The Clean Paper

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

Muszka może stracić zapach i mimo to zawrócić. W wirtualnej smudze pomógł zapamiętany kierunek

Unieruchomione muszki owocowe wielokrotnie wracały do granicy zapachu po wejściu w czyste powietrze. Zachowanie, modelowanie i zaburzenia neuronalne wspierają istnienie zwartej pamięci kierunku, a nie pełnej mapy. Wynik pochodzi z kontrolowanego testu w wirtualnej rzeczywistości i nie pokazuje jeszcze tej samej strategii podczas swobodnego lotu w naturze.

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

Muszka może stracić zapach i mimo to zawrócić w jego stronę

Muszka zostawiła zapach za sobą.

Szła dalej przez czyste powietrze, czasem przez dziesiątki sekund i setki wirtualnych milimetrów. Potem skręcała w stronę przekroczonej wcześniej granicy i ponownie odnajdywała zapach. W tym momencie sam bodziec zapachowy nie mógł już wskazywać drogi powrotnej.

To główna obserwacja nowego badania opublikowanego w „Nature", poświęconego nawigacji muszek owocowych. Naukowcy twierdzą, że zwierzęta wykorzystywały zwartą pamięć kierunku: nie mapę całej smugi zapachowej ani pamięć przebytej odległości, lecz zapamiętany kierunek ku granicy, której nie dało się już wykryć.

Wynik jest uderzający, ponieważ pokazuje, jak niewielka ilość przechowanej informacji może wystarczyć. Łatwo go jednak przecenić. Muszki nie latały swobodnie w naturalnym krajobrazie. Chodziły uwięzione nad podtrzymywaną powietrzem kulą, w ściśle kontrolowanym świecie wirtualnym. Badanie wspiera strategię opartą na wektorze w tym aparacie; nie pokazuje, że muszki tworzą mapy umysłowe, nie wyjaśnia wszystkich sposobów podążania zwierząt za zapachem i nie identyfikuje komórek, w których pamięć jest fizycznie przechowywana.

Niewidzialny korytarz stworzyło oprogramowanie

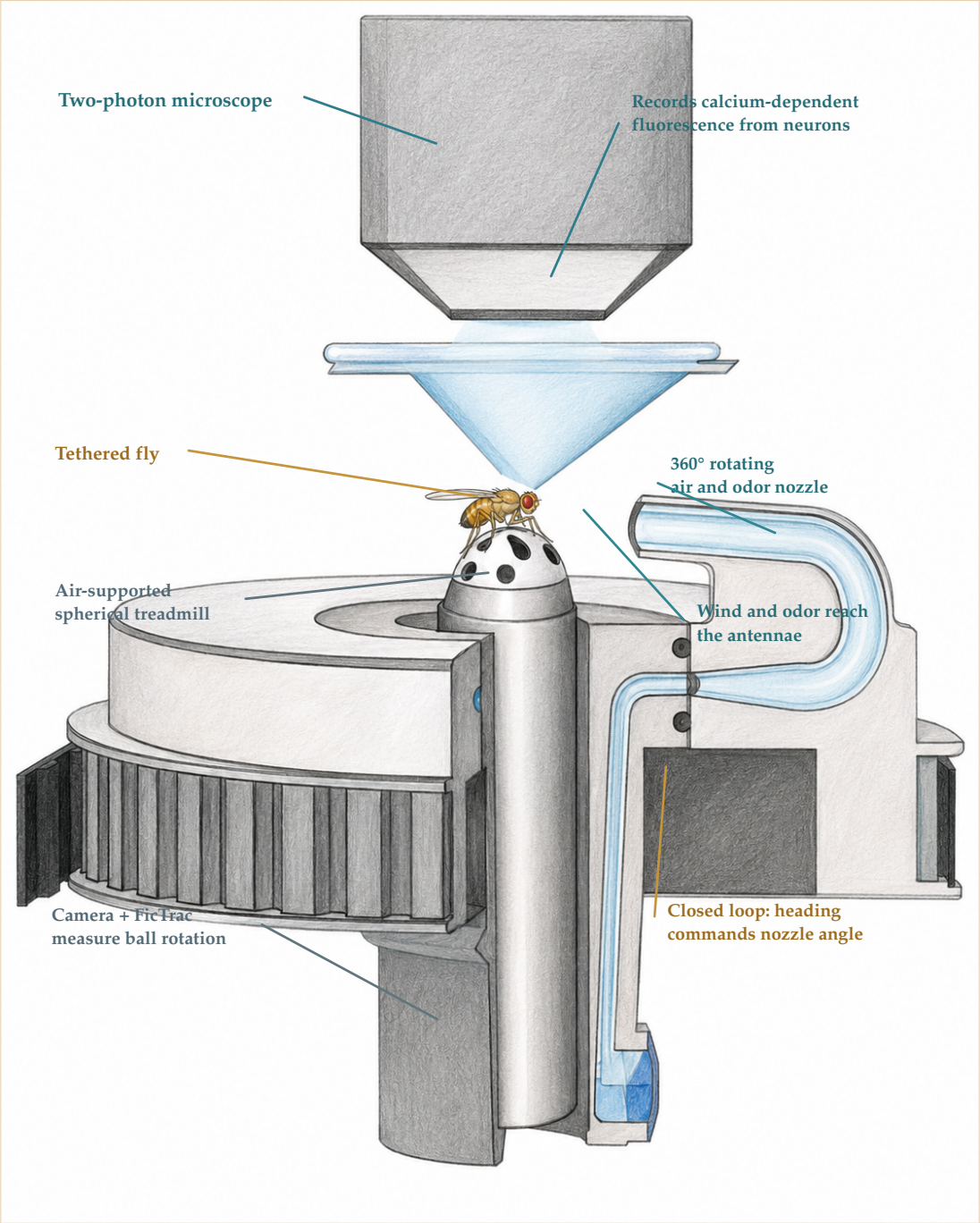
Smuga zapachowa to przemieszczający się obszar zapachu niesionego przez powietrze. Na zewnątrz ugina się, rozpada i ponownie łączy wraz ze zmianami wiatru. Trudno więc dokładnie ustalić, co zwierzę czuło w każdej chwili.

Naukowcy uczynili problem kontrolowalnym za pomocą **wirtualnej rzeczywistości ze sprzężeniem zwrotnym**. Ciało muszki unieruchomiono nad lekką kulą unoszącą się na poduszce powietrznej. Gdy muszka chodziła, kamera mierzyła obrót kuli około 60 razy na sekundę. Oprogramowanie przekładało ten obrót na wirtualną pozycję i kierunek ustawienia ciała w dwóch wymiarach.

Kierunek ten sterował zmotoryzowaną dyszą obracającą się o 360 stopni. Kiedy muszka zmieniała swój wirtualny kierunek, dysza przesuwała się wokół niej, aby wiatr pozostawał ustawiony zgodnie ze stałym kierunkiem w jej wirtualnym świecie. Jednocześnie regulatory przepływu masowego zmieniały ilość czystego powietrza lub zapachu octu jabłkowego docierającego do czułków zależnie od wirtualnej pozycji muszki. Przekroczenie granicy zdefiniowanej w oprogramowaniu włączało lub wyłączało zapach, tworząc fikcyjny korytarz szeroki na 50 milimetrów i długi na metr, choć muszka nigdy nie opuszczała kuli.

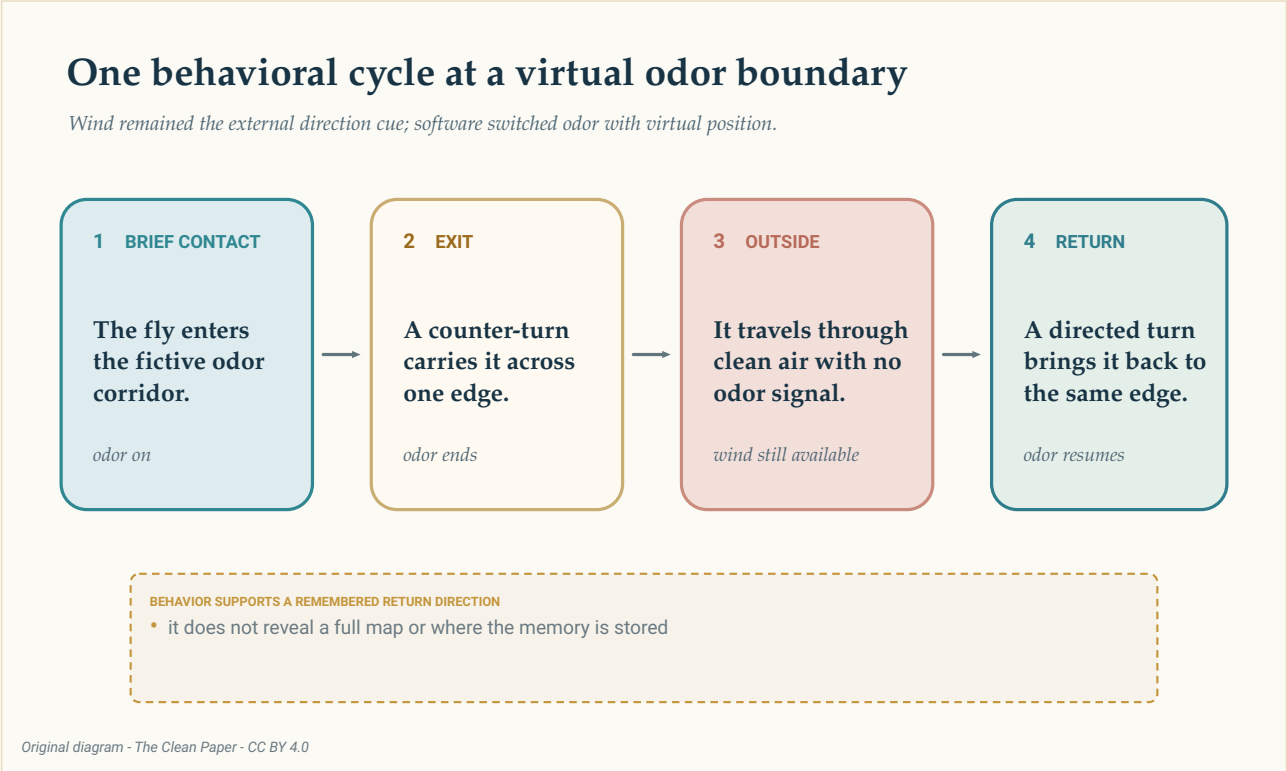
Aparat tworzył zsynchronizowany zapis wirtualnej pozycji muszki, kierunku ustawienia ciała, stanu zapachu i sterowania przepływem powietrza w każdym punkcie czasu. Na tej podstawie naukowcy rekonstruowali trajektorie, oznaczali każde wejście i wyjście oraz mierzyli bezpośredniość powrotu. Wiatr dostarczał zewnętrznej wskazówki kierunkowej; ruch samej muszki decydował, kiedy napo-

tykała którąkolwiek stronę wirtualnej granicy zapachu.



Muszka pozostawała unieruchomiona nad kulą podtrzymywaną powietrzem. Kamera i FicTrac przeliczały obrót kuli na wirtualny ruch i kierunek ustawienia ciała; następnie oprogramowanie obracało dyszę powietrzno-zapachową i przełączało zapach zależnie od wirtualnej pozycji. Podczas oddzielnych prób obrazowania neuronalnego mikroskop dwufotonowy nad muszką rejestrował zależną od wapnia fluorescencję neuronów EPG lub FC2, co pozwalało zestawić aktywność nerwową z zachowaniem. Mikroskop nie był potrzebny w każdej próbie behawioralnej.

The Clean Paper CC BY 4.0



W kontrolowanym teście muszka na krótko wchodziła do wirtualnego korytarza zapachowego, opuszczała go, przemieszczała się przez powietrze bez zapachu i wykonywała ukierunkowany powrót. Zachowanie wspiera istnienie zapamiętanego kierunku powrotu; nie ujawnia, gdzie przechowywana jest ta informacja.

The Clean Paper CC BY 4.0

W głównym eksperymencie z **korytarzem pionowym 40 muszek** wielokrotnie wchodziło w obszar zapachu, wykonywało przeciwskręt prowadzący na zewnątrz i wracało do tej samej krawędzi. „Pionowy” to określenie geometrii 0 stopni używane w artykule: długa oś korytarza biegła równolegle do kierunku pod wiatr. Nie oznacza to, że aparat ustawiono pionowo.

Autorzy nazywają ten wzorzec **śledzeniem krawędzi**. **Epizod** to jeden ciągły odcinek między przekroczeniami granicy: epizod wewnętrzny trwa od wejścia do wyjścia, a zewnętrzny — od wyjścia do powrotu muszki. W 755 epizodach wewnętrznych jedna wizyta trwała średnio 4,9 sekundy. Podczas powrotów średnia odległość od granicy wynosiła 10,4 milimetra. Mniej niż 4% spośród 793 epizodów prowadziło aż do przeciwległej krawędzi korytarza.

Te dwie ostatnie liczby opisują epizody, a nie setki niezależnych muszek. To ważne, ponieważ jedno zwierzę może dostarczyć wiele epizodów.

Powroty nie były tylko stałym odruchem pod wiatr

Kilka eksperymentów sprawdzało prostsze wyjaśnienia.

Najpierw naukowcy zmienili to, co działo się **wzdłuż** korytarza, gdy muszka szła pod wiatr. Zapach mógł stawać się silniejszy ku wirtualnemu źródłu, pozostawać stały albo słabnąć. We wszystkich

trzech przypadkach muszki tworzyły podobne trajektorie. Prosta zasada w rodzaju „idź tam, gdzie zapach się nasila” nie może więc wyjaśnić śledzenia krawędzi w tym aparacie.

Następnie złagodzono **boczną** krawędź korytarza do profilu Gaussa, w którym stężenie zmieniało się stopniowo zamiast przełączać skokowo. Muszki gromadziły się w pobliżu zbocza, gdzie stężenie zmieniało się najszybciej, a nie w środku, gdzie zapach był najsilniejszy. Istotną wskazówką była zatem boczna zmiana wyznaczająca skuteczną granicę, a nie konieczny wzrost stężenia ku źródłu wzdłuż korytarza.

Nie oznacza to, że gradienty stężenia nigdy nie mają znaczenia w naturze. Oznacza jedynie, że w badanych warunkach wzrost ku źródłu nie był konieczny do tego zachowania.

Naukowcy zmieniali również orientację korytarza. Oddzielne grupy śledziły korytarze ustawione pod kątem 0, 45 i 90 stopni, a kolejna grupa napotykała korytarz, który po wyjściu przeskakiwał w bok. Liczebności grup wynosiły odpowiednio 40, 21, 20 i 24 muszki. Trajektorie zewnętrzne zmieniały się wraz z geometrią. Ogólna zasada „zawsze skręcaj pod wiatr” nie wyjaśnia tej elastyczności.

W tym układzie zapach docierał do obu czułków w odstępie około dwóch milisekund. Połączenie obustronnej aktywacji optogenetycznej z wiatrem mogło odtworzyć wzorzec podobny do śledzenia krawędzi. **Optogenetyka** wykorzystuje białka światłoczułe do zmieniania aktywności wybranych komórek. Wynik sugeruje tutaj, że różnica czasu dotarcia zapachu do lewego i prawego czułka nie była konieczna do tego zachowania. Nie oznacza to, że porównanie obustronne jest nieistotne dla swobodnie poruszających się zwierząt w innych smugach.

Wektor jest mniejszy niż mapa

Wektor to kierunek wraz z wielkością. Użyteczną przechowywaną wartością był tu głównie kierunek: w którą stronę muszka powinna skręcić, aby dotrzeć do granicy smugi? Badanie nie znalazło dowodów, że muszka zapisywała pełny układ smugi lub własne położenie w jej obrębie.

Autorzy najpierw utworzyli sztuczne trajektorie, tasując składniki rzeczywistych ruchów muszek. Losowali zaobserwowane długości odcinków i kąty skrętów, po czym łączyli je w całość. Niektórzy syntetyczni wędrowcy ostatecznie ponownie trafiali na granicę zapachu, ale oddalali się bardziej i wracali mniej bezpośrednimi trasami niż prawdziwe muszki. Nawet dodanie zwykłej tendencji muszek do skręcania pod wiatr nie odtwarzało krótkich, ukierunkowanych powrotów. Rzeczywiste zachowanie zawierało więc więcej informacji kierunkowej niż losowa mieszanka tych samych ruchów.

Następnie naukowcy zbudowali model z dwoma trybami: **oddalania się od granicy** i **powrotu do granicy**. Tryby te nie były etykietami przypisanymi każdej chwili wewnątrz lub na zewnątrz obszaru zapachu. Stanowiły alternatywne reguły sterowania, które mogły się przełączać podczas ruchu muszki.

Każde przekroczenie granicy dostarczało modelowi kierunku do zapamiętania. Przy wyjściu aktualizował on kierunek używany podczas oddalania się. Przy wejściu aktualizował osobny kierunek powrotny: w praktyce „gdy znalazłam granicę, poruszałam się w tę stronę”. Podczas późniejszego

powrotu zapamiętany kierunek odchylał ruch symulowanej muszki z powrotem ku krawędzi.

Naukowcy dopasowali model do trajektorii z korytarzy ustawionych pod kątem 0, 45 i 90 stopni. W zbiorczym porównaniu 72 rzeczywiste muszki i 75 symulacji dawały podobne statystyki trajektorii. Gdy usunięto kierunek powrotu wyuczony przy wejściu, śledzenie stawało się mniej skuteczne we wszystkich orientacjach korytarza. Wspiera to użyteczność pamięci kierunku wejścia; nie dowodzi, że mózg muszki dosłownie wykonuje równania modelu.

> **Co oznacza „pamięć" w tym artykule?**
>
> Naukowcy nie odczytali przechowywanej strzałki bezpośrednio z mózgu muszki. „Pamięć kierunkowa" jest wnioskiem wspartym zachowaniem, modelem i pomiarami neuronalnymi. Model pokazuje, że kilka zmieniających się kierunków może odtworzyć ważne statystyki trajektorii. Nie dowodzi, że muszka dosłownie realizuje te równania ani że jedna nazwana grupa neuronów jest miejscem przechowywania pamięci.

Dodatkowe doświadczenie z odcinkiem ustawionym pod przeciwnym kątem 45 stopni przesunęło późniejsze zachowanie 10 muszek, co porównano z 29 symulacjami modelu. Czyni to wyjaśnienie kierunkowe bardziej szczegółowym niż opis dopasowany po fakcie, choć nadal pozostaje ono interpretacją opartą na modelu.

Odniesienie kierunku i bieżący cel

Następnie badacze mierzyli i zaburzali aktywność w **kompleksie centralnym** mózgu muszki, regionie uczestniczącym w nawigacji.

> **Dwa sygnały o różnych zadaniach**
>
> EPG i FC2 to nazwy dwóch populacji neuronów kompleksu centralnego. Aktywność EPG działa jak wskazanie kompasu: śledzi kierunek, w którym muszka jest obecnie zwrócona względem wiatru. Aktywność FC2 wiąże się z kierunkiem, w którym muszka próbuje się poruszać. Obwód sterujący położony dalej w szlaku może porównywać aktualny kierunek z celem. Badanie testuje obie populacje, ale nie pokazuje, że którakolwiek z nich sama przechowuje całą pamięć.

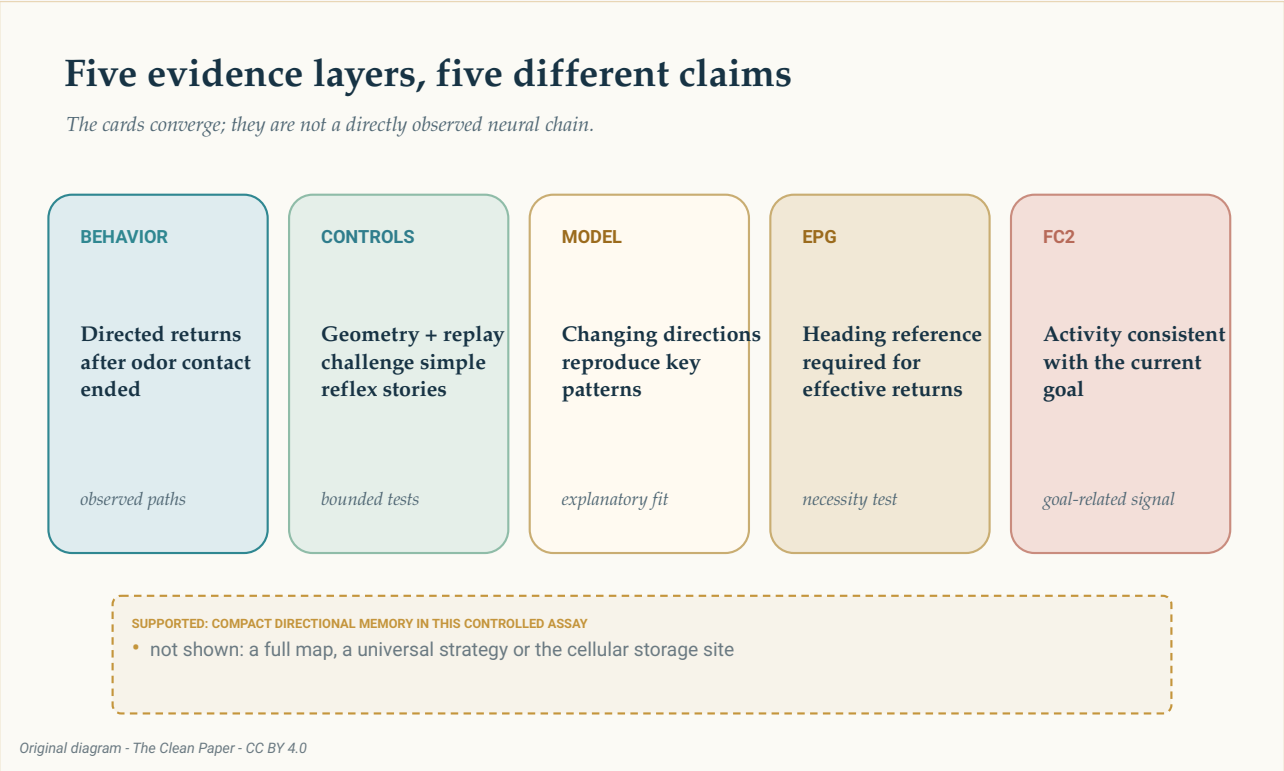
Neurony EPG przenoszą sygnał kierunku ustawienia ciała: ich wzorzec aktywności śledzi kierunek, w którym muszka jest zwrócona względem zewnętrznej wskazówki. Za pomocą obrazowania wapniowego — pośredniego optycznego odczytu aktywności nerwowej — naukowcy stwierdzili, że faza aktywności EPG odpowiadała kierunkowi względem wiatru podczas śledzenia krawędzi. Analiza obejmowała 16 prób u 9 muszek.

Aby zahamować neurony EPG, naukowcy zmodyfikowali je tak, by wytwarzały **GtACR1**, kanał anionowy włączany zielonym światłem. Dioda LED pozostawała włączona przez całą próbę testową, aktywując kanał i tłumiąc wybrane neurony; takie samo oświetlenie nie upośledzało muszek z kontroli

genetycznej.

Po takim zahamowaniu neuronów EPG 12 muszek eksperymentalnych wykonywało mniej skuteczne ukierunkowane powroty niż 6 muszek kontrolnych. Ograniczony wniosek brzmi: odniesienie kierunkowe przenoszone przez aktywność EPG było potrzebne do skutecznego śledzenia krawędzi w badanych warunkach. Nie jest to dowód, że same neurony EPG przechowywały kierunek granicy.

Neurony FC2 wykazywały inną zależność. Aktywność ich populacji wiązała się z bieżącym celem nawigacyjnym i przed skrętami w teście wskazywała w stronę granicy smugi. Obrazowanie obejmowało 6 muszek, a porównania po wyciszeniu — grupy od 9 do 14 muszek zależnie od analizy. Wyciszenie pogarszało śledzenie krawędzi.



Zachowanie, zmieniona geometria smugi, dopasowany model i dwa zaburzenia neuronalne wspierają różne części wyjaśnienia opartego na pamięci kierunkowej. Łącznie wspierają istnienie zwartego kierunku celu w tym kontrolowanym teście, a nie pełnej mapy lub udowodnionego komórkowego miejsca przechowywania.

The Clean Paper CC BY 4.0

To zbieżne dowody, a nie sfotografowany łańcuch przyczynowy. Aktywność EPG dostarczała wymaganego odniesienia kierunkowego. Aktywność FC2 była zgodna z kierunkiem celu i potrzebna do skutecznego zachowania. Eksperymenty nie zlokalizowały pojedynczego „engramu” pamięci ani nie dowiodły, że synapsy FC2 fizycznie przechowywały kierunek.

Jako przybliżoną analogię w ludzkiej skali wyobraź sobie, że wychodzisz z wąskiego pasa mgły, a stały wiatr nadal mówi ci, gdzie jest północ. Kompas może wskazać, w którą stronę jesteś zwrócony, ale powrót do mgły wymaga również zapamiętania kierunku ku jej krawędzi. Porównanie obecnego ustawienia z pożądanym kierunkiem mówi, w którą stronę skręcić. Taki podział zadań sugeruje to badanie dla sygnałów EPG i FC2. Jest to analogia wyjaśniająca, a nie dowód, że ludzie używają tych

samych komórek lub algorytmu.

Pamięć zależała od działania, a nie tylko od czasu pojawiania się zapachu

W eksperymencie z odtwarzaniem muszki otrzymywały tę samą sekwencję czasów zapachu co wcześniej, ale czas ten odłączono od ich bieżącego zachowania. Wyuczony kierunkowy efekt słabł w kolejnych epizodach odtwarzania. Wspiera to **operantową**, powiązaną z działaniem aktualizację: liczyła się nie sama bierna ekspozycja na sekwencję zapachów, lecz związek między zapachem a ruchem muszki.

Mianownik zmienia się między tymi analizami. Panele danych rozszerzonych obejmują 8 lub 9 muszek zależnie od porównania; seria kolejnych epizodów wykorzystuje 8 muszek; panele trajektorii wymagają co najmniej 10 skutecznych wejść; a sparowane panele modelu wykorzystują 21 symulowanych trajektorii również spełniających ten próg wejść. Nie jest to jedna połączona próba ośmiu osobników.

Bardziej nieregularna smuga była użyteczna, ale nadal wirtualna

Naukowcy odtworzyli również wcześniej zarejestrowaną, bardziej nieregularną smugę. Zwiększyli ją pięciokrotnie w przestrzeni i czasie, aby unieruchomione muszki mogły napotykać ją wystarczająco często. **Dziesięć z 12 muszek** dotarło na odległość mniejszą niż 50 wirtualnych milimetrów od jej źródła.

Nie oznacza to, że dziesięć muszek znalazło rzeczywiste źródło na otwartym powietrzu. Jest to wynik w kontrolowanym odtworzeniu naturalistycznej smugi.

Dla każdego typu dynamicznej smugi model wygenerował 2000 trajektorii. Porównanie przeskalowanej smugi analizowało 1850 z tych 2000 po wymaganiu skutecznego wejścia i wykluczeniu trajektorii rozpoczynających się zbyt blisko źródła. Pamięć pomagała bardziej w pobliżu źródła, gdzie kolejne spotkania zachowywały spójną strukturę kierunkową, a mniej w bardziej turbulentnym obszarze dalej z wiatrem.

To zastrzeżenie jest częścią wyniku. Zwarty kierunek może pomagać tylko wtedy, gdy świat pozostaje na tyle spójny, by poprzednie spotkanie mówiło coś użytecznego o następnym.

Czego badanie nie pokazuje

- **Nie** pokazuje, że muszka tworzy pełną mapę przestrzenną.
- **Nie** pokazuje swobodnego lotu przez niezmienioną naturalną smugę.
- **Nie** ustala, że każda nawigacja oparta na zapachu wykorzystuje tę strategię.
- **Nie** pokazuje, że neurony EPG lub FC2 są wyłącznym fizycznym miejscem przechowywania pamięci.
- **Nie** zmienia dopasowanego modelu w dosłowny biologiczny algorytm muszki.
- **Nie** pozwala na bezpośrednie uogólnienie na ludzką nawigację.

Badanie jest najmocniejsze tam, gdzie jest najbardziej szczegółowe. Sterowanie ze sprzężeniem zwrotnym dało naukowcom precyzyjny dostęp do każdego kontaktu z zapachem. Zmiany geometrii, odtwarzanie, modelowanie, obrazowanie wapniowe i wyciszanie testowały następnie różne części jednego wyjaśnienia. Kohorty behawioralne, obrazowane i poddawane wyciszaniu były jednak oddzielne; liczebności prób nie ustalono z góry; zbieranie i analiza danych nie były randomizowane ani zaślepione; a mniej niż 10% unieruchomionych muszek wykluczono z powodu problemów z aklimatyzacją, reakcją lub śledzeniem.

Te ograniczenia nie unieważniają zjawiska. Wyznaczają jego granice.

Zwięzłe podsumowanie

Unieruchomione muszki owocowe chodzące przez wirtualny korytarz zapachowy wielokrotnie wracały do granicy po pozostawieniu zapachu za sobą. Zmiany stężenia i geometrii korytarza, dopasowany model przełączający, obrazowanie neuronalne oraz wyciszanie optogenetyczne wspierają wyjaśnienie, w którym muszka używa zwartego zapamiętanego kierunku zamiast pełnej mapy. Neurony EPG dostarczały niezbędnego odniesienia kierunku ustawienia ciała, natomiast aktywność FC2 była zgodna z bieżącym kierunkiem celu. Wynik jest ograniczony do kontrolowanego testu chodzenia; nie identyfikuje komórkowego miejsca przechowywania pamięci ani nie pokazuje tej samej strategii podczas swobodnego lotu w naturze.

Kontrola bez upiększeń

Co pokazuje artykuł: W teście z unieruchomionymi muszkami i sprzężeniem zwrotnym zwierzęta wykonywały ukierunkowane powroty do wirtualnych granic zapachu, których nie mogły już wyczuć. Liczne kontrole behawioralne, modelowanie i zaburzenia neuronalne wspierają strategię opartą na wektorze.

Co jest wnioskiem: Że zachowanie wykorzystuje zwartą pamięć kierunkową oraz że aktywność populacji FC2 reprezentuje bieżący cel nawigacyjny. Treści pamięci nie odczytano bezpośrednio.

Czego badanie nie pokazuje: Pełnej mapy umysłowej, uniwersalnej strategii węchowej, skuteczności swobodnego lotu w naturalnej smudze, pojedynczego miejsca przechowywania pamięci ani ludzkiego odpowiednika.

Główne ograniczenia: Jeden gatunek i kontrolowany aparat; różne kohorty muszek i jednostki analizy między eksperymentami; pośrednie sygnały wapniowe; testy konieczności, które nie dowodzą wystarczalności; oraz naturalistyczna smuga, która została odtworzona i przeskalowana.

Jak duże zaufanie powinien mieć ogólny czytelnik? Wysokie, że zjawisko ukierunkowanego powrotu jest rzeczywiste w tym aparacie oraz że aktywność kompleksu centralnego związana z kierunkiem i celem ma znaczenie. Umiarkowane wobec modelu jako zwartego wyjaśnienia. Niskie wobec twierdzeń rozszerzających wynik bez zmian na otwarte powietrze lub nazywających go pełną mapą.

Źródła

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