The Clean Paper

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

Мува може да го изгуби мирисот и сепак да се сврти назад. Во виртуелен plume ѝ помогнала запаметена насока

Прицврстени овошни мушички постојано се враќале до мирисна граница откако оделе во чист воздух. Однесувањето, моделирањето и невронските нарушувања поддржуваат компактна меморија за насока, а не целосна карта. Резултатот доаѓа од контролиран тест со виртуелна реалност и сè уште не ја покажува истата стратегија при слободен природен лет.

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

Мува може да го изгуби мирисот и сепак да се сврти назад кон него

Мувата го оставила мирисот зад себе.

Продолжила да оди низ чист воздух, понекогаш десетици секунди и стотици виртуелни милиметри. Потоа се свртела кон границата што ја преминала и повторно го пронашла мирисот. Во тој момент самиот мирис не можел да ѝ покаже по кој пат да се врати.

Тоа е централното набљудување во нова студија во Nature за навигацијата кај овошните мушички. Истражувачите тврдат дека мушичките користеле компактна меморија за насока: не карта на целиот мирисен облак и не сеќавање на поминатото растојание, туку запаметен правец кон граница што веќе не можела да се детектира.

Резултатот е впечатлив бидејќи покажува колку малку зачувана информација може да биде доволна. Но лесно е и да се претера. Овие мушички не летале слободно низ природен пејзаж. Тие оделе додека биле прицврстени над топка поддржана со воздух, во строго контролирана виртуелна средина. Студијата поддржува стратегија заснована на вектор во тој апарат; не покажува дека мушичките градат ментални карти, не ги објаснува сите начини на кои животните следат мириси и не ги идентификува клетките во кои меморијата физички се складира.

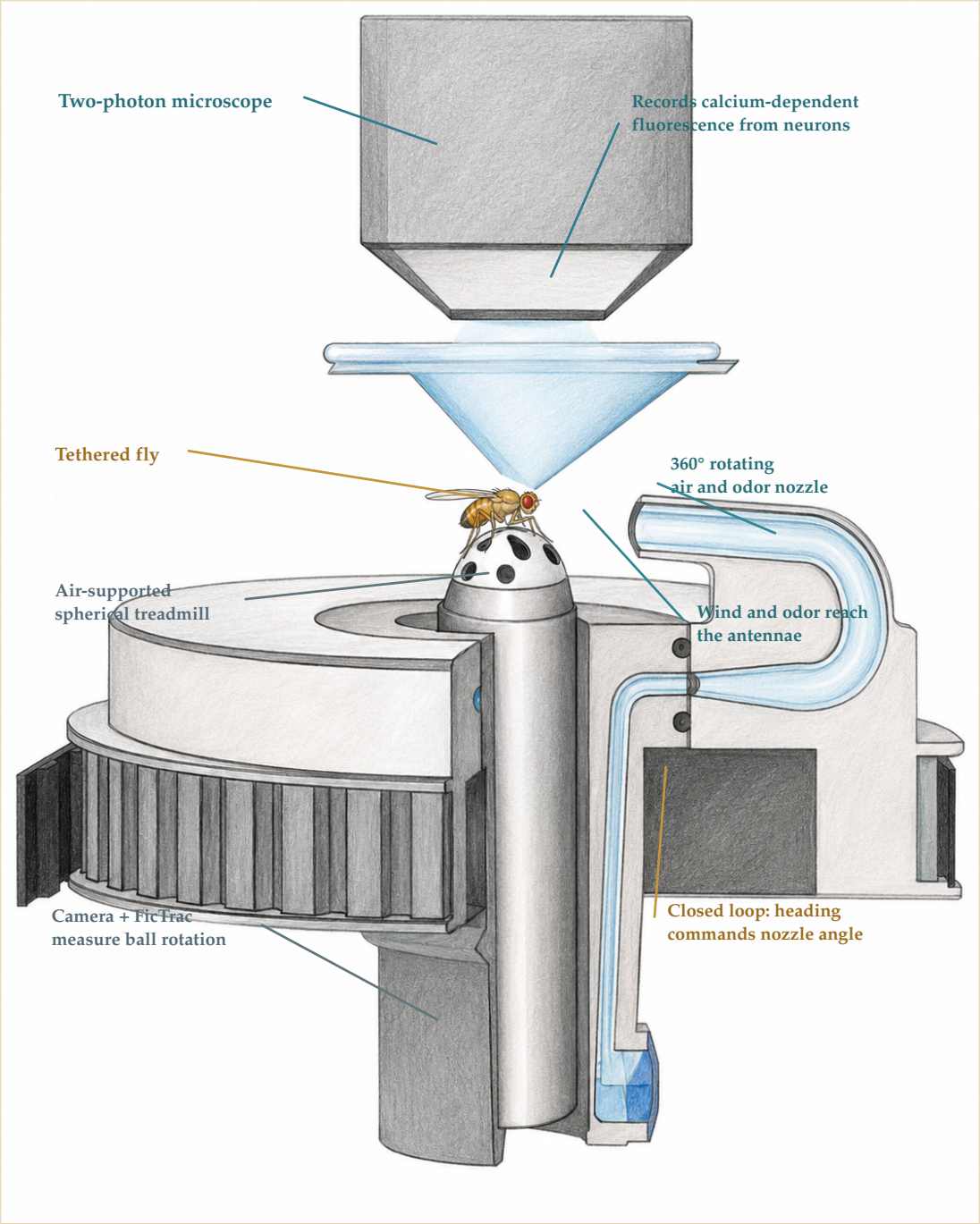
Невидливиот коридор го создаваше софтвер

Мирисен облак, или plume, е подвижниот регион со мирис што го носи воздухот. На отворено, plume-от се витка, се распарчува и повторно се поврзува како што се менува ветерот. Поради тоа е тешко точно да се знае што помирисало животното во секој момент.

Истражувачите го направиле проблемот контролабилен со **виртуелна реалност со затворена повратна спега**. Телото на мушичката било прицврстено на место над лесна топка што лебдела на воздух. Додека мушичката одела, камера ја мерела ротацијата на топката околу 60 пати во секунда. Софтверот ја претворал таа ротација во виртуелна дводимензионална позиција и насока на гледање.

Таа насока контролирала моторизирана млазница што можела да ротира 360 степени. Како што мушичката ја менувала виртуелната насока, млазницата се движела околу неа за ветерот да остане порамнет со стабилна насока во нејзиниот виртуелен свет. Истовремено, контролери на масен проток го менувале количеството чист воздух или мирис од јаболков оцет што стигнувал до антените според виртуелната положба на мушичката. Така преминувањето на софтверски дефинирана граница го вклучувало или исклучувало мирисот, создавајќи фиктивен коридор широк 50 милиметри и долг еден метар, иако мушичката никогаш не ја напуштала топката.

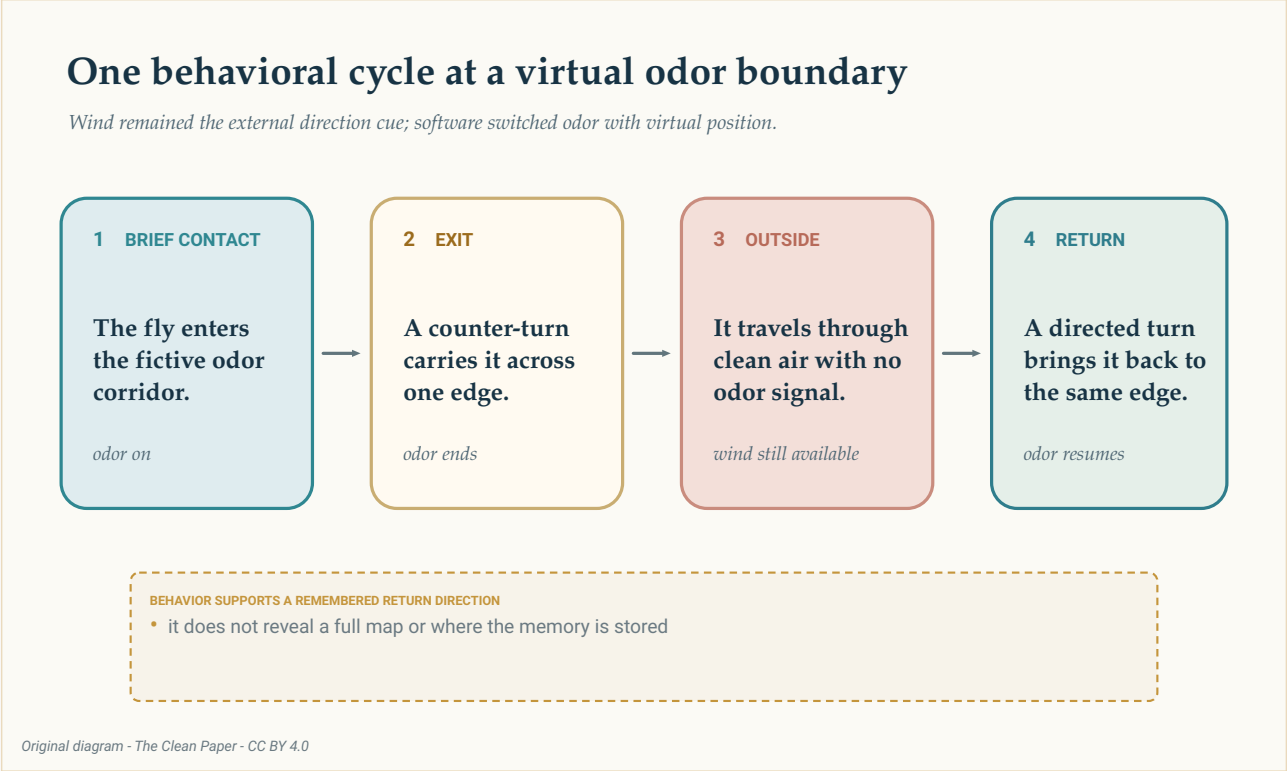
Апаратот создавал синхронизиран запис на виртуелната позиција на мушичката, нејзината насока, состојбата на мирисот и контролите на протокот на воздух во секоја временска точка. Од тој запис истражувачите ги реконструирале траекториите, го означиле секое влегување и излегување и измериле колку директно се враќала мушичката. Ветерот го давал надворешниот сигнал за насока; сопственото движење на мушичката одредувало кога ќе наиде на едната или другата страна на виртуелната мирисна граница.



Мушичката останувала прицврстена над топка поддржана со воздух. Камера и FicTrac ја претворале ротацијата на топката во виртуелно движење и насока; потоа софтверот ја ротирал млазницата за воздух и мирис и го вклучувал мирисот според виртуелната позиција. Во одделни испитувања со невронско

снимање, двофотонскиот микроскоп над мушичката ја снимал калциум-зависната флуоресценција од EPG или FC2 невроните, што овозможувало невронската активност да се усогласи со однесувањето. Микроскопот не бил потребен за секој бихевиорален тест.

The Clean Paper CC BY 4.0



Во контролираниот тест, мушичката кратко влегла во виртуелниот мирисен коридор, го напуштила, патувала низ воздух без мирис и направила насочено враќање. Однесувањето поддржува запаметена насока на враќање; не открива каде таа информација се складира.

The Clean Paper CC BY 4.0

Во главниот експеримент со **вертикален коридор**, **40 мушички** постојано влегувале во мирисот, правеле контрасвртување надвор од него и се враќале до истиот раб. „Вертикален“ е името во трудот за геометријата од 0 степени: долгата оска на коридорот била паралелна со насоката против ветерот. Не значи дека апаратот стоел исправено.

Авторите го нарекуваат овој образец **следење на раб**. **Bout** е една непрекината епизода меѓу преминувања на границата: внатрешниот bout трае од влез до излез, а надворешниот од излезот до враќањето на мушичката. Во 755 внатрешни bout-епизоди, една посета во просек траела 4,9 секунди. За време на враќањата, просечното растојание од границата било 10,4 милиметри. Помалку од 4% од 793 bout-епизоди преминале целосно до спротивниот раб на коридорот.

Последните две бројки опишуваат bout-епизоди, а не стотици независни мушички. Разликата е важна бидејќи едно животно може да придонесе многу bout-епизоди.

Враќањата не беа само фиксен рефлекс против ветерот

Неколку експерименти тестирале поедноставни објаснувања.

Истражувачите прво го менувале она што се случувало **долж** коридорот додека мушичката одела против ветерот. Мирисот можел да станува посилен кон виртуелниот извор, да остане константен или да станува послаб. Мушичките создавале слични патеки во сите три случаи. Затоа едноставно правило како „продолжи таму каде што мирисот станува посилен“ не може да го објасни следењето на работ во овој апарат.

Потоа го омекнале **страничниот** раб на коридорот во Gaussian-профил, каде концентрацијата се менувала постепено наместо нагло да се вклучува и исклучува. Мушичките се собирале близу страната каде што концентрацијата се менувала најбрзо, а не во центарот каде мирисот бил најсилен. Значајниот сигнал, според тоа, била страничната промена што означувала ефективна граница, а не неопходно зголемување кон изворот долж коридорот.

Тоа не значи дека градиентите на концентрација никогаш не се важни во природата. Значи дека зголемување кон изворот не било потребно за ова однесување под тестираните услови.

Истражувачите ја менувале и ориентацијата на коридорот. Одделни групи следеле вертикални коридори, коридори под 45 степени и под 90 степени, а друга група наидувала на коридор што скокал странично по излегувањата. Големините на групите биле 40, 21, 20 и 24 мушички. Нивните надворешни патеки се менувале со геометријата. Општо правило како „секогаш сврти против ветерот“ не може да ја објасни таа флексибилност.

Во оваа поставка, мирисот стигнувал до двете антени во рок од околу две милисекунди. Спарувањето билатерална оптогенетска активација со ветер можело да репродуцира образец сличен на следење раб. **Оптогенетика** користи протеини чувствителни на светлина за да ја менува активноста на избрани клетки. Тука резултатот сугерира дека разлика лево–десно во времето на пристигнување на мирисот не била неопходна за ова однесување. Тоа не ја прави билатералната споредба неважна за слободно движечки животни во други plume-средини.

Векторот е помал од карта

Вектор е насока заедно со големина. Корисната зачувана величина тука била главно насочна: во која насока треба да се сврти мушичката за да стигне до границата на plume-от? Студијата не нашла доказ дека мушичката складирала целосен распоред на plume-от или сопствената позиција во него.

Авторите најпрво направиле вештачки патеки со мешање на составните елементи од вистинското движење на мушичките. По случаен избор извлекувале набљудувани

должини на праволиниско движење и агли на свртување и ги спојувале. Некои од овие синтетички „шетачи“ на крај повторно ја погодиле мирисната граница, но талкале подалеку и се враќале по помалку директни патеки од вистинските мушички. Дури ни додавањето на вообичаената тенденција на мушичките да се свртуваат против ветерот не ги репродуцирало кратките, насочени враќања. Значи вистинското однесување содржело повеќе информација за насока отколку случајна прераспределба на истите движења.

Потоа истражувачите изградиле модел со два режима: **напушти ја границата** и **врати се кон границата**. Овие режими не биле етикети за секој момент внатре или надвор од мирисот. Тие биле алтернативни правила за управување што можеле да се менуваат додека мушичката се движи.

Секое преминување на границата му давало на моделот насока за паметење. При излегување, тој ажурирал насока што се користела додека се оддалечува. При влегување, ажурирал посебна насока на враќање: во суштина, „кога ја најдов границата, се движев во оваа насока“. За време на подоцнежното враќање, таа запаметена насока го пристрасувала движењето на симулираната мушичка назад кон работ.

Истражувачите го фитувале моделот на траектории низ коридорите од 0, 45 и 90 степени. Во збирната споредба, 72 вистински мушички и 75 симулации создале слична статистика на патеките. Кога насоката на враќање научена при влегување била отстранета, следењето станало помалку ефикасно низ сите ориентации на коридорот. Тоа ја поддржува корисноста на меморијата за насоката при влез; не докажува дека мозокот на мушичката буквално ги извршува равенките на моделот.

> **Што значи „меморија“ во овој труд?**
>
> Истражувачите не прочитале складирана стрелка директно од мозокот на мушичка. „Меморија за насока“ е инференција поддржана од однесување, модел и невронски мерења. Моделот вели дека неколку променливи насоки можат да репродуцираат важни статистики на патеката. Не докажува дека мушичката буквално ги имплементира равенките, ниту дека една именувана група неврони е местото каде меморијата се складира.

Дополнително искуство со сегмент под 45 степени ориентиран во спротивна насока го променило подоцнежното однесување кај 10 мушички, паралелно со 29 симулации на моделот. Тоа го прави насочниот опис поспецифичен од пост-хок објаснување, иако и понатаму останува толкување засновано на модел.

Референца за насоката и тековна цел

Потоа студијата ја мерела и нарушувала активноста во **централниот комплекс** на мушичката, мозочен регион вклучен во навигацијата.

Два сигнала со различни задачи

EPG и FC2 се имиња на две популации неврони во централниот комплекс. EPG-активноста дејствува како отчитување на компас: ја следи насоката во која мушичката моментално е свртена во однос на ветерот. FC2-активноста е поврзана со насоката во која мушичката се обидува да се движи. Низводно управувачко коло може да ја спореди тековната насока со таа цел. Студијата ги тестира двете популации, но не покажува дека која било од нив сама ја складира целата меморија.

EPG-невроните носат сигнал за насока: нивниот образец на активност ја следи насоката во која мушичката е свртена во однос на надворешен сигнал. Со калциумско снимање, индиректно оптичко отчитување на невронската активност, истражувачите откриле дека фазата на EPG-активноста ја следела насоката во однос на ветерот за време на следењето раб. Оваа анализа користела 16 испитувања од 9 мушички.

За да ги инхибираат EPG-невроните, истражувачите генетски ги измениле да експримираат **GtACR1**, анјонски канал што се вклучува со зелена светлина. LED-светло останувало вклучено во текот на целиот тест, го активирало каналот и ги потиснувало избраните неврони; истото осветлување не ги нарушувало генетските контролни мушички.

Кога EPG-невроните биле инхибирани на овој начин, 12 експериментални мушички правеле помалку ефикасни насочени враќања од 6 генетски контролни мушички. Ограниченото заклучок е дека референцата за насока што ја носи EPG-активноста била потребна за ефикасно следење раб под тестираните услови. Тоа не е доказ дека EPG-невроните сами ја складирале насоката кон границата.

FC2-невроните покажале поинаква врска. Нивната популациска активност била поврзана со тековната навигациска цел и покажувала кон границата на plume-от пред свртувањата во тестот. Снимањето користело 6 мушички, а споредбите со замолчување користеле групи од 9 до 14 мушички зависно од анализата. Замолчувањето го нарушувало следењето раб.

Однесувањето, променетата геометрија на plume-от, фитуваниот модел и две невронски нарушувања поддржуваат различни делови од објаснувањето со меморија за насока. Заедно поддржуваат компактна насока на целта во овој контролиран тест, а не целосна карта или докажано клеточно место на складирање.

The Clean Paper CC BY 4.0

Ова се конвергентни докази, а не фотографиран синџир на причинско-последични настани. EPG-активноста обезбедувала потребна референца за насока. FC2-активноста била во согласност со насока на целта и била потребна за ефикасно однесување. Експериментите не лоцирале единствен мемориски „енграм“ ниту докажале дека FC2-синапсите физички ја складирале насоката.

Како груба аналогија на човечко ниво, замислете дека излегувате од тесен појас магла, додека постојан ветер сè уште ви кажува каде е север. Компас може да ви каже во која насока сте свртени, но за да се вратите до маглата ви треба и запаметен правец кон нејзиниот раб. Споредувањето на тековната насока со посакуваниот правец ви кажува на која страна да свртите. Таква поделба на задачите меѓу EPG и FC2 сигналите се предлага тука. Тоа е објаснувачка аналогија, не доказ дека луѓето користат исти клетки или алгоритам.

Меморијата зависеше од дејството, не само од временскиот распоред на мирисот

Во експеримент со replay, мушичките ја добивале истата низа на времиња на мирис како порано, но временскиот распоред бил одвоен од она што моментално го правеле. Научената насочна пристрасност ослабувала низ replay bout-епизодите. Тоа поддржува **оперантно**, со дејство поврзано ажурирање: важно не било само пасивно изложување на низа мириси, туку односот меѓу мирисот и движењето на мушичката.

Именителот се менува низ тие анализи. Панелите Extended Data вклучуваат 8 или 9 мушички зависно од споредбата; серијата со последователни bout-епизоди користи 8 мушички; панелите на траектории бараат најмалку 10 ефективни влегувања; а спарените панели на моделот користат 21 симулирана траекторија што исто така го исполнува тој праг. Тоа не е еден заеднички примерок од осум.

Понеправилен plume беше корисен, но сепак виртуелен

Истражувачите исто така репродуцирале претходно снимен, понеправилен plume. Го скалирале петкратно во простор и време за прицврстените мушички да можат доволно често да наидуваат на него. **Десет од 12 мушички** стигнале на помалку од 50 виртуелни милиметри од неговиот извор.

Тоа не се десет мушички што нашле вистински извор на отворен воздух. Тоа е успешност во контролирана репродукција на натуралистички plume.

За секој тип динамичен plume, моделот генерирал 2.000 траектории. Споредбата со скалираниот plume анализирала 1.850 од тие 2.000 откако барала ефективен влез и ги исклучила траекториите што започнувале премногу близу до изворот. Меморијата помагала повеќе близу изворот, каде последователните средби задржувале кохерентна насочна структура, и помалку во потурбулентниот регион подолу по ветерот.

Ограничувањето е дел од резултатот. Компактна насока може да помогне само кога светот останува доволно кохерентен за претходната средба да кажува нешто корисно за следната.

Што студијата не покажува

- **Не** покажува дека мушичка гради целосна просторна карта.
- **Не** покажува слободен лет низ непроменет природен plume.
- **Не** утврдува дека целата навигација водена од мирис ја користи оваа стратегија.
- **Не** покажува дека EPG или FC2 невроните се единственото физичко место каде

меморијата се складира.
- **Не** го претвора фитуваниот модел во буквален биолошки алгоритам на мушичката.
- **Не** се генерализира директно на човечката навигација.

Студијата е најсилна таму каде што е најспецифична. Контролата со затворена повратна спега им дала на истражувачите прецизен пристап до секоја средба со мирис. Потоа промените на геометријата, replay, моделирањето, калциумското снимање и замолчувањето тестирале различни делови од едно објаснување. Но бихевиоралните, imaging и silencing кохорти биле одделни; големините на примероците не биле однапред определени; собирањето и анализата на податоците не биле рандомизирани или заслепени; а помалку од 10% од прицврстените мушички биле исклучени поради проблеми со аклиматизација, одговор или следење.

Тие ограничувања не го бришат феноменот. Тие го дефинираат.

Кратко резиме

Прицврстени овошни мушички што оделе низ виртуелен мирисен коридор постојано се враќале до границата откако го оставале мирисот зад себе. Промените на концентрацијата и геометријата на коридорот, фитуван префрлувачки модел, невронско снимање и оптогенетско замолчување поддржуваат објаснување според кое мушичката користи компактна запаметена насока наместо целосна карта. EPG-невроните обезбедувале потребна референца за насока, додека FC2-активноста била во согласност со тековната насока на целта. Резултатот е ограничен на контролиран тест со одење; не го идентификува клеточното место на складирање на меморијата и не ја покажува истата пресметка при слободен природен лет.

Проверка без претерување

Што покажува трудот: Во тест со прицврстени мушички и затворена повратна спега, мушичките правеле насочени враќања до виртуелни мирисни граници што веќе не можеле да ги почувствуваат. Повеќе бихевиорални контроли, моделирање и невронски нарушувања поддржуваат стратегија заснована на вектор.

Што е изведено: Дека однесувањето користи компактна меморија за насока и дека популациската активност на FC2 претставува тековна навигациска цел. Содржината на меморијата не била директно прочитана.

Што не покажува: Целосна ментална карта, универзална олфакторна стратегија, успешност во слободен лет низ природен plume, единствено место за складирање на меморијата или човечки аналог.

Главни ограничувања: Еден вид и контролиран апарат; различни кохорти на мушички и единици на анализа низ експериментите; индиректни калциумски сигнали; тестови на неопходност што не докажуваат доволност; и натуралистички plume што бил репродуциран и скалиран.

Колкава доверба треба да има општ читател? Висока доверба дека феноменот на насочено враќање е реален во овој апарат и дека активноста во централниот комплекс поврзана со насоката и целта е важна. Умерена доверба во моделот како компактно објаснување. Ниска доверба во секое тврдење што непроменето го проширува резултатот на отворен воздух или го нарекува целосна карта.

Извори

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