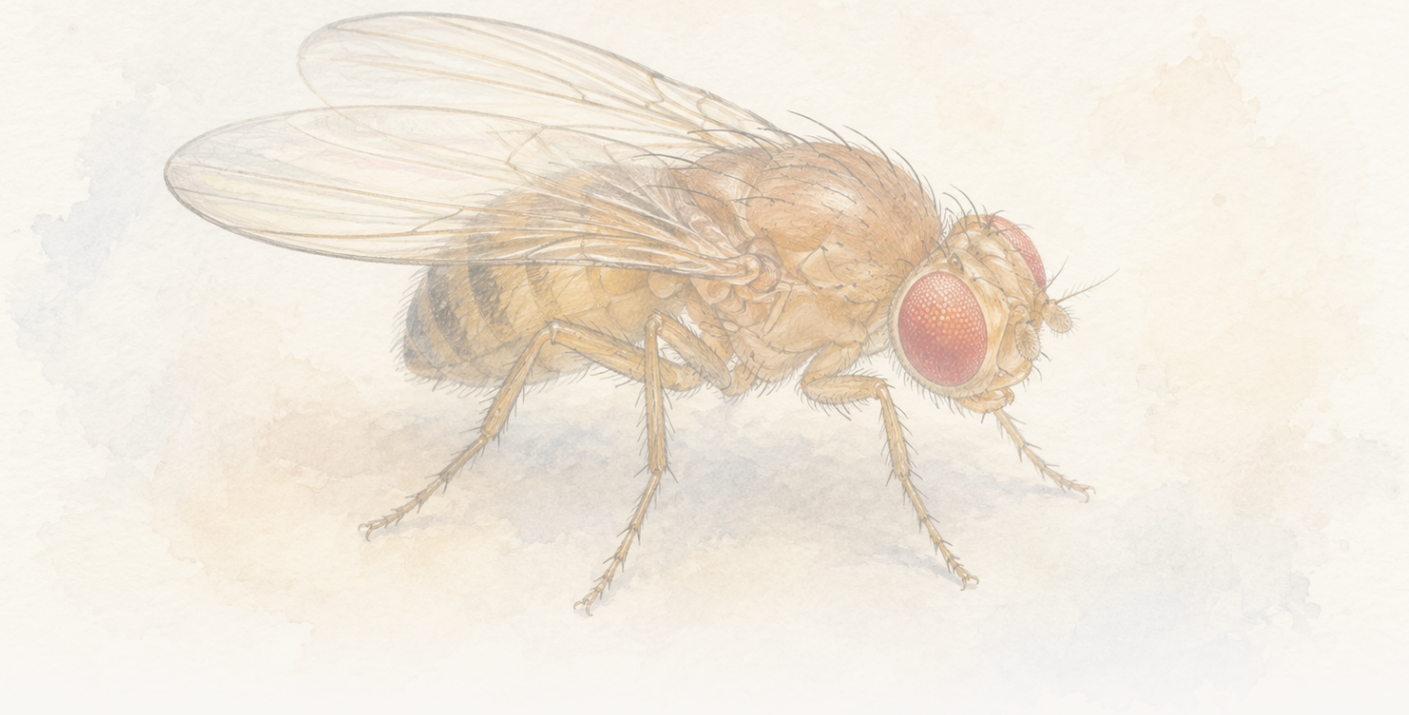


The Clean Paper

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

Една муха може да изгуби миризмата и все пак да се върне. Във виртуален шлейф ѝ помогна запомнена посока

Прикрепени плодови мушици многократно се връщат към миризмена граница, след като са навлезли в чист въздух. Поведение, моделиране и невронни намеси подкрепят компактна памет за посока, а не пълна карта. Резултатът идва от контролирано изпитване във виртуална реалност и все още не показва същата стратегия при свободен естествен полет.

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

Една муха може да изгуби миризмата и все пак да се обърне обратно към нея

Мухата беше оставила миризмата зад себе си.

Тя продължаваше да върви през чист въздух — понякога десетки секунди и стотици виртуални милиметри. След това се обръщаше към границата, която беше прекосила, и отново намираше миризмата. В този момент самата миризма не можеше да посочи обратния път.

Това е централното наблюдение в ново изследване в Nature върху навигацията на плодовите мушици. Изследователите твърдят, че мухите използват компактна памет за посока: не карта на целия миризмен шлейф и не спомен за изминатото разстояние, а запомнен курс към граница, която вече не може да бъде усетена.

Резултатът е впечатляващ, защото показва колко малко съхранена информация може да бъде достатъчна. Лесно е обаче и да бъде преувеличен. Тези мухи не летят свободно през естествен пейзаж. Те вървят, прикрепени над поддържана от въздух топка, в строго контролирана виртуална среда. Изследването подкрепя стратегия, основана на вектор, в тази апаратура; то не показва, че мухите изграждат мисловни карти, не обяснява всеки начин, по който животните следват миризми, и не установява в кои клетки физически се съхранява паметта.

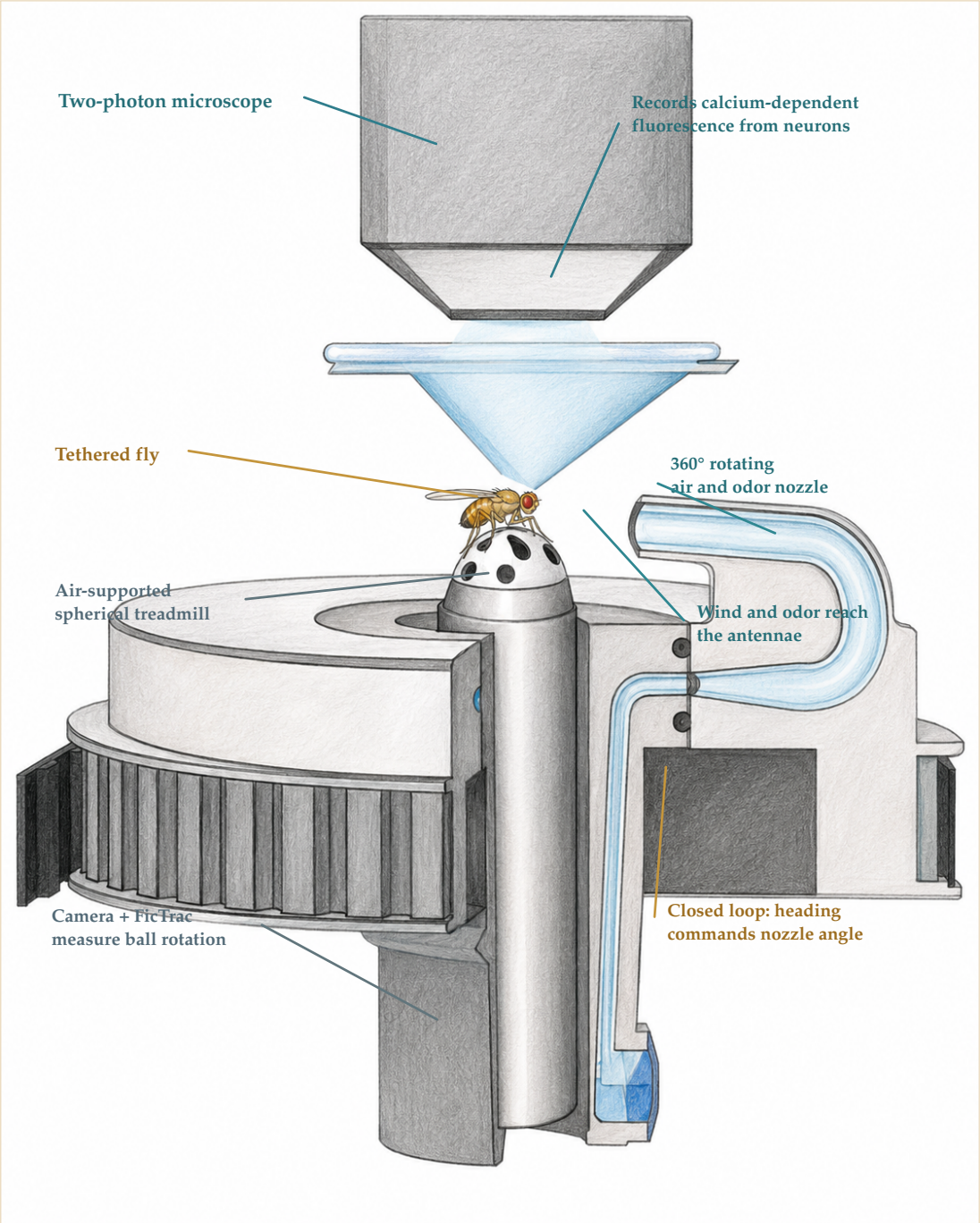
Невидимият коридор е създаден от софтуер

Миризменият шлейф е движещата се област от миризма, носена от въздуха. Навън шлейфът се огъва, разкъсва и свързва отново с промяната на вятъра. Това затруднява точното определяне какво е усещало животното във всеки момент.

Изследователите правят проблема контролируем с **виртуална реалност със затворен контур**. Тялото на мухата е прикрепено на място над лека топка, плаваща върху въздух. Докато мухата върви, камера измерва въртенето на топката около 60 пъти в секунда. Софтуерът превежда това въртене във виртуално двуизмерно положение и ориентация.

Тази ориентация управлява моторизирана дюза, способна да се завърта на 360 градуса. Докато мухата променя виртуалната си посока, дюзата се движи около нея, за да поддържа вятъра подравнен със стабилна посока във виртуалния свят на мухата. Едновременно с това регулатори на масовия поток променят количеството чист въздух или миризма на ябълков оцет, достигащо до антените, според виртуалното положение на мухата. Така прекосяването на софтуерно определена граница включва или изключва миризмата и създава фиктивен коридор, широк 50 милиметра и дълъг един метър, въпреки че мухата никога не напуска топката.

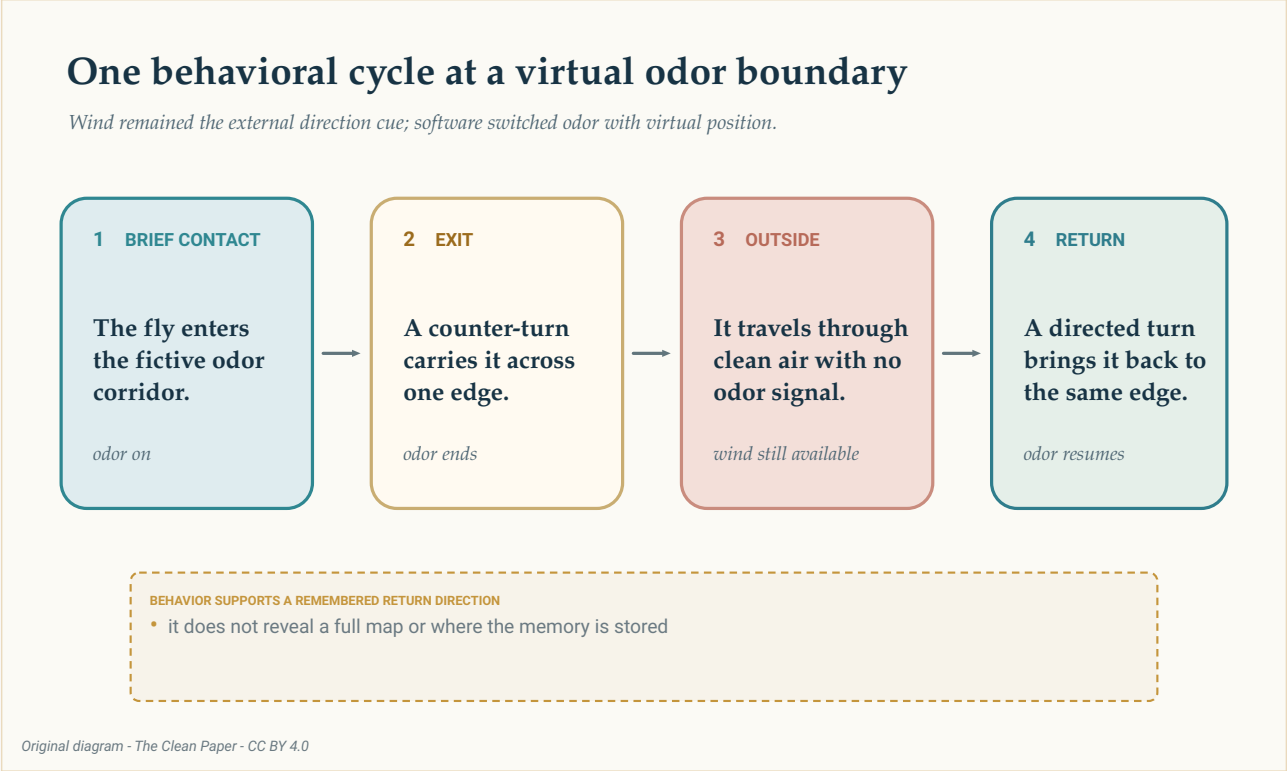
Апаратурата създава синхронизиран запис на виртуалното положение, ориентацията, състоянието на миризмата и управлението на въздушния поток във всеки момент. От този запис изследователите възстановяват траектории, отбелязват всяко влизане и излизане и измерват колко директно се връща мухата. Вятърът осигурява външния ориентир за посока; собственото движение на мухата определя кога тя среща едната или другата страна на виртуалната миризмена граница.



Мухата остава прикрепена над поддържана от въздух топка. Камера и FicTrac превръщат въртенето на топката във виртуално движение и ориентация; след това софтуерът завърта дюзата за въздух и миризма и превключва миризмата според виртуалното положение. При отделни изпитвания с невронно изобразяване двуфотонният микроскоп над мухата записва зависима от калция флуоресценция от EPG или FC2 неврони, което позволява невронната активност да бъде съпоставена с поведението.

Микроскопът не е необходим за всяко поведенческо изпитване.

The Clean Paper CC BY 4.0



В контролираното изпитване мухата навлиза за кратко във виртуалния миризмен коридор, напуска го, движи се през въздух без миризма и извършва насочено връщане. Поведението подкрепя запомнена посока на връщане; то не разкрива къде се съхранява тази информация.

The Clean Paper CC BY 4.0

В основния експеримент с **вертикален коридор 40 мухи** многократно навлизат в миризмата, правят обратен завой навън и се връщат до същия ръб. „Вертикален“ е названието в статията за геометрията при 0 градуса: дългата ос на коридора е успоредна на посоката срещу вятъра. Това не означава, че апаратурата е поставена изправена.

Авторите наричат този модел **проследяване на ръба**. Един **епизод** е непрекъснат интервал между две прекосявания на границата: вътрешният епизод е от влизане до излизане, а външният — от излизането до връщането на мухата. При 755 вътрешни епизода едно посещение продължава средно 4,9 секунди. По време на връщанията средното разстояние от границата е 10,4 милиметра. По-малко от 4% от 793 епизода прекосяват целия коридор до противоположния му ръб.

Последните две числа описват епизоди, не стотици независими мухи. Разграничението е важно, защото едно животно може да допринесе с много епизоди.

Връщанията не са просто фиксиран рефлекс срещу вятъра

Няколко експеримента проверяват по-прости обяснения.

Първо изследователите променят какво се случва **по дължината** на коридора, докато мухата върви срещу вятъра. Миризмата може да става по-силна към виртуалния източник, да остава постоянна или да отслабва. Мухите образуват сходни траектории и в трите случая. Следователно просто правило като „продължавай натам, където миризмата става по-силна“ не може да обясни проследяването на ръба в тази апаратура.

След това изследователите изглаждат **страничния** ръб на коридора в гаусов профил, при който концентрацията се променя постепенно, вместо да се включва рязко. Мухите се събират близо до склона, където концентрацията се изменя най-бързо, а не в центъра, където миризмата е най-силна. Следователно същественият сигнал е страничната промяна, обозначаваща ефективна граница, а не задължително нарастване към източника по дължината на коридора.

Това не означава, че концентрационните градиенти никога нямат значение в природата. Означава, че при изпитаните условия за това поведение не е необходимо нарастване към източника.

Изследователите променят и ориентацията на коридора. Отделни групи проследяват вертикални коридори, коридори под 45 градуса и под 90 градуса, а друга група среща коридор, който след излизане отскача странично. Размерите на групите са съответно 40, 21, 20 и 24 мухи. Външните им траектории се променят според геометрията. Общо правило като „винаги завивай срещу вятъра“ не може да обясни тази гъвкавост.

В тази апаратура миризмата достига двете антени в рамките на около две милисекунди. Съчетаването на двустранна оптогенетична активация с вятър може да възпроизведе модел, подобен на проследяване на ръба. **Оптогенетиката** използва светлочувствителни белтъци, за да изменя избрани клетки. Тук резултатът подсказва, че разлика ляво–дясно във времето на пристигане на миризмата не е необходима за това поведение. Това не прави двустранното сравнение без значение за свободно движещи се животни в други шлейфове.

Един вектор е по-малък от карта

Векторът е посока заедно с големина. Полезната съхранена величина тук е главно посочна: накъде трябва да завие мухата, за да достигне границата на шлейфа? Изследването не открива доказателства, че мухата съхранява пълна подредба на шлейфа или собственото си положение в него.

Първо авторите създават изкуствени траектории чрез разбъркване на съставните

части на реалното движение на мухите. Те избират на случаен принцип наблюдавани дължини на праволинейно движение и ъгли на завиване и ги съединяват. Някои от тези синтетични ходещи обекти в крайна сметка отново достигат границата на миризмата, но се отклоняват по-далеч и поемат по-малко директни маршрути от реалните мухи. Дори добавянето на обичайната склонност на мухите да завиват срещу вятъра не възпроизвежда кратките, насочени връщания. Следователно реалното поведение съдържа повече информация за посоката, отколкото случайна пренаредба на същите движения.

След това изследователите изграждат модел с два режима: **напускане на границата** и **връщане към границата**. Тези режими не са етикети за всеки момент вътре или извън миризмата. Те са алтернативни правила за насочване, които могат да се превключват, докато мухата се движи.

Всяко прекосяване на границата дава на модела посока за запомняне. При излизане той актуализира посока, използвана по време на отдалечаването. При влизане актуализира отделна посока за връщане: на практика „когато намерих границата, се движех натам“. При по-късно връщане тази запомнена посока накланя движението на симулираната муха обратно към ръба.

Изследователите напасват модела към траектории при коридори от 0, 45 и 90 градуса. В обобщеното сравнение 72 реални мухи и 75 симулации дават сходни статистики на траекториите. Когато посоката за връщане, научена при влизане, бъде премахната, проследяването става по-неефективно при всички ориентации на коридора. Това подкрепя полезността на памет за посоката при влизане; не доказва, че мозъкът на мухата буквално решава уравненията на модела.

> **Какво означава „памет“ в тази статия?**
>
> Изследователите не разчитат директно съхранена стрелка от мозъка на мухата. „Посочната памет“ е извод, подкрепен от поведение, модел и невронни измервания. Моделът показва, че няколко изменящи се посоки могат да възпроизведат важни статистики на траекториите. Той не доказва, че мухата буквално изпълнява уравненията или че една назована група неврони е мястото за съхранение.

Допълнителен опит с противоположно ориентиран сегмент под 45 градуса измества по-късното поведение на 10 мухи, заедно с 29 моделни симулации. Това прави посочното обяснение по-конкретно от постфактум описание, но то остава моделно тълкуване.

Ориентир за текущата посока и текуща цел

След това изследването измерва и нарушава активността в **централния комплекс** на мухата — мозъчна област, участваща в навигацията.

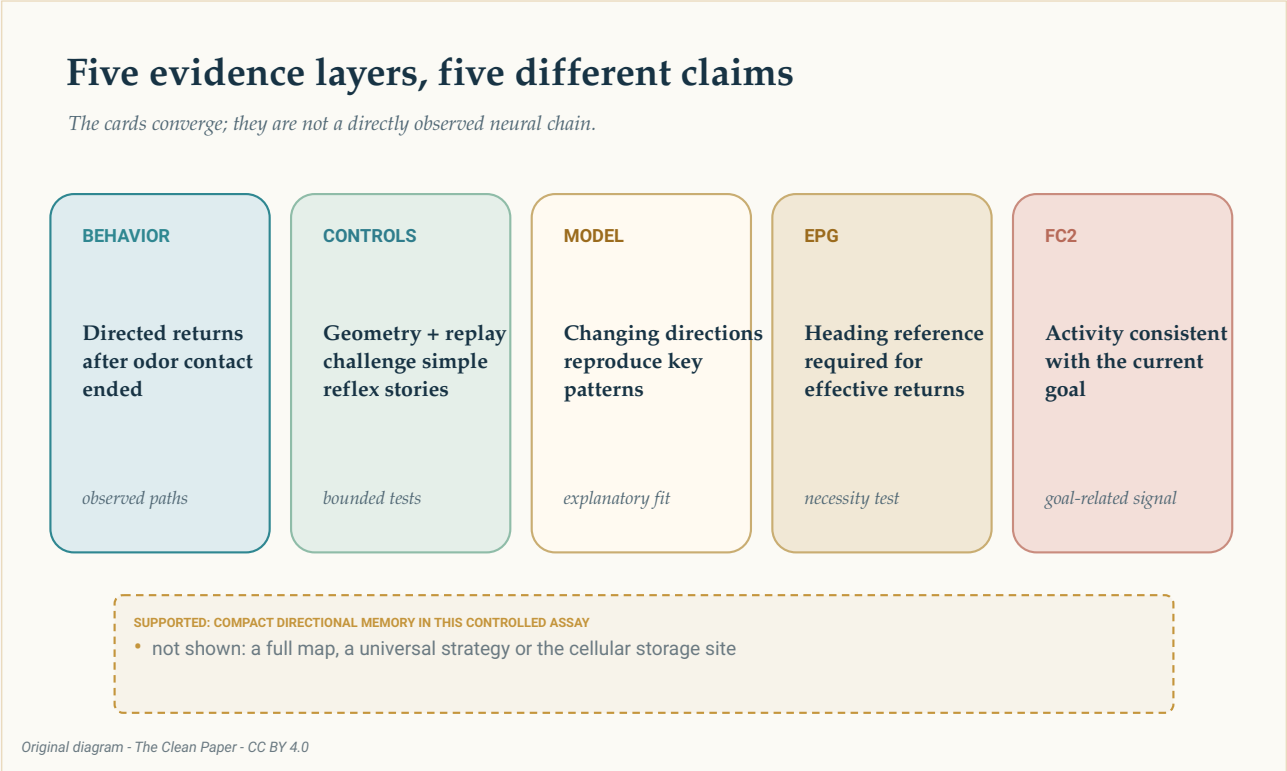
> **Два сигнала с различни задачи**
>
> EPG и FC2 са имена на две невронни популации в централния комплекс. Активността на EPG действа като показание на компас: проследява посоката, в която мухата е обърната спрямо вятъра. Активността на FC2 е свързана с посоката, в която мухата се опитва да пътува. Низходяща верига за управление може да сравнява текущата ориентация с тази цел. Изследването изпитва и двете популации, но не показва, че която и да е от тях самостоятелно съхранява цялата памет.

EPG невроните носят сигнал за ориентацията: моделът им на активност проследява посоката, в която мухата е обърната спрямо външен ориентир. Чрез калциево изобразяване — непряк оптичен показател за невронна активност — изследователите установяват, че фазата на EPG активността следва ориентацията спрямо вятъра по време на проследяването на ръба. Анализът използва 16 изпитвания от 9 мухи.

За да потиснат EPG невроните, изследователите ги модифицират да експресират **GtACR1**, анионен канал, включван от зелена светлина. Светодиод остава включен през цялото изпитване, активира канала и потиска избраните неврони; същото осветяване не нарушава поведението на генетичните контролни мухи.

Когато EPG невроните са потиснати по този начин, 12 експериментални мухи извършват по-малко ефективни насочени връщания от 6 генетични контролни мухи. Ограниченото заключение е, че ориентирът за посока, носен от EPG активността, е необходим за ефективно проследяване на ръба при изпитаните условия. Това не е доказателство, че EPG невроните самостоятелно съхраняват посоката към границата.

FC2 невроните показват различна връзка. Популационната им активност е свързана с текущата навигационна цел и в изпитването сочи към границата на шлейфа преди завиванията. Изобразяването използва 6 мухи, а сравненията при потискане — групи от 9 до 14 мухи според анализа. Потискането нарушава проследяването на ръба.



Поведението, променената геометрия на шлейфа, напаснатият модел и две невронни намеси подкрепят различни части от обяснението чрез посочна памет. Взети заедно, те подкрепят компактна посока към целта в това контролирано изпитване, а не пълна карта или доказано клетъчно място за съхранение.

The Clean Paper CC BY 4.0

Това са събиращи се доказателства, не заснета верига на причинност. EPG активността осигурява необходим ориентир за текущата посока. FC2 активността е съвместима с посока към целта и е необходима за ефективно поведение. Експериментите не локализират един-единствен „енграм“ на паметта и не доказват, че синапсите на FC2 физически съхраняват посоката.

Като приблизителна човешка аналогия си представете, че излизате от тясна ивица мъгла, докато постоянен вятър продължава да ви показва къде е север. Компасът може да каже накъде сте обърнати, но връщането до мъглата изисква и запомнен курс към ръба ѝ. Сравняването на текущата ориентация с желания курс казва накъде да завиете. Това е предложеното тук разделение на задачите между сигналите EPG и FC2. Аналогията е обяснителна, не доказателство, че хората използват същите клетки или алгоритъм.

Паметта зависи от действието, не само от времето на миризмата

В експеримент с повторно възпроизвеждане мухите получават същата времева последователност на миризмата като преди, но моментите вече не зависят от текущото им действие. Наученото посочно отклонение отслабва през последователните епизоди на възпроизвеждане. Това подкрепя **оперантно**, свързано с действието актуализиране: важно е не само пасивното излагане на последователност от миризми, а връзката между миризмата и движението на мухата.

Знаменателят се променя между тези анализи. Панелите с разширени данни включват 8 или 9 мухи според сравнението; серията от последователни епизоди използва 8 мухи; панелите с траектории изискват поне 10 ефективни влизания; а съответните моделни панели използват 21 симулирани траектории, които също покриват този праг за влизания. Това не е една обединена извадка от осем.

По-неравномерният шлейф е полезен, но все още виртуален

Изследователите възпроизвеждат и предварително записан, по-неравномерен шлейф. Те го увеличават пет пъти в пространството и времето, така че прикрепените мухи да го срещат достатъчно често. **Десет от 12 мухи** достигат на 50 виртуални милиметра от източника.

Това не са десет мухи, намерили реален източник на открито. Това е представяне в контролирано възпроизвеждане на натуралистичен шлейф.

За всеки тип динамичен шлейф моделът генерира 2000 траектории. Сравнението с увеличения шлейф анализира 1850 от тези 2000, след като изисква ефективно влизане и изключва траектории, започнали твърде близо до източника. Паметта помага повече близо до източника, където последователните срещи запазват съгласувана посочна структура, и по-малко в по-турбулентната област по-далеч по вятъра.

Уговорката е част от резултата. Компактната посока може да помогне само когато светът остава достатъчно съгласуван, така че предишната среща да носи полезна информация за следващата.

Какво изследването не показва

- То **не** показва муха, изграждаща пълна пространствена карта.
- То **не** показва свободен полет през непроменен естествен шлейф.
- То **не** установява, че всяка навигация по миризма използва тази стратегия.

- То **не** показва, че EPG или FC2 невроните са единственото физическо място за съхранение на паметта.
- То **не** превръща напаснатия модел в буквалния биологичен алгоритъм на мухата.
- То **не** се обобщава пряко към човешката навигация.

Изследването е най-силно там, където е най-конкретно. Управлението със затворен контур дава на изследователите точен достъп до всяка среща с миризмата. След това промените в геометрията, повторното възпроизвеждане, моделирането, калциевото изобразяване и потискането изпитват различни части от едно обяснение. Но поведенческите, образните и потискащите кохорти са отделни; размерите на извадките не са определени предварително; събирането и анализът на данните не са рандомизирани или заслепени; и по-малко от 10% от прикрепените мухи са изключени поради проблеми с привикването, отговора или проследяването.

Тези ограничения не заличават явлението. Те го определят.

Накратко

Прикрепени плодови мушици, вървящи през виртуален миризмен коридор, многократно се връщат към граница, след като са оставили миризмата зад себе си. Промени в концентрацията и геометрията на коридора, напаснат превключващ модел, невронно изобразяване и оптогенетично потискане подкрепят обяснение, при което мухата използва компактна запомнена посока, а не пълна карта. EPG невроните осигуряват необходим ориентир за текущата посока, докато FC2 активността е съвместима с текущата посока към целта. Резултатът е ограничен до контролирано изпитване с ходене; той не установява клетъчното място за съхранение на паметта и не показва същото изчисление при свободен естествен полет.

Проверка без увъртане

Какво показва статията: В изпитване със затворен контур и прикрепени мухи те извършват насочени връщания към виртуални миризмените граници, които вече не могат да усещат. Множество поведенчески контроли, моделиране и невронни намеси подкрепят стратегия, основана на вектор.

Какво е изведено: Че поведението използва компактна посочна памет и че популационната активност на FC2 представя текуща навигационна цел. Съдържанието на паметта не е прочетено пряко.

Какво не показва: Пълна мисловна карта, универсална обонятелна стратегия, свободен полет в естествен шлейф, едно място за съхранение на паметта или човешки аналог.

Основни ограничения: Един вид и контролирана апаратура; различни кохорти мухи и единици на анализ между експериментите; непреки калциеви сигнали; тестове за необходимост, които не доказват достатъчност; и натуралистичен шлейф, който е възпроизведен и мащабиран.

Колко доверие трябва да има един неспециалист? Високо доверие, че явлението на насочено връщане е реално в тази апаратура и че активността на централния комплекс, свързана с ориентацията и целта, има значение. Умерено доверие в модела като компактно обяснение. Ниско доверие във всяко твърдение, което го пренася непроменено на открито или го нарича пълна карта.

Източници

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