The Clean Paper

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

Муха може втратити запах і все одно повернутися. У віртуальному шлейфі їй допомагав збережений напрямок

Прикріплені плодові мушки багаторазово поверталися до межі запаху після виходу в чисте повітря. Поведінка, моделювання й нейронні втручання підтримують компактну пам'ять про напрямок, а не повну карту. Результат отримано в контрольованому тесті віртуальної реальності й він ще не показує ту саму стратегію у вільному природному польоті.

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

Муха може втратити запах і все одно повернутися до нього

Муха залишила запах позаду.

Вона продовжувала йти чистим повітрям, іноді десятки секунд і сотні віртуальних міліметрів. Потім повертала до перетнутої межі й знову знаходила запах. У цей момент сам запах уже не міг указати шлях назад.

Це центральне спостереження нового дослідження в Nature, присвяченого навігації плодових мушок. Дослідники стверджують, що мухи використовували компактну пам'ять про напрямок: не карту всього запахового шлейфу й не пам'ять про пройдену відстань, а збережений азимут до межі, яку вже не можна було відчути.

Результат вражає, бо показує, як мало збереженої інформації може бути достатньо. Але його легко перебільшити. Ці мухи не літали вільно природним ландшафтом. Вони йшли, прикріплені над підтримуваною повітрям кулею, у суворо контрольованому віртуальному світі. Дослідження підтримує векторну стратегію в цій установці; воно не показує, що мухи будують уявні карти, не пояснює всі способи, якими тварини йдуть за запахами, і не визначає клітини, де пам'ять фізично зберігається.

Невидимий коридор створювало програмне забезпечення

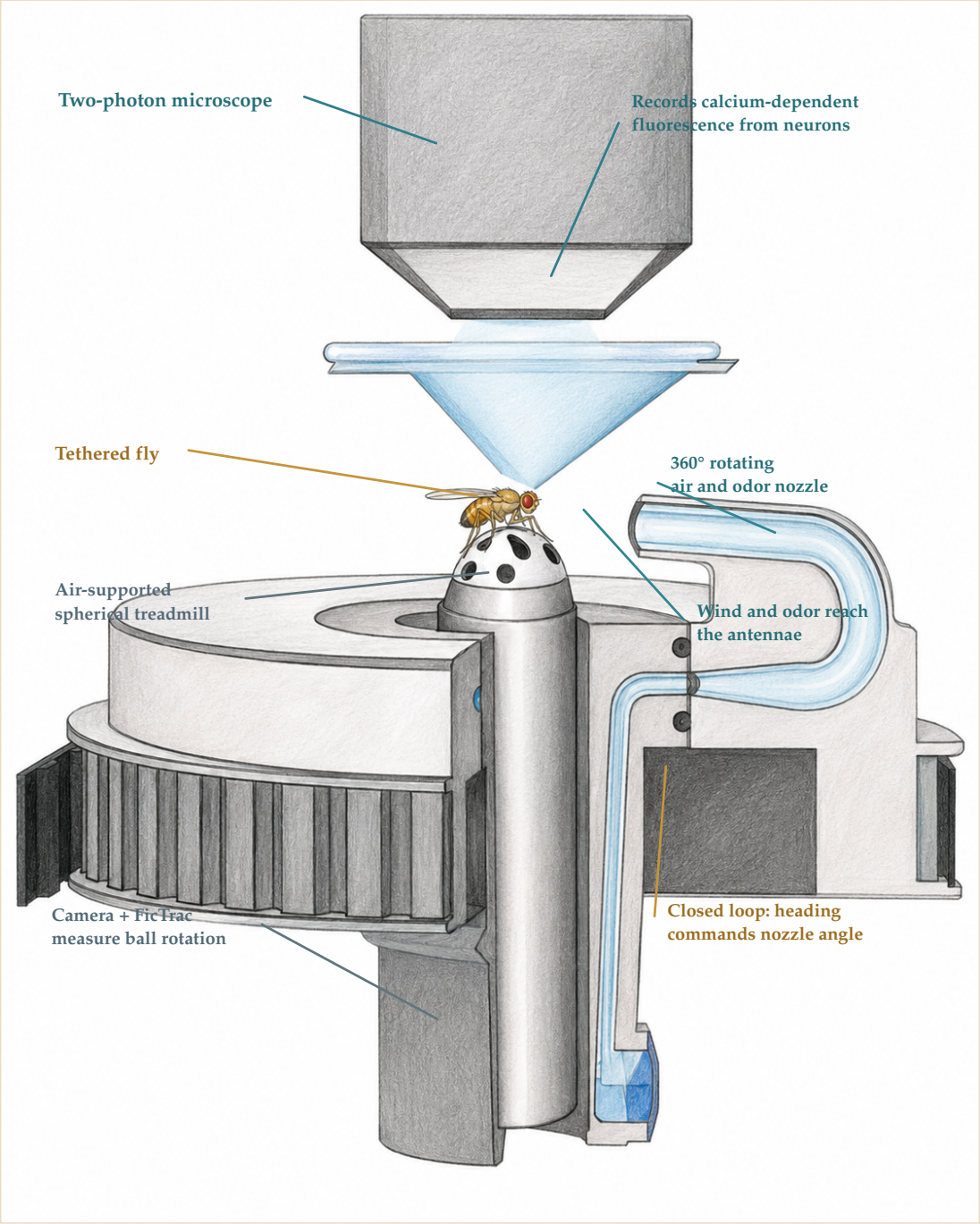
Запаховий шлейф — це рухома область запаху, яку переносить повітря. Надворі шлейф згинається, розпадається й знову з'єднується зі змінами вітру. Через це важко точно знати, що тварина відчувала в кожен момент.

Дослідники зробили проблему керованою за допомогою **віртуальної реальності із замкненим контуром**. Тіло мухи було зафіксоване над легкою кулею, що плавала на повітрі. Коли муха йшла, камера вимірювала обертання кулі приблизно 60 разів за секунду. Програмне забезпечення перетворювало це обертання на віртуальну двовимірну позицію й напрямок руху.

Цей напрямок керував моторизованим соплом, здатним обертатися на 360 градусів. Коли муха змінювала віртуальний курс, сопло рухалося навколо неї, щоб вітер залишався вирівняним зі стабільним напрямком у її віртуальному світі. Одночасно регулятори масової витрати змінювали кількість чистого повітря або запаху яблучного оцту, що досягав антен, залежно від віртуального положення мухи. Перетин програмно визначеної межі вмикав або вимикав запах, створюючи уявний коридор шириною 50 міліметрів і довжиною один метр, хоча муха ніколи не залишала кулю.

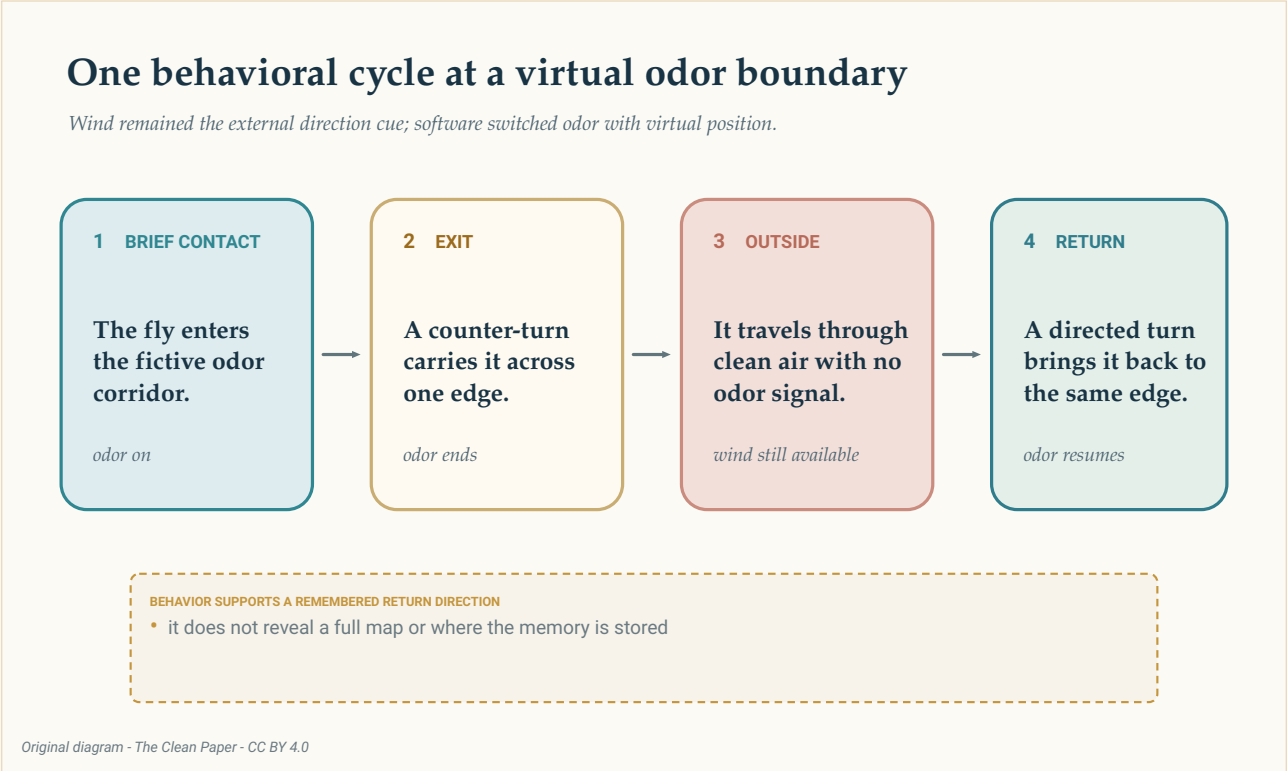
Установка створювала синхронізований запис віртуальної позиції, напрямку, стану запаху й керування повітряним потоком у кожен момент. За ним дослідники реконструювали траєкторії, позначали кожен вхід і вихід та вимірювали, наскільки прямо муха

поверталася. Вітер давав зовнішню опору для напрямку; власний рух мухи визначав, коли вона зустрічала будь-який бік віртуальної межі запаху.



Муха залишалася прикріпленою над кулею, підтримуваною повітрям. Камера й FicTrac перетворювали обертання кулі на віртуальний рух і напрямок; потім програмне забезпечення обертало сопло повітря й запаху та вмикало запах залежно від віртуальної позиції. Під час окремих дослідів із нейронною візуалізацією двофотонний мікроскоп над мухою записував кальцій-залежну флуоресценцію нейронів EPG або FC2, даючи змогу зіставити нейронну активність із поведінкою. Мікроскоп не був потрібний у кожному поведінковому досліді.

The Clean Paper CC BY 4.0



У контрольованому тесті муха ненадовго входила у віртуальний запаховий коридор, залишала його, рухалася повітрям без запаху й здійснювала спрямоване повернення. Поведінка підтримує збережений напрямок повернення, але не показує, де ця інформація зберігається.

The Clean Paper CC BY 4.0

У головному експерименті з **вертикальним коридором 40 мух** багаторазово входили в запах, робили зустрічний поворот назовні й поверталися до тієї самої межі. «Вертикальний» — назва геометрії 0 градусів у статті: довга вісь коридору проходила паралельно напрямку проти вітру. Це не означає, що установка стояла вертикально.

Автори називають цю схему **відстеженням краю**. **Епізод** — це один безперервний проміжок між перетинами межі: внутрішній епізод триває від входу до виходу, зовнішній — від виходу до повернення. У 755 внутрішніх епізодах візит тривав у середньому 4,9 секунди. Під час повернень середня відстань від межі становила 10,4 міліметра. Менше 4% із 793 епізодів перетнули весь коридор до протилежного краю.

Останні два числа описують епізоди, а не сотні незалежних мух. Це важливо, бо одна тварина може дати багато епізодів.

Повернення не були просто фіксованим рефлексом руху проти вітру

Кілька експериментів перевіряли простіші пояснення.

Спочатку дослідники змінювали те, що відбувалося **вздовж** коридору, коли муха йшла проти вітру. Запах міг посилюватися до віртуального джерела, залишатися сталим або слабшати. У всіх трьох випадках мухи створювали подібні траєкторії. Тому просте правило «продовжуй рухатися туди, де запах стає сильнішим» не пояснює відстеження краю в цій установці.

Потім вони пом'якшили **бічний** край коридору до гаусового профілю, де концентрація змінювалася поступово, а не перемикалася різко. Мухи збиралися біля схилу, де концентрація змінювалася найшвидше, а не в центрі з найсильнішим запахом. Отже, важливою підказкою була бічна зміна, що позначала ефективну межу, а не обов'язкове посилення запаху в напрямку джерела вздовж коридору.

Це не означає, що градієнти концентрації ніколи не важливі в природі. Це означає, що за перевірених умов для такої поведінки не було потрібне посилення до джерела.

Дослідники також змінювали орієнтацію коридору. Окремі групи відстежували коридори під кутами 0, 45 і 90 градусів, а ще одна зустрічала коридор, який після виходу стрибав убік. Розміри груп становили відповідно 40, 21, 20 і 24 мухи. Їхні зовнішні траєкторії змінювалися разом із геометрією. Загальне правило на кшталт «завжди повертай проти вітру» не пояснює такої гнучкості.

У цій установці запах досягав обох антен із різницею приблизно дві мілісекунди. Поєднання двобічної оптогенетичної активації з вітром могло відтворити схему, схожу на відстеження краю. **Оптогенетика** використовує світлочутливі білки для зміни активності вибраних клітин. Тут результат означає, що різниця часу надходження запаху ліворуч і праворуч не була необхідною для цієї поведінки. Він не робить двобічне порівняння неважливим для тварин, які вільно рухаються в інших шлейфах.

Вектор менший за карту

Вектор — це напрямок разом із величиною. Корисна збережена величина тут була переважно напрямною: куди муха має повернути, щоб досягти межі шлейфу? Дослідження не знайшло доказів того, що муха зберігала повну схему шлейфу або власне положення всередині нього.

Спочатку автори створили штучні траєкторії, перемішуючи складові реального руху мух. Вони випадково брали спостережувані довжини пробіжок і кути поворотів та з'єднували їх. Деякі синтетичні «ходаки» зрештою знову потрапляли на межу запаху, але блукали далі й поверталися менш прямими маршрутами, ніж справжні мухи. Навіть додавання звичайної схильності мух повертати проти вітру не відтворило коротких спрямованих повернень. Отже, реальна поведінка містила більше напрямної інформації, ніж випадкове перемішування тих самих рухів.

Потім дослідники побудували модель із двома режимами: **залишити межу** й **повернутися до межі**. Ці режими не були позначками для кожного моменту всередині або поза

запахом. Це були альтернативні правила керування, між якими модель могла перемикатися під час руху мухи.

Кожен перетин межі давав моделі напрямок для запам'ятовування. Під час виходу вона оновлювала напрямок, який використовувався при віддаленні. Під час входу оновлювала окремий напрямок повернення: фактично «коли я знайшла межу, я рухалася ось так». Під час наступного повернення цей збережений напрямок зміщував рух симульованої мухи назад до краю.

Модель підганяли до траєкторій у коридорах 0, 45 і 90 градусів. У підсумковому порівнянні 72 справжні мухи й 75 симуляцій дали подібні статистики траєкторій. Коли напрямок повернення, засвоєний під час входу, вилучали, відстеження ставало менш ефективним за всіх орієнтацій коридору. Це підтримує корисність пам'яті про напрямок входу; але не доводить, що мозок мухи буквально виконує рівняння моделі.

> **Що означає «пам'ять» у цій статті?**
>
> Дослідники не зчитали збережену стрілку безпосередньо з мозку мухи. «Напрямна пам'ять» — це висновок, підтриманий поведінкою, моделлю та нейронними вимірюваннями. Модель показує, що кілька змінних напрямків можуть відтворити важливі статистики траєкторій. Вона не доводить, що муха буквально реалізує рівняння або що одна названа група нейронів є місцем зберігання.

Додатковий досвід із сегментом 45 градусів, орієнтованим у протилежний бік, змістив подальшу поведінку 10 мух разом із 29 симуляціями моделі. Це робить напрямне пояснення конкретнішим за опис, вигаданий після факту, але воно й далі залишається інтерпретацією на основі моделі.

Опора для напрямку й поточна мета

Далі дослідження вимірювало й порушувало активність у **центральному комплексі** мозку мухи — ділянці, пов'язаній із навігацією.

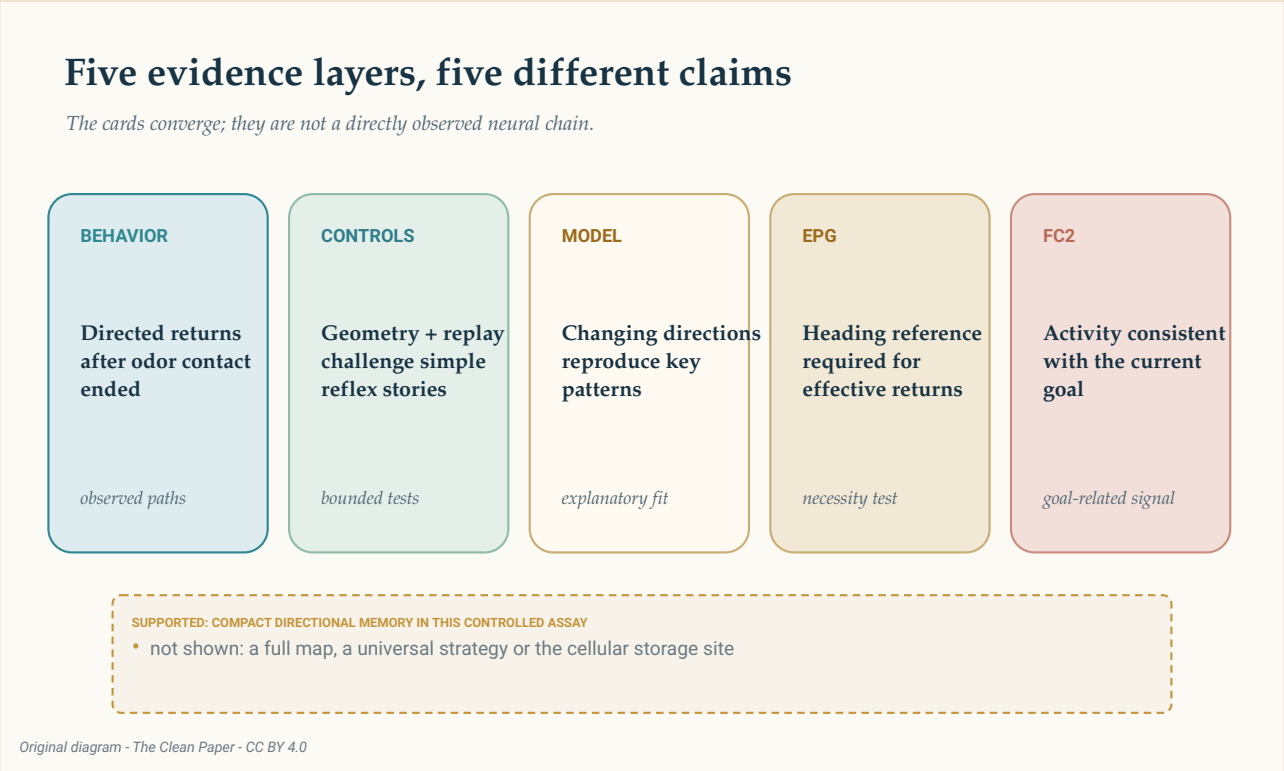
> **Два сигнали з різними завданнями**
>
> EPG і FC2 — назви двох популяцій нейронів центрального комплексу. Активність EPG працює як показ компаса: відстежує напрямок, у якому муха зараз зорієнтована відносно вітру. Активність FC2 пов'язана з напрямком, у якому муха намагається рухатися. Нижчий керувальний контур може порівнювати поточний курс із цією метою. Дослідження перевіряє обидві популяції, але не показує, що будь-яка з них окремо зберігає всю пам'ять.

Нейрони EPG несуть сигнал курсу: їхній патерн активності відстежує напрямок, у якому муха повернута відносно зовнішньої підказки. За допомогою кальцієвої візуалізації — непрямого оптичного показника нейронної активності — дослідники встановили, що фаза активності EPG під час відстеження краю відповідала курсу відносно вітру. Аналіз використав 16 випробувань у 9 мух.

Щоб пригнічувати нейрони EPG, дослідники генетично змусили їх експресувати **GtACR1** — аніонний канал, який вмикається зеленим світлом. Світлодіод залишався увімкненим протягом тесту, активуючи канал і пригнічуючи вибрані нейрони; те саме освітлення не погіршувало поведінку генетичних контрольних мух.

Коли нейрони EPG пригнічували так, 12 експериментальних мух здійснювали менш ефективні спрямовані повернення, ніж 6 генетичних контрольних мух. Обмежений висновок полягає в тому, що опора для курсу, яку несе активність EPG, була потрібна для ефективного відстеження краю за перевірених умов. Це не доказ того, що нейрони EPG самі зберігали напрямок межі.

Нейрони FC2 показали інший зв'язок. Їхня популяційна активність була пов'язана з поточною навігаційною метою й перед поворотами в тесті вказувала до межі шлейфу. Візуалізація охопила 6 мух, а порівняння з пригніченням — групи від 9 до 14 мух залежно від аналізу. Пригнічення погіршувало відстеження краю.



Поведінка, змінена геометрія шлейфу, підігнана модель і два нейронні втручання підтримують різні частини пояснення напрямною пам'яттю. Разом вони підтримують компактний напрямок мети в цьому контрольованому тесті, а не повну карту чи доведене клітинне місце зберігання.

The Clean Paper CC BY 4.0

Це збіжні докази, а не сфотографований ланцюг причинності. Активність EPG забезпечувала необхідну опору для курсу. Активність FC2 узгоджувалася з напрямком мети й була потрібна для ефективної поведінки. Експерименти не локалізували єдину «енграму» пам'яті й не довели, що напрямок фізично зберігався в синапсах FC2.

Як грубу аналогію людського масштабу уявіть, що ви виходите з вузької смуги туману, а сталий вітер і далі показує, де північ. Компас може сказати, куди ви повернуті, але для повернення до туману потрібен також збережений азимут до його краю. Порівняння поточного курсу з бажаним азимутом підказує, куди повернути. Саме такий розподіл роботи між сигналами EPG і FC2 тут припускається. Це пояснювальна аналогія, а не доказ того, що люди використовують ті самі клітини чи алгоритм.

Пам'ять залежала від дії, а не лише від часу запаху

В експерименті відтворення мухи отримували ту саму послідовність моментів запаху, що й раніше, але час більше не залежав від їхньої поточної поведінки. Засвоєне напрямне зміщення слабшало в наступних епізодах відтворення. Це підтримує **оперантне**, пов'язане з дією оновлення: важливим був не лише пасивний вплив послідовності запаху, а зв'язок між запахом і рухом мухи.

Знаменник у цих аналізах змінюється. Панелі розширених даних охоплюють 8 або 9 мух залежно від порівняння; послідовний ряд епізодів використовує 8 мух; панелі траєкторій вимагають щонайменше 10 ефективних входів; парні модельні панелі використовують 21 симульовану траєкторію, що також відповідає цьому порогу. Це не одна об'єднана вибірка з восьми.

Нерегулярніший шлейф був корисним, але все одно віртуальним

Дослідники також відтворили раніше записаний, нерегулярніший шлейф. Вони збільшили його вп'ятеро в просторі й часі, щоб прикріплені мухи могли зустрічати його достатньо часто. **Десять із 12 мух** дісталися в межі 50 віртуальних міліметрів від джерела.

Це не десять мух, які знайшли справжнє джерело у відкритому повітрі. Це результат у контрольованому відтворенні натуралістичного шлейфу.

Для кожного типу динамічного шлейфу модель створила 2 000 траєкторій. Порівняння масштабованого шлейфу проаналізувало 1 850 із 2 000 після вимоги ефективного входу й виключення траєкторій, що починалися надто близько до джерела. Пам'ять допомагала більше біля джерела, де послідовні зустрічі зберігали узгоджену напрямну

структуру, і менше в турбулентнішій області далі за вітром.

Це уточнення є частиною результату. Компактний напрямок може допомагати лише тоді, коли світ залишається достатньо узгодженим, щоб попередня зустріч давала корисну інформацію про наступну.

Чого дослідження не показує

- Воно **не** показує, що муха будує повну просторову карту.
- Воно **не** показує вільний політ у незміненому природному шлейфі.
- Воно **не** встановлює, що вся навігація за запахом використовує цю стратегію.
- Воно **не** показує, що нейрони EPG або FC2 є єдиним фізичним місцем зберігання пам'яті.
- Воно **не** перетворює підігнану модель на буквальний біологічний алгоритм мухи.
- Воно **не** переноситься прямо на людську навігацію.

Дослідження найсильніше там, де воно найконкретніше. Керування із замкненим контуром дало точний доступ до кожної зустрічі із запахом. Зміни геометрії, відтворення, моделювання, кальцієва візуалізація й пригнічення потім перевірили різні частини одного пояснення. Але поведінкові, візуалізаційні й експериментальні когорти були окремими; розміри вибірок не визначали наперед; збір і аналіз даних не були рандомізованими чи сліпими; менше 10% прикріплених мух виключили через проблеми акліматизації, відповіді або відстеження.

Ці межі не стирають явище. Вони його визначають.

Короткий підсумок

Прикріплені плодові мушки, що йшли через віртуальний запаховий коридор, багаторазово поверталися до межі після того, як залишали запах позаду. Зміни концентрації й геометрії коридору, підігнана модель перемикання, нейронна візуалізація та оптогенетичне пригнічення підтримують пояснення, за яким муха використовує компактний збережений напрямок, а не повну карту. Нейрони EPG забезпечували необхідну опору для курсу, тоді як активність FC2 узгоджувалася з поточним напрямком мети. Результат обмежений контрольованим тестом ходьби; він не визначає клітинне місце зберігання пам'яті й не показує ту саму операцію у вільному природному польоті.

Твереза оцінка

Що показує стаття: у тесті із замкненим контуром і прикріпленими мухами вони здійснювали спрямовані повернення до віртуальних меж запаху, яких уже не могли відчути. Кілька поведінкових контролів, моделювання й нейронні втручання підтримують векторну стратегію.

Що виведено: що поведінка використовує компактну напрямну пам'ять і що популяційна активність FC2 представляє поточну навігаційну мету. Вміст пам'яті безпосередньо не зчитували.

Чого робота не показує: повної уявної карти, універсальної нюхової стратегії, вільного польоту в природному шлейфі, єдиного місця зберігання пам'яті або людського аналога.

Головні обмеження: один вид і контрольована установка; різні когорти мух та одиниці аналізу в різних експериментах; непрямі кальцієві сигнали; тести необхідності, що не доводять достатність; натуралістичний шлейф був відтворений і масштабований.

Якою має бути впевненість звичайного читача? Високою в тому, що явище спрямованого повернення реальне в цій установці й що активність центрального комплексу, пов'язана з курсом і метою, має значення. Помірною щодо моделі як компактного пояснення. Низькою щодо будь-якого твердження, яке без змін переносить її у відкрите повітря або називає повною картою.

Джерела

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