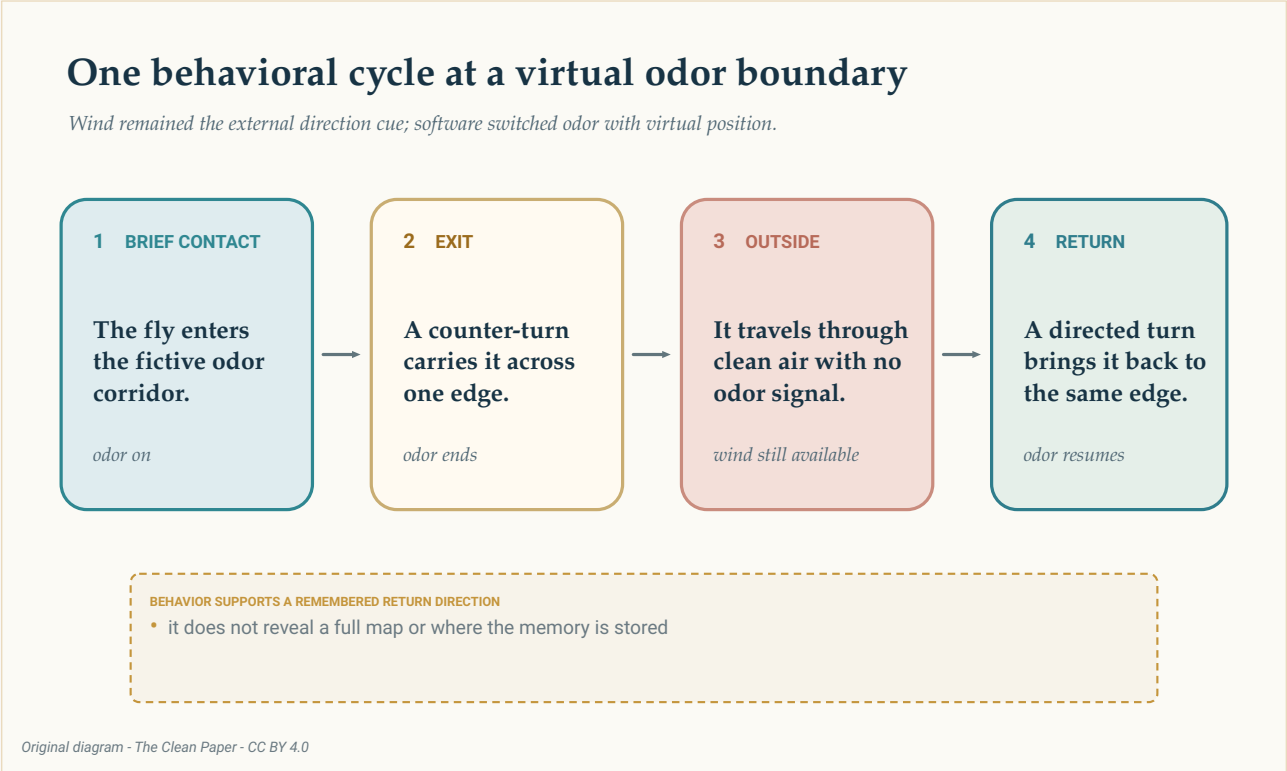
Taj je smer upravljao motoriziranom mlaznicom koja se mogla okretati kroz 360 stepeni. Kako je muva menjala virtuelni smer, mlaznica se pomerala oko nje kako bi vetar ostao poravnat sa stabilnim smerom u virtuelnom svetu. Istovremeno su regulatori masenog protoka menjali količinu čistog vazduha ili mirisa jabukovog sirćeta koji je dopirao do ticala, zavisno o virtuelnom položaju muve. Prelazak softverski definisane granice zato je uključivao ili isključivao miris i stvarao zamišljeni koridor širok 50 milimetara i dug jedan metar iako muva nikada nije napustila kuglu.

Aparatura je davala sinhronizovani zapis virtuelnog položaja muve, smera, stanja mirisa i kontrola strujanja vazduha u svakom trenutku. Iz tog su zapisa istraživači rekonstruisali putanje, označili svaki ulazak i izlazak i izmerili koliko se direktno muva vraćala. Vetar je davao spoljašnji smerni orijentir; sopstveno kretanje muve određivalo je kada će susresti bilo koju stranu virtuelne mirisne granice.



Muva je ostala privezana iznad kugle nošene vazduhom. Kamera i FicTrac pretvarali su rotaciju kugle u virtuelno kretanje i smer; softver je zatim okretao mlaznicu vazduha i mirisa te uključivao miris prema virtuelnom položaju. Tokom zasebnih eksperimenta neuralnog snimanja dvofotonski mikroskop iznad muve beležio je fluorescenciju zavisnu o kalciju iz EPG ili FC2 neurona, omogućujući usklađivanje neuronske aktivnosti s ponašanjem. Mikroskop nije bio potreban u svakom eksperimentu ponašanja.

The Clean Paper CC BY 4.0



U kontrolisanom eksperimentu muva bi nakratko ušla u virtuelni mirisni koridor, izašla iz njega, putovala kroz vazduh bez mirisa i izvela usmeren povratak. Ponašanje podržava zapamćeni smer povratka; ne otkriva gde je ta informacija sačuvana.

The Clean Paper CC BY 4.0

U glavnom eksperimentu s **vertikalnim koridorom**, **40 muva** više puta je ulazilo u miris, protupokretom izlazilo iz njega i vraćalo se na isti rub. „Vertikalan" je naziv rada za geometriju od 0 stepeni: duga os koridora bila je paralelna smeru uz vetar. Ne znači da je aparatura bila postavljena uspravno.

Autori taj obrazac nazivaju **praćenjem ruba**. **Epizoda** je jedna kontinuirana faza između prelazaka granice: unutrašnja epizoda traje od ulaska do izlaska, a spoljašnja od izlaska do povratka muve. U 755 unutrašnjih epizoda poseta je prosečno trajao 4,9 sekundi. Tokom povrataka srednja udaljenost od granice bila je 10,4 milimetra. Manje od 4% od 793 epizode prešlo je ceo put do suprotnog ruba koridora.

Ta zadnja dva broja opisuju epizode, a ne stotine nezavisnih muva. Razlika je važna jer jedna životinja može doprineti mnogim epizodama.

Povratci nisu bili samo fiksni refleks uz vetar

Nekoliko eksperimenta testiralo je jednostavnija objašnjenja.

Istraživači su prvo promenili što se događa **duž** koridora dok je muva hodala uz vetar. Miris je mogao postajati jači prema virtuelnom izvoru, ostati konstantan ili postajati slabiji. Muve su u sva tri slučaja davale slične putanje. Jednostavno pravilo poput „nastavi tamo gde miris postaje jači" zato ne može

objasniti praćenje ruba u ovoj aparaturi.

Zatim su ublažili **bočni** rub koridora u Gaussov profil, gde se koncentracija menjala postupno umesto naglog uključivanja i isključivanja. Muve su se skupljale uz bok na kojem se koncentracija menjala najbrže, a ne u centru gde je miris bio najjači. Relevantan znak bila je dakle bočna promena koja je označavala efektivnu granicu, a ne nužno povećanje prema izvoru duž koridora.

To ne znači da gradijenti koncentracije nikada nisu važni u prirodi. Znači da povećanje prema izvoru nije bilo potrebno za ovo ponašanje u testiranim uslovima.

Istraživači su promenili i orijentaciju koridora. Odvojene grupe pratile su vertikalne koridore te koridore od 45 i 90 stepeni, a druga grupa susrela je koridor koji bi nakon izlazaka skočio postrance. Veličine grupa bile su 40, 21, 20 i 24 muve. Njihove spoljašnje putanje menjale su se s geometrijom. Opšte pravilo poput „uvek se okreni uz vetar" ne može objasniti tu fleksibilnost.

U ovoj postavi miris je do dvaju ticala stizao unutar otprilike dve milisekunde. Uparivanje bilateralne optogenetske aktivacije s vetrom moglo je reprodukovati obrazac nalik praćenju ruba. **Optogenetika** koristi proteine osetljive na svetlost za menjanje aktivnosti izabranih ćelija. Ovde rezultat sugeriše da razlika u vremenu dolaska mirisa levo nasuprot desno nije bila nužna za ovo ponašanje. Ne čini bilateralnu poređenje nevažnom za slobodno pokretne životinje u drugim mirisnim tragovima.

Vektor je manji od karte

Vektor je smer zajedno s veličinom. Korisna sačuvana veličina ovde bila je uglavnom smerna: na koju se stranu muva treba okrenuti da dođe do granice mirisnog traga? Studija nije pronašla dokaze da je muva sačuvala puni raspored traga ili sopstveni položaj unutar njega.

Autori su prvo napravili veštačke putanje preslagivanjem sastojaka stvarnog kretanja muva. Nasumično su izvlačili opažene dužine ravnog hoda i uglove skretanja te ih spajali. Neki od tih sintetskih hodača na kraju bi opet pogodili granicu mirisa, ali lutali su dalje i išli manje direktnim rutama od pravih muva. Čak ni dodavanje uobičajene sklonosti muva da se okreću uz vetar nije reproduciralo kratke, usmerene povratke. Stvarno ponašanje zato je sadržalo više smerne informacije nego nasumična mešavina istih pokreta.

Istraživači su zatim izgradili model s dva režima: **napusti granicu** i **vrati se na granicu**. Ti režimi nisu bili oznake svakog trenutka unutar ili izvan mirisa. Bili su alternativna pravila upravljanja koja su se mogla menjati tokom kretanja muve.

Svaki prelazak granice davao je modelu smer koji treba zapamtiti. Pri izlasku ažurirao je smer korišćen tokom udaljavanja. Pri ulasku ažurirao je zaseban smer povratka: u biti, „kada sam pronašao granicu, kretao sam se ovako". Tokom kasnijeg povratka taj zapamćeni smer pristranio je kretanje simulirane muve nazad prema rubu.

Istraživači su prilagodili model putanjama kroz koridore od 0, 45 i 90 stepeni. U sažetoj poređenju 72 stvarne muve i 75 simulacija dale su slične statistike putanja. Kada se uklonio smer povratka naučen pri ulasku, praćenje je postalo manje efikasno u svim orijentacijama koridora. To podržava korisnost

memorije smera pri ulasku; ne dokazuje da mozak muve doslovno izvršava jednačine modela.

> **What „memorija" znači u ovom radu?**
>
> Istraživači nisu direktno pročitali sačuvanu strelicu iz mozga muve. „Smerna memorija" zaključak je potkrepljen ponašanjem, modelom i neuronskim merenjima. Model kaže da nekoliko promenljivih smerova može reprodukovati važne statistike putanja. Ne dokazuje da muva doslovno implementira jednačine niti da je jedna imenovana grupa neurona mesto pohrane.

Dodatno iskustvo sa segmentom od 45 stepeni orijentiranim u suprotnom smeru promenilo je kasnije ponašanje u 10 muva, uporedno s 29 simulacija modela. Time je smerno objašnjenje specifičnije od naknadnog opisa, iako i dalje ostaje interpretacija zasnovana na modelu.

Referenca smera i trenutni cilj

Studija je zatim merila i ometala aktivnost u **centralnom kompleksu** mozga muve, području uključenom u navigaciju.

> **Two signala s različitim poslovima**
>
> EPG i FC2 nazivi su dveju populacija neurona u centralnom kompleksu. EPG aktivnost deluje poput očitanja kompasa: prati smer u kojem je muva trenutno okrenuta u odnosu na vetar. FC2 aktivnost povezana je sa smerom u kojem muva pokušava putovati. Nizvodni sklop za upravljanje može uporediti trenutni smer s tim ciljem. Studija testira obe populacije, ali ne pokazuje da bilo koja od njih sama čuva celu memoriju.

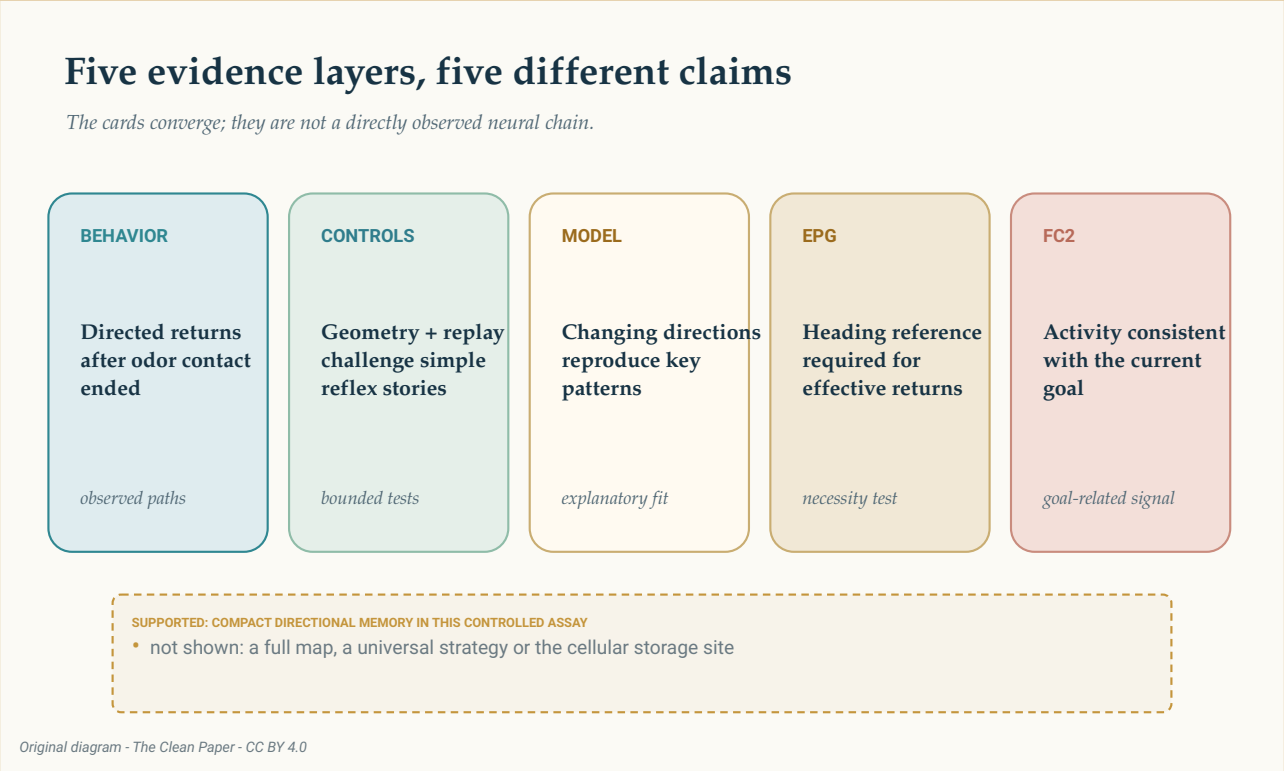
EPG neuroni nose signal smera: njihov obrazac aktivnosti prati smer u kojem je muva okrenuta u odnosu na spoljašnji orijentir. Kalcijumovim snimanjem, indirektnim optičkim očitanjem neuronske aktivnosti, istraživači su utvrdili da je faza EPG aktivnosti pratila smer u odnosu na vetar tokom praćenja ruba. Analiza je koristila 16 eksperimenta na 9 muva.

Kako bi inhibirali EPG neurone, istraživači su ih genetski konstruisali da izražavaju **GtACR1**, anionski kanal koji se uključuje zelenom svetlošću. LED je tokom celog testnog eksperimenta ostao uključen, aktivirao kanal i potiskivao izabrane neurone; ista rasveta nije ometala genetske kontrolne muve.

Kada su EPG neuroni tako inhibirani, 12 eksperimentalnih muva izvodilo je manje efikasne usmerene povratke od 6 genetskih kontrolnih muva. Ograničeni zaključak je da je referenca smera koju nosi EPG aktivnost bila potrebna za efikasno praćenje ruba u testiranim uslovima. To nije dokaz da su EPG neuroni sami sačuvali smer granice.

FC2 neuroni pokazali su drugačiji odnos. Njihova populacijska aktivnost bila je povezana s trenutnim navigacijskim ciljem i u eksperimentu je pre skretanja pokazivala prema granici mirisnog traga.

Snimanje je uključivalo 6 muva, a poređenja utišavanja grupe od 9 do 14 muva zavisno o analizi. Utišavanje je oslabilo praćenje ruba.



Ponašanje, promenjena geometrija mirisnog traga, prilagođeni model i dve neuronske perturbacije podržavaju različite delove objašnjenja smernom memorijom. Zajedno podržavaju kompaktan ciljni smer u ovom kontrolisanom eksperimentu, a ne potpunu kartu ili dokazano ćelijsko mesto pohrane.

The Clean Paper CC BY 4.0

To su konvergentni dokazi, a ne fotografirani lanac uzročnosti. EPG aktivnost pružala je nužnu referencu smera. FC2 aktivnost bila je u skladu sa ciljnim smerom i bila je potrebna za efikasno ponašanje. Eksperimenti nisu locirali jedan memorijski „engram” niti dokazali da FC2 sinapse fizički čuvaju smer.

Kao gruba analogija na ljudskoj nivou, zamislite da izađete iz uskog pojasa magle dok vam stabilan vetar i dalje govori gde je sever. Kompas vam može reći kamo ste okrenuti, ali povratak prema magli zahteva i zapamćeni pravac prema njenu rubu. Poređenje trenutnog smera s tim željenim pravcem govori vam kamo skrenuti. To je podela rada koju ovde sugerišu EPG i FC2 signali. To je objašnjavajuća analogija, a ne dokaz da ljudi koriste iste ćelije ili algoritam.

Memorija je zavisila o delovanju, a ne samo o vremenu mirisa

U eksperimentu reprodukcije muve su dobile isti sled vremena mirisa kao pre, ali vreme više nije bilo povezano s onime što su trenutno radile. Naučena smerna pristranost slabila je kroz epizode reprodukcije. To podržava **operantno** ažuriranje povezano s delovanjem: nije bila važna samo pasivna izloženost sledu mirisa, nego odnos između mirisa i kretanja muve.

Nazivnik se kroz te analize menja. Paneli proširenih podataka uključuju 8 ili 9 muva zavisno o poređenju; serija uzastopnih epizoda koristi 8 muva; paneli putanja zahtevaju najmanje 10 efikasnih ulazaka; a upareni paneli modela koriste 21 simuliranu putanju koja takođe zadovoljava taj prag ulazaka. To nije jedan objedinjeni uzorak od osam.

Nepravilniji mirisni trag bio je koristan, ali i dalje virtuelan

Istraživači su takođe reprodukovali ranije zabeležen, nepravilniji mirisni trag. Povećali su ga pet puta u prostoru i vremenu kako bi ga privezane muve mogle dovoljno često susresti. **Deset od 12 muva** stiglo je unutar 50 virtuelnih milimetara od izvora.

To nije deset muva koje su pronašle stvarni izvor na otvorenom. To je efekat u kontrolisanoj reprodukciji prirodnolikog mirisnog traga.

Za svaku vrstu dinamičkog traga model je generirao 2.000 putanja. Poređenje skaliranog traga analizirala je 1.850 od tih 2.000 nakon zahteva za efikasnim ulaskom i isključivanja putanja koje su počele preblizu izvoru. Memorija je više pomagala blizu izvora, gde su uzastopni susreti zadržavali koherentnu smernu strukturu, a manje u turbulentnijem području dalje niz vetar.

Ta je ograda deo rezultata. Kompaktan smer može pomoći samo kada svet ostaje dovoljno koherentan da prethodni susret govori nešto korisno o sledećem.

Šta studija ne pokazuje

- **Ne** pokazuje da muva gradi potpunu prostornu kartu.
- **Ne** pokazuje slobodan let kroz neizmenjeni prirodni mirisni trag.
- **Ne** utvrđuje da sva navigacija vođena mirisom koristi ovu strategiju.
- **Ne** pokazuje da su EPG ili FC2 neuroni isključivo fizičko mesto pohrane memorije.
- **Ne** pretvara prilagođeni model u doslovni biološki algoritam muve.
- **Ne** generalizira se direktno na ljudsku navigaciju.

Studija je najsnažnija tamo gde je najspecifičnija. Kontrola sa zatvorenom petljom omogućila je istraživačima precizan pristup svakom susretu s mirisom. Promene geometrije, reprodukcija, mod-

eliranje, kalcijumovo snimanje i utišavanje zatim su testirali različite delove jednog objašnjenja. Ali kohorte za ponašanje, snimanje i utišavanje bile su odvojene; veličine uzorka nisu unapred određene; prikupljanje i analiza podataka nisu bili randomizovani ni zaslepljeni; a manje od 10% privezanih muva isključeno je zbog problema s prilagodbom, odgovorom ili praćenjem.

Ta ograničenja ne brišu fenomen. Ona ga definišu.

Kratak rezime

Privezane vinske mušice koje su hodale kroz virtuelni mirisni koridor više puta su se vraćale granici nakon što bi ostavile miris iza sebe. Promene koncentracije i geometrije koridora, prilagođeni model prebacivanja, neuralno snimanje i optogenetsko utišavanje podržavaju objašnjenje prema kojem muva koristi kompaktan zapamćeni smer, a ne potpunu kartu. EPG neuroni davali su nužnu referencu smera, dok je FC2 aktivnost bila u skladu sa trenutnim ciljnim smerom. Rezultat je ograničen na kontrolisani eksperiment hodanja; ne identifikuje ćelijsko mesto pohrane memorije niti pokazuje isti izračun u slobodnom prirodnom letu.

Provera bez ulepšavanja

Šta rad pokazuje: U eksperimentu sa zatvorenom petljom i privezanom muhom, muve su izvodile usmerene povratke prema virtuelnim mirisnim granicama koje više nisu mogle osetiti. Više kontrola ponašanja, modeliranje i neuronske perturbacije podržavaju strategiju zasnovanu na vektoru.

Šta je izvedeno: Da ponašanje koristi kompaktnu smernu memoriju i da populacijska aktivnost FC2 predstavlja trenutni navigacijski cilj. Sadržaj memorije nije direktno očitan.

Šta rad ne pokazuje: Potpunu mentalnu kartu, univerzalnu strategiju mirisa, slobodan let u prirodnom mirisnom tragu, jedno mesto pohrane memorije ili ljudski analog.

Glavna ograničenja: Jedna vrsta i kontrolisana aparatura; različite kohorte muva i jedinice analize kroz eksperimente; indirektni kalcijumovi signali; testovi nužnosti koji ne dokazuju dovoljnost; te prirodnoliki mirisni trag koji je reprodukovan i skaliran.

Koliko poverenja treba da ima prosečan čitalac? Visoko poverenje da je fenomen usmerenog povratka stvaran u ovoj aparaturi i da su centralno-kompleksna aktivnost smera i cilja važne. Umereno poverenje u model kao kompaktno objašnjenje. Nisko poverenje u tvrdnju koja ga neizmenjena prenosi na otvoreni vazduh ili ga naziva potpunom kartom.

Izvori

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