The Clean Paper

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

Uma mosca pode perder um cheiro e ainda voltar em sua direção. Em uma pluma virtual, uma direção lembrada ajudou

Moscas-das-frutas presas a um suporte retornaram repetidamente a uma fronteira de odor depois de caminhar para o ar limpo. Comportamento, modelagem e perturbações neurais sustentam uma memória compacta de direção, não um mapa completo. O resultado vem de um ensaio controlado de realidade virtual e ainda não demonstra a mesma estratégia no voo livre em ambiente natural.

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

Uma mosca pode perder um cheiro e ainda voltar em sua direção

A mosca havia deixado o cheiro para trás.

Ela continuou caminhando pelo ar limpo, às vezes por dezenas de segundos e centenas de milímetros virtuais. Então virou em direção à fronteira que havia cruzado e encontrou novamente o odor. Naquele momento, o próprio cheiro não podia indicar o caminho de volta.

Essa é a observação central de um novo estudo na Nature sobre a navegação de moscas-das-frutas. Os pesquisadores argumentam que as moscas usaram uma memória compacta de direção: não um mapa de toda a pluma de odor, nem uma memória da distância percorrida, mas um rumo lembrado em direção a uma fronteira que já não podia ser detectada.

O resultado chama atenção porque mostra como uma quantidade mínima de informação armazenada pode ser suficiente. Também é fácil exagerá-lo. Essas moscas não voaram livremente por uma paisagem natural. Caminharam presas a um suporte sobre uma esfera sustentada por ar, dentro de um mundo virtual rigidamente controlado. O estudo sustenta uma estratégia baseada em vetores nesse aparelho; não mostra que as moscas construam mapas mentais, não explica todas as formas pelas quais os animais seguem cheiros e não identifica as células nas quais uma memória é fisicamente armazenada.

O corredor invisível era produzido por software

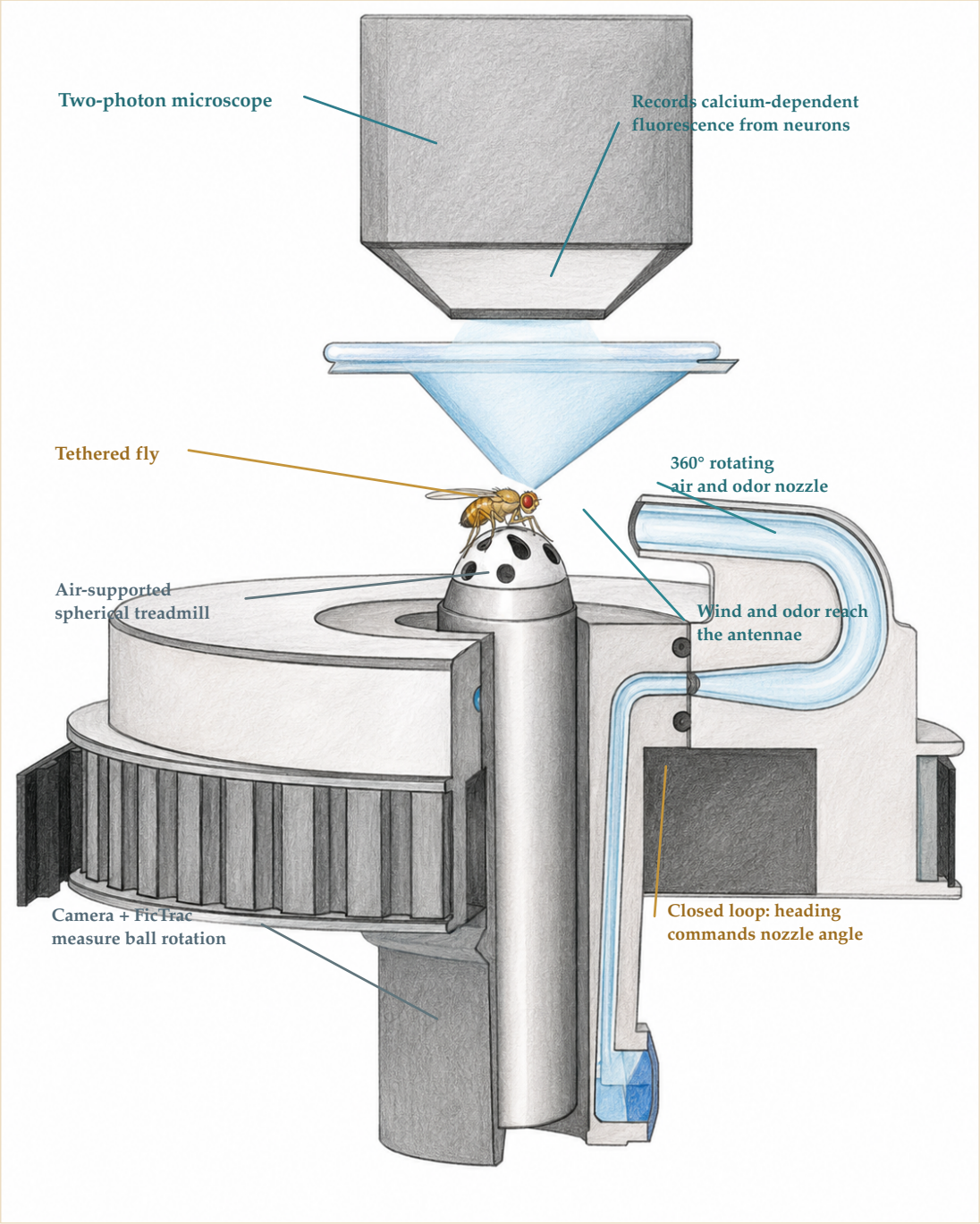
Uma pluma de odor é a região móvel de odor transportada pelo ar. Ao ar livre, uma pluma se curva, se fragmenta e volta a se conectar conforme o vento muda. Isso dificulta saber exatamente o que um animal sentiu em cada momento.

Os pesquisadores tornaram o problema controlável com **realidade virtual em circuito fechado**. O corpo da mosca ficava preso no lugar acima de uma esfera leve que flutuava sobre ar. Enquanto a mosca caminhava, uma câmera media a rotação da esfera aproximadamente 60 vezes por segundo. O software traduzia essa rotação em uma posição e uma orientação virtuais em duas dimensões.

Essa orientação controlava um bocal motorizado capaz de girar em 360 graus. À medida que a mosca mudava sua orientação virtual, o bocal se deslocava ao redor dela para manter o vento alinhado com uma direção estável no mundo virtual. Ao mesmo tempo, controladores de fluxo de massa alteravam quanto ar limpo ou odor de vinagre de maçã chegava às antenas de acordo com a posição virtual da mosca. Cruzar uma fronteira definida por software ligava ou desligava o odor, criando um corredor fictício com 50 milímetros de largura e um metro de comprimento, embora a mosca nunca saísse da esfera.

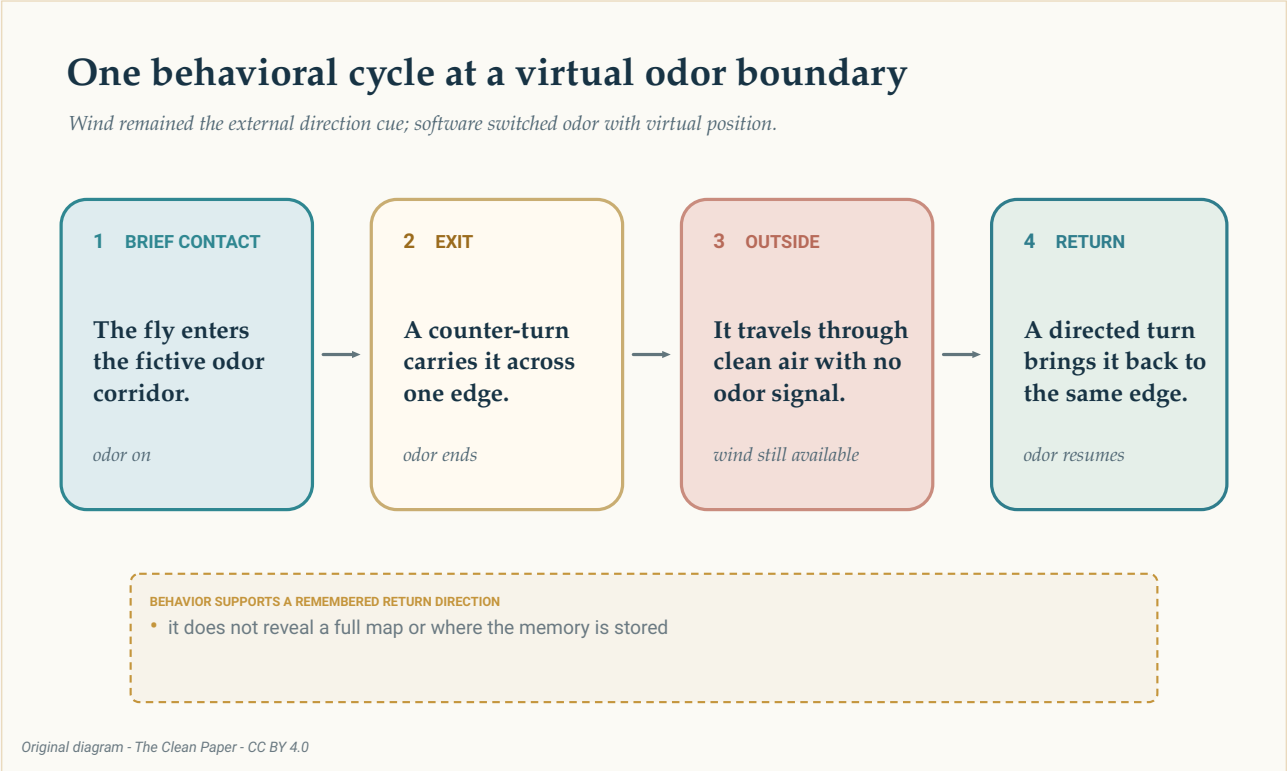
O aparelho produzia, em cada instante, um registro sincronizado da posição virtual da mosca, de sua orientação, do estado do odor e dos controles de fluxo de ar. A partir desse registro, os pesquisadores reconstruíram trajetórias, marcaram cada entrada e saída e mediram quão diretamente a mosca

retornava. O vento fornecia a referência externa de direção; o próprio movimento da mosca determinava quando ela encontrava cada lado da fronteira virtual de odor.



A mosca permanecia presa acima de uma esfera sustentada por ar. Uma câmera e o FicTrac convertiam a rotação da esfera em movimento e orientação virtuais; o software então girava o bocal de ar e odor e ligava ou desligava o odor conforme a posição virtual. Em ensaios separados de imagem neural, o microscópio de dois fótons acima da mosca registrava fluorescência dependente de cálcio em neurônios EPG ou FC2, permitindo alinhar a atividade neural ao comportamento. O microscópio não era necessário em todos os ensaios comportamentais.

The Clean Paper CC BY 4.0



No ensaio controlado, uma mosca entrava brevemente no corredor virtual de odor, saía dele, atravessava o ar sem odor e fazia um retorno direcionado. O comportamento sustenta uma direção de retorno lembrada; não revela onde essa informação é armazenada.

The Clean Paper CC BY 4.0

No experimento principal com **corredor vertical**, **40 moscas** entraram repetidamente no odor, fizeram uma contracurva para sair dele e retornaram à mesma borda. “Vertical” é o nome usado no artigo para a geometria de 0 grau: o eixo longo do corredor corria paralelamente à direção contra o vento. Não significa que o aparelho estivesse na posição vertical.

Os autores chamam esse padrão de **rastreamento da borda**. Um **episódio** é um período contínuo entre cruzamentos da fronteira: um episódio interno vai da entrada à saída, e um episódio externo, da saída até o retorno da mosca. Em 755 episódios internos, uma visita durou em média 4,9 segundos. Durante os retornos, a distância média da fronteira foi de 10,4 milímetros. Menos de 4% de 793 episódios atravessaram todo o corredor até a borda oposta.

Esses dois últimos números descrevem episódios, não centenas de moscas independentes. A distinção importa porque um único animal pode contribuir com muitos episódios.

Os retornos não eram apenas um reflexo fixo contra o vento

Vários experimentos testaram explicações mais simples.

Primeiro, os pesquisadores mudaram o que acontecia **ao longo** do corredor enquanto a mosca caminhava contra o vento. O odor podia ficar mais forte em direção à fonte virtual, permanecer constante

ou ficar mais fraco. As moscas produziram trajetórias semelhantes nos três casos. Portanto, uma regra simples como “continue indo para onde o cheiro fica mais forte” não consegue explicar o rastreamento da borda nesse aparelho.

Em seguida, suavizaram a borda **lateral** do corredor em um perfil gaussiano, no qual a concentração mudava gradualmente em vez de ligar e desligar de modo abrupto. As moscas se concentraram perto do flanco onde a concentração mudava mais rapidamente, e não no centro, onde o odor era mais forte. O sinal relevante era, portanto, a mudança lateral que marcava uma fronteira efetiva, e não um aumento obrigatório na direção da fonte ao longo do corredor.

Isso não significa que gradientes de concentração nunca importem na natureza. Significa que um aumento em direção à fonte não era necessário para esse comportamento nas condições testadas.

Os pesquisadores também mudaram a orientação do corredor. Grupos separados rastrearam corredores verticais, a 45 graus e a 90 graus, e outro grupo encontrou um corredor que saltava lateralmente após as saídas. Os grupos tinham 40, 21, 20 e 24 moscas, respectivamente. Suas trajetórias externas mudaram conforme a geometria. Uma regra genérica como “sempre vire contra o vento” não explica essa flexibilidade.

Nesse aparelho, o odor chegava às duas antenas com uma diferença de aproximadamente dois milissegundos. Combinar ativação optogenética bilateral com vento conseguiu reproduzir um padrão semelhante ao rastreamento da borda. **Optogenética** usa proteínas sensíveis à luz para alterar células selecionadas. Aqui, o resultado sugere que uma diferença entre esquerda e direita no momento de chegada do odor não era necessária para esse comportamento. Isso não torna a comparação bilateral irrelevante para animais em movimento livre dentro de outras plumas.

Um vetor é menor que um mapa

Um **vetor** é uma direção acompanhada de um tamanho. A quantidade armazenada útil aqui era principalmente direcional: para que lado a mosca deveria virar para alcançar a fronteira da pluma? O estudo não encontrou evidências de que ela armazenasse um esquema completo da pluma ou de sua própria posição dentro dela.

Primeiro, os autores criaram trajetórias artificiais embaralhando os componentes dos movimentos reais das moscas. Sortearam comprimentos de percurso e ângulos de curva observados e os uniram. Alguns desses caminhantes sintéticos acabaram atingindo novamente a fronteira de odor, mas vagaram mais longe e seguiram rotas menos diretas que as moscas reais. Mesmo acrescentar a tendência habitual das moscas de virar contra o vento não reproduziu os retornos curtos e direcionados. O comportamento real continha, portanto, mais informação direcional do que uma recombinação aleatória dos mesmos movimentos.

Os pesquisadores então construíram um modelo com dois modos: **afastar-se da fronteira** e **retornar à fronteira**. Esses modos não eram rótulos para cada momento dentro ou fora do odor. Eram regras alternativas de direção que podiam alternar conforme a mosca se movia.

Cada cruzamento da fronteira fornecia ao modelo uma direção para lembrar. Na saída, ele atualizava

uma direção usada durante o afastamento. Na entrada, atualizava uma direção de retorno separada: na prática, “quando encontrei a fronteira, eu me movia nesta direção”. Durante um retorno posterior, essa direção lembrada inclinava o movimento da mosca simulada de volta para a borda.

Os pesquisadores ajustaram o modelo às trajetórias nos corredores de 0, 45 e 90 graus. Na comparação resumida, 72 moscas reais e 75 simulações produziram estatísticas de trajetória semelhantes. Quando a direção de retorno aprendida na entrada era removida, o rastreamento se tornava menos eficiente em todas as orientações do corredor. Isso sustenta a utilidade de uma memória da direção de entrada; não prova que o cérebro da mosca execute literalmente as equações do modelo.

> **O que “memória” significa neste artigo?**
>
> Os pesquisadores não leram diretamente uma seta armazenada no cérebro da mosca. “Memória direcional” é uma inferência sustentada pelo comportamento, por um modelo e por medições neurais. O modelo mostra que algumas direções variáveis conseguem reproduzir estatísticas importantes das trajetórias. Não prova que a mosca implemente literalmente as equações, nem que um único grupo nomeado de neurônios seja o local de armazenamento.

Uma experiência adicional com um segmento de 45 graus orientado no sentido oposto alterou o comportamento posterior de 10 moscas, ao lado de 29 simulações do modelo. Isso torna a explicação direcional mais específica do que uma descrição formulada depois dos resultados, embora continue sendo uma interpretação baseada em modelo.

Uma referência de orientação e uma meta atual

Em seguida, o estudo mediu e perturbou a atividade no **complexo central** da mosca, uma região cerebral envolvida na navegação.

> **Dois sinais com funções diferentes**
>
> EPG e FC2 são nomes de duas populações de neurônios no complexo central. A atividade de EPG funciona como a leitura de uma bússola: acompanha a direção para a qual a mosca está voltada em relação ao vento. A atividade de FC2 está associada à direção na qual a mosca tenta se deslocar. Um circuito de direção a jusante pode comparar a orientação atual com essa meta. O estudo testa as duas populações, mas não mostra que qualquer uma delas, isoladamente, armazene toda a memória.

Os **neurônios EPG** transportam um sinal de orientação: seu padrão de atividade acompanha a direção para a qual a mosca está voltada em relação a uma referência externa. Usando imagem de cálcio, uma leitura óptica indireta da atividade neural, os pesquisadores descobriram que a fase da atividade de EPG acompanhava a orientação em relação ao vento durante o rastreamento da borda. Essa análise usou 16 ensaios de 9 moscas.

Para inibir os neurônios EPG, os pesquisadores os modificaram para expressar **GtACR1**, um canal de ânions ativado por luz verde. Um LED permaneceu aceso durante todo o ensaio de teste, ativando esse canal e suprimindo os neurônios selecionados; a mesma iluminação não prejudicou as moscas de controle genético.

Quando os neurônios EPG foram inibidos dessa forma, 12 moscas experimentais fizeram retornos direcionados menos eficazes que 6 moscas de controle genético. A conclusão delimitada é que a referência de orientação transportada pela atividade de EPG era necessária para um rastreamento eficaz da borda nas condições testadas. Não é evidência de que os neurônios EPG, sozinhos, armazenassem a direção da fronteira.

Os **neurônios FC2** mostraram uma relação diferente. A atividade de sua população estava associada à meta atual de navegação e apontava em direção à fronteira da pluma antes das curvas no ensaio. A imagem usou 6 moscas, e as comparações de silenciamento usaram grupos de 9 a 14 moscas, dependendo da análise. O silenciamento prejudicou o rastreamento da borda.

O comportamento, as mudanças na geometria da pluma, um modelo ajustado e duas perturbações neurais sustentam partes diferentes da explicação por memória direcional. Em conjunto, eles sustentam uma direção de meta compacta neste ensaio controlado, não um mapa completo nem um local celular comprovado de armazenamento.

The Clean Paper CC BY 4.0

Trata-se de evidência convergente, não de uma cadeia causal fotografada. A atividade de EPG forneceu uma referência de orientação necessária. A atividade de FC2 era compatível com uma direção-meta e era necessária para um comportamento eficaz. Os experimentos não localizaram um único “engrama” de memória nem provaram que as sinapses de FC2 armazenassem fisicamente

a direção.

Como analogia aproximada em escala humana, imagine sair de um banco estreito de neblina enquanto um vento constante ainda indica onde fica o norte. Uma bússola pode mostrar para onde você está voltado, mas retornar à neblina também exige lembrar o rumo até sua borda. Comparar a orientação atual com esse rumo desejado indica para que lado virar. Essa é a divisão de trabalho sugerida aqui para os sinais EPG e FC2. É uma analogia explicativa, não evidência de que seres humanos usem as mesmas células ou o mesmo algoritmo.

A memória dependia da ação, não apenas do momento do odor

Em um experimento de reprodução, as moscas receberam a mesma sequência temporal de odor de antes, mas o momento de cada apresentação foi desconectado do que elas estavam fazendo naquele instante. O viés direcional aprendido enfraqueceu ao longo dos episódios reproduzidos. Isso sustenta uma atualização **operante**, vinculada à ação: o importante não era apenas a exposição passiva a uma sequência de odores, mas a relação entre o odor e o movimento da mosca.

O denominador muda entre essas análises. Os painéis de Dados Estendidos incluem 8 ou 9 moscas, dependendo da comparação; a série de episódios sequenciais usa 8 moscas; os painéis de trajetória exigem pelo menos 10 entradas efetivas; e os painéis correspondentes do modelo usam 21 trajetórias simuladas que também atendem a esse limiar de entrada. Não se trata de uma única amostra combinada de oito indivíduos.

Uma pluma mais irregular foi útil, mas continuava virtual

Os pesquisadores também reproduziram uma pluma previamente registrada e mais irregular. Ela foi ampliada cinco vezes no espaço e no tempo para que as moscas presas pudessem encontrá-la com frequência suficiente. **Dez de 12 moscas** chegaram a menos de 50 milímetros virtuais de sua fonte.

Isso não significa que dez moscas encontraram uma fonte real ao ar livre. É o desempenho em uma reprodução controlada de uma pluma de aspecto naturalista.

Para cada tipo de pluma dinâmica, o modelo gerou 2.000 trajetórias. A comparação com a pluma ampliada analisou 1.850 dessas 2.000 depois de exigir uma entrada efetiva e excluir trajetórias iniciadas perto demais da fonte. A memória ajudou mais nas proximidades da fonte, onde encontros sucessivos preservavam uma estrutura direcional coerente, e menos na região mais turbulenta a sotavento.

A ressalva faz parte do resultado. Uma direção compacta só pode ajudar quando o mundo permanece coerente o bastante para que um encontro anterior forneça informação útil sobre o próximo.

O que o estudo não mostra

- **Não** mostra uma mosca construindo um mapa espacial completo.
- **Não** mostra voo livre por uma pluma natural sem modificações.
- **Não** estabelece que toda navegação guiada por odor use essa estratégia.
- **Não** mostra que os neurônios EPG ou FC2 sejam o local físico exclusivo de armazenamento da memória.
- **Não** transforma o modelo ajustado no algoritmo biológico literal da mosca.
- **Não** se generaliza diretamente à navegação humana.

O estudo é mais forte onde é mais específico. O controle em circuito fechado deu aos pesquisadores acesso preciso a cada encontro com o odor. Mudanças de geometria, reprodução, modelagem, imagem de cálcio e silenciamento testaram então partes diferentes de uma única explicação. Mas as coortes comportamentais, de imagem e de silenciamento eram separadas; os tamanhos amostrais não foram definidos previamente; a coleta e a análise dos dados não foram randomizadas nem cegadas; e menos de 10% das moscas presas foram excluídas por problemas de aclimatação, resposta ou rastreamento.

Esses limites não apagam o fenômeno. Eles o definem.

Em resumo

Moscas-das-frutas presas a um suporte e caminhando por um corredor virtual de odor retornaram repetidamente a uma fronteira depois de deixar o cheiro para trás. Mudanças na concentração e na geometria do corredor, um modelo de alternância ajustado, imagem neural e silenciamento optogenético sustentam uma explicação na qual a mosca usa uma direção lembrada compacta, e não um mapa completo. Neurônios EPG forneceram uma referência de orientação necessária, enquanto a atividade de FC2 era compatível com a direção-meta atual. O resultado está limitado a um ensaio controlado de caminhada; não identifica o local celular de armazenamento da memória nem mostra o mesmo cálculo no voo livre em ambiente natural.

Leitura crítica

O que o artigo mostra: Em um ensaio de circuito fechado com moscas presas, elas fizeram retornos direcionados a fronteiras virtuais de odor que já não podiam sentir. Vários controles comportamentais, modelagem e perturbações neurais sustentam uma estratégia baseada em vetores.

O que é inferido: Que o comportamento usa uma memória direcional compacta e que a atividade da população FC2 representa uma meta atual de navegação. O conteúdo da memória não foi lido diretamente.

O que ele não mostra: Um mapa mental completo, uma estratégia olfativa universal, desempenho em voo livre dentro de uma pluma natural, um único local de armazenamento da memória ou um equivalente humano.

Principais limitações: Uma única espécie e um aparelho controlado; diferentes coortes de moscas e unidades de análise entre os experimentos; sinais indiretos de cálcio; testes de necessidade que não provam suficiência; e uma pluma naturalista que foi reproduzida e ampliada.

Quanta confiança um leitor geral deve ter? Alta confiança de que o fenômeno de retorno direcionado é real neste aparelho e de que a atividade do complexo central relacionada à orientação e à meta importa. Confiança moderada no modelo como explicação compacta. Baixa confiança em qualquer afirmação que o estenda sem alterações ao ar livre ou o chame de mapa completo.

Fontes

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