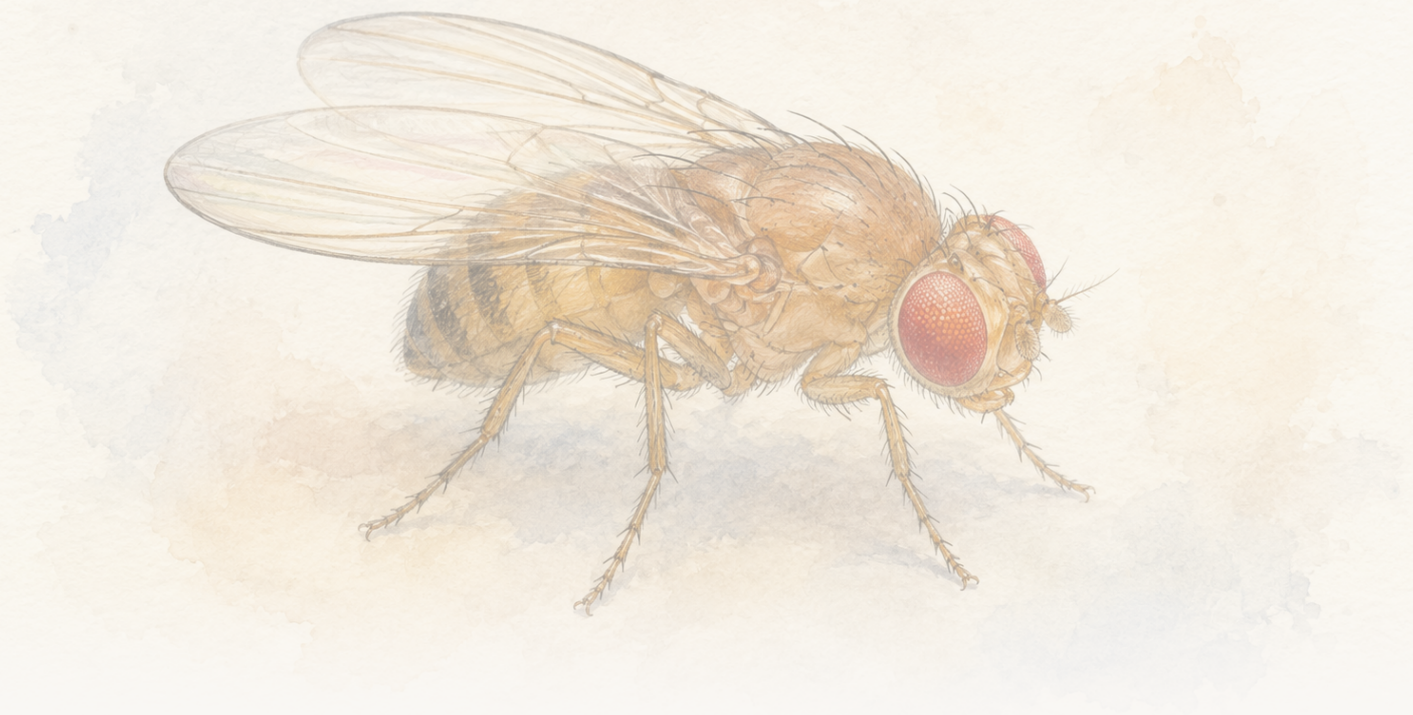


The Clean Paper

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

Một con ruồi có thể mất dấu mùi nhưng vẫn quay lại. Trong một luồng mùi ảo, một hướng được ghi nhớ đã giúp nó

Ruồi giấm bị cố định liên tục quay lại ranh giới mùi sau khi đi vào vùng không khí sạch. Hành vi, mô hình hóa và các can thiệp thần kinh hỗ trợ một trí nhớ hướng đi gọn, không phải một bản đồ hoàn chỉnh. Kết quả đến từ một phép thử thực tế ảo được kiểm soát và chưa cho thấy cùng chiến lược trong bay tự do ngoài tự nhiên.

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

Một con ruồi có thể mất dấu mùi nhưng vẫn quay lại hướng về phía nó

Con ruồi đã bỏ mùi hương lại phía sau.

Nó tiếp tục đi qua vùng không khí sạch, đôi khi trong hàng chục giây và hàng trăm milimét ảo. Rồi nó quay về phía ranh giới mà mình đã vượt qua và tìm thấy mùi trở lại. Vào thời điểm đó, chính mùi hương không thể chỉ cho nó đường quay về.

Đó là quan sát trung tâm trong một nghiên cứu mới trên Nature về định hướng ở ruồi giấm. Các nhà nghiên cứu cho rằng ruồi dùng một dạng trí nhớ hướng đi rất gọn: không phải bản đồ toàn bộ luồng mùi, cũng không phải trí nhớ về quãng đường đã đi, mà là một phương hướng được ghi nhớ về phía một ranh giới không còn có thể phát hiện được nữa.

Kết quả đáng chú ý vì cho thấy chỉ một lượng thông tin lưu trữ rất nhỏ cũng có thể đủ. Nhưng nó cũng dễ bị nói quá. Những con ruồi này không bay tự do trong một cảnh quan tự nhiên. Chúng đi bộ khi bị cố định trên một quả cầu đỡ bằng không khí trong một thế giới ảo được kiểm soát chặt chẽ. Nghiên cứu ủng hộ một chiến lược dựa trên vectơ trong thiết bị này; nó không cho thấy ruồi xây dựng bản đồ tinh thần, không giải thích mọi cách động vật lần theo mùi và cũng không xác định các tế bào nơi trí nhớ được lưu trữ về mặt vật lý.

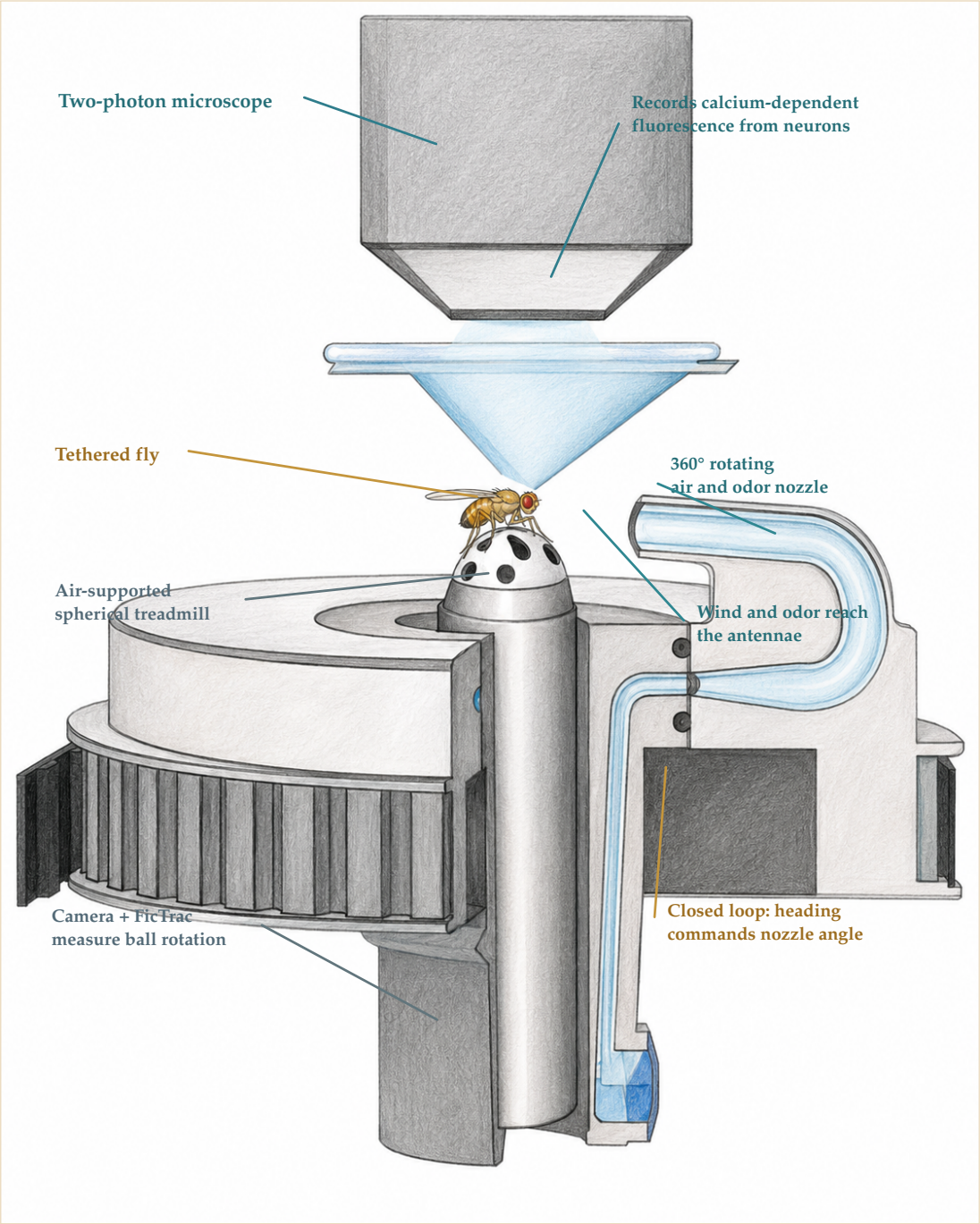
Hành lang vô hình được tạo bằng phần mềm

Một **luồng mùi** là vùng mùi chuyển động theo không khí. Ngoài tự nhiên, luồng mùi uốn cong, bị xé rời rồi nối lại khi gió thay đổi. Điều đó khiến rất khó biết chính xác một con vật đã ngửi thấy gì ở từng thời điểm.

Các nhà nghiên cứu khiến bài toán trở nên kiểm soát được bằng **thực tế ảo vòng kín**. Cơ thể ruồi được giữ cố định phía trên một quả cầu nhẹ nổi trên đệm khí. Khi ruồi bước đi, một camera đo sự quay của quả cầu khoảng 60 lần mỗi giây. Phần mềm chuyển chuyển động quay đó thành vị trí và hướng đi hai chiều trong không gian ảo.

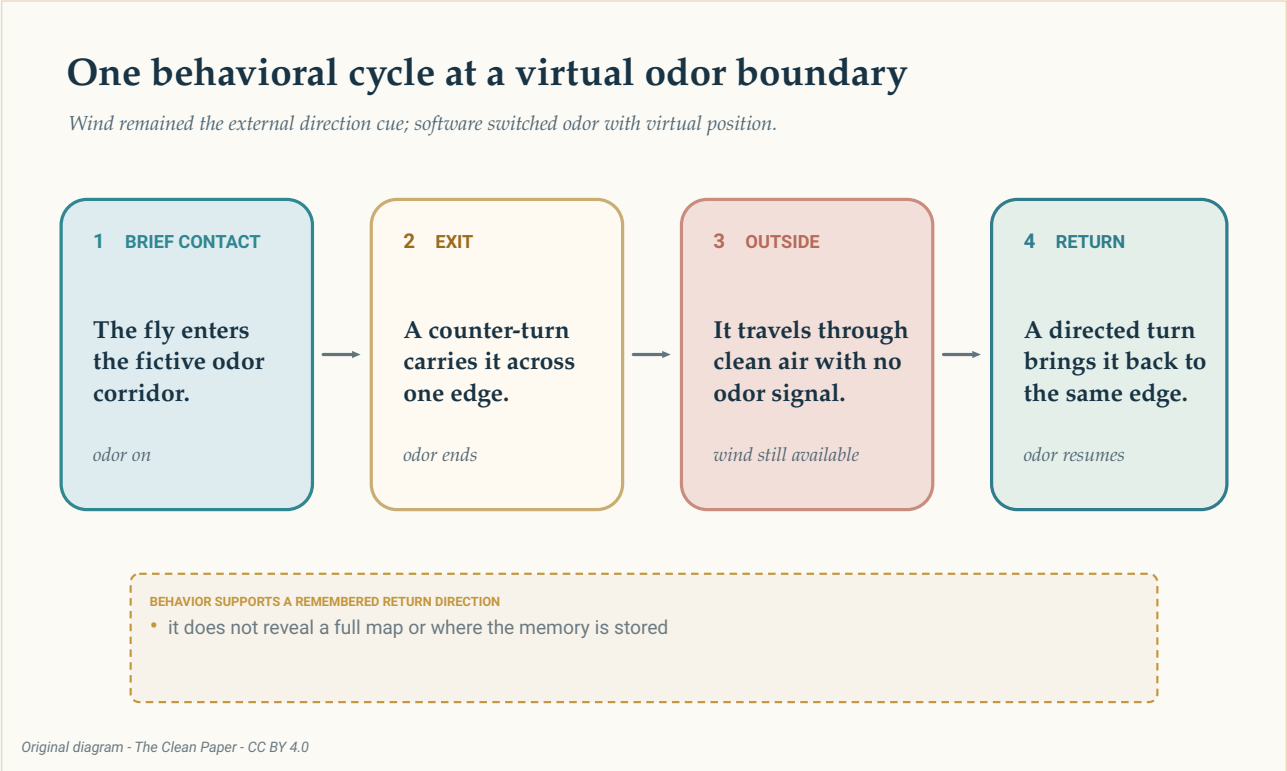
Hướng đi này điều khiển một vòi phun gắn động cơ có thể xoay 360 độ. Khi ruồi đổi hướng ảo, vòi phun di chuyển quanh nó để giữ gió thẳng hàng với một hướng ổn định trong thế giới ảo của ruồi. Đồng thời, các bộ điều khiển lưu lượng khối lượng thay đổi lượng không khí sạch hoặc mùi giấm táo đến râu theo vị trí ảo của ruồi. Vì thế, khi vượt qua một ranh giới được định nghĩa bằng phần mềm, mùi sẽ bật hoặc tắt, tạo ra một hành lang giả rộng 50 milimét và dài một mét dù con ruồi không hề rời quả cầu.

Thiết bị tạo ra một bản ghi đồng bộ về vị trí ảo, hướng đi, trạng thái mùi và điều khiển luồng khí của ruồi tại mỗi thời điểm. Từ bản ghi này, các nhà nghiên cứu tái dựng quỹ đạo, đánh dấu từng lần đi vào và đi ra, rồi đo mức độ trực tiếp của đường quay lại. Gió cung cấp tín hiệu hướng bên ngoài; chính chuyển động của ruồi quyết định khi nào nó gặp một trong hai mép của ranh giới mùi ảo.



Con ruồi được giữ cố định phía trên một quả cầu đỡ bằng không khí. Camera và FicTrac chuyển chuyển động quay của quả cầu thành chuyển động và hướng đi ảo; phần mềm sau đó xoay vòi phun không khí–mùi và bật tắt mùi theo vị trí ảo. Trong các thử nghiệm chụp ảnh thần kinh riêng biệt, kính hiển vi hai photon phía trên ruồi ghi huỳnh quang phụ thuộc canxi từ các nơron EPG hoặc FC2, cho phép căn chỉnh hoạt động thần kinh với hành vi. Kính hiển vi không cần thiết cho mọi thử nghiệm hành vi.

The Clean Paper CC BY 4.0



Trong phép thử được kiểm soát, một con ruồi đi vào hành lang mùi ảo trong thời gian ngắn, rời khỏi đó, di chuyển qua không khí không có mùi rồi quay lại có định hướng. Hành vi này ủng hộ sự tồn tại của một hướng quay lại được ghi nhớ; nó không cho biết thông tin đó được lưu ở đâu.

The Clean Paper CC BY 4.0

Trong thí nghiệm **hành lang dọc** chính, **40 con ruồi** liên tục đi vào vùng mùi, quay ngược ra ngoài rồi trở lại cùng một mép. “Dọc” là tên bài báo dùng cho hình học 0 độ: trục dài của hành lang song song với hướng ngược gió. Nó không có nghĩa là thiết bị được dựng thẳng đứng.

Các tác giả gọi mẫu này là **theo mép** (*edge tracking*). Một **bout** là một giai đoạn liên tục giữa hai lần vượt ranh giới: bout bên trong kéo dài từ lúc đi vào đến lúc đi ra, còn bout bên ngoài từ lúc đi ra cho đến khi ruồi quay lại. Trong 755 bout bên trong, mỗi lần ghé kéo dài trung bình 4,9 giây. Trong các lần quay lại, khoảng cách trung bình đến ranh giới là 10,4 milimét. Dưới 4% trong 793 bout đi qua hoàn toàn tới mép đối diện của hành lang.

Hai con số cuối mô tả các bout, không phải hàng trăm con ruồi độc lập. Sự phân biệt này quan trọng vì một con vật có thể đóng góp nhiều bout.

Những lần quay lại không chỉ là phản xạ ngược gió cố định

Một số thí nghiệm đã kiểm tra các lời giải thích đơn giản hơn.

Trước hết, các nhà nghiên cứu thay đổi điều xảy ra **dọc theo** hành lang khi ruồi đi ngược gió.

Mùi có thể mạnh dần về phía nguồn ảo, giữ nguyên hoặc yếu dần. Ruồi tạo ra những đường đi tương tự trong cả ba trường hợp. Vì vậy, một quy tắc đơn giản như “cứ đi về nơi mùi mạnh hơn” không thể giải thích hành vi theo mép trong thiết bị này.

Sau đó, họ làm mềm mép **theo chiều ngang** của hành lang thành một biên dạng Gaussian, trong đó nồng độ thay đổi dần thay vì bật tắt đột ngột. Ruồi tập trung gần sườn nơi nồng độ thay đổi nhanh nhất, chứ không ở giữa nơi mùi mạnh nhất. Do đó, tín hiệu liên quan là sự thay đổi ngang đánh dấu một ranh giới hiệu dụng, chứ không phải một sự tăng bắt buộc về phía nguồn dọc hành lang.

Điều đó không có nghĩa gradient nồng độ không bao giờ quan trọng trong tự nhiên. Nó chỉ có nghĩa là sự tăng nồng độ về phía nguồn không cần thiết cho hành vi này trong các điều kiện được thử.

Các nhà nghiên cứu cũng thay đổi hướng của hành lang. Các nhóm riêng biệt theo dõi hành lang dọc, 45 độ và 90 độ, còn một nhóm khác gặp một hành lang bị dịch ngang sau khi đi ra. Kích thước các nhóm lần lượt là 40, 21, 20 và 24 con ruồi. Đường đi bên ngoài của chúng thay đổi theo hình học. Một quy tắc chung như “luôn quay ngược gió” không thể giải thích sự linh hoạt đó.

Trong thiết bị này, mùi đến hai râu trong vòng khoảng hai mili giây. Kích hoạt quang di truyền hai bên kết hợp với gió có thể tái tạo một mẫu giống theo mép. **Quang di truyền** dùng các protein nhạy sáng để thay đổi hoạt động của những tế bào được chọn. Ở đây, kết quả gợi ý rằng chênh lệch trái–phải về thời điểm mùi đến không cần thiết cho hành vi này. Nó không khiến so sánh hai bên trở nên không liên quan đối với động vật di chuyển tự do trong các luồng mùi khác.

Một vectơ nhỏ hơn một bản đồ

Một **vectơ** là một hướng đi kèm với độ lớn. Đại lượng được lưu trữ hữu ích ở đây chủ yếu mang tính định hướng: ruồi nên quay theo hướng nào để đến ranh giới của luồng mùi? Nghiên cứu không tìm thấy bằng chứng rằng ruồi lưu toàn bộ bố cục của luồng mùi hoặc vị trí của chính nó trong đó.

Trước hết, các tác giả tạo ra các đường đi nhân tạo bằng cách xáo trộn những thành phần trong chuyển động thật của ruồi. Họ lấy ngẫu nhiên các độ dài quãng chạy và góc rẽ đã quan sát rồi ghép chúng lại. Một số “người đi bộ” tổng hợp cuối cùng cũng chạm lại ranh giới mùi, nhưng chúng đi lang thang xa hơn và theo tuyến ít trực tiếp hơn ruồi thật. Ngay cả khi thêm xu hướng bình thường của ruồi là quay ngược gió, mô hình vẫn không tái tạo được những lần quay lại ngắn và có định hướng. Vì vậy, hành vi thật chứa nhiều thông tin về hướng hơn một bản phối ngẫu nhiên của cùng các chuyển động.

Tiếp theo, các nhà nghiên cứu xây dựng một mô hình có hai chế độ: **rời ranh giới** và **quay lại ranh giới**. Hai chế độ này không phải nhãn cho mọi thời điểm bên trong hay bên ngoài vùng mùi. Chúng là các quy tắc lái thay thế có thể chuyển đổi khi ruồi di chuyển.

Mỗi lần vượt ranh giới cung cấp cho mô hình một hướng để ghi nhớ. Khi đi ra, nó cập nhật một hướng dùng trong lúc rời đi. Khi đi vào, nó cập nhật một hướng quay lại riêng: về thực chất là "khi tôi tìm thấy ranh giới, tôi đang đi theo hướng này". Trong lần quay lại sau đó, hướng được ghi nhớ này làm lệch chuyển động của ruồi mô phỏng về phía mép.

Các nhà nghiên cứu khớp mô hình với quỹ đạo ở các hành lang 0, 45 và 90 độ. Trong phép so sánh tổng hợp, 72 con ruồi thật và 75 mô phỏng tạo ra các thống kê đường đi tương tự. Khi bỏ hướng quay lại đã học lúc đi vào, hiệu quả theo mép giảm ở mọi hướng hành lang. Điều đó ủng hộ tính hữu ích của trí nhớ về hướng đi vào; nó không chứng minh rằng não ruồi thực sự chạy đúng các phương trình của mô hình.

> **"Trí nhớ" có nghĩa gì trong bài báo này?**
>
> Các nhà nghiên cứu không đọc trực tiếp một mũi tên được lưu trong não ruồi. "Trí nhớ định hướng" là một suy luận được hỗ trợ bởi hành vi, mô hình và các phép đo thần kinh. Mô hình cho thấy một vài hướng thay đổi có thể tái tạo các thống kê đường đi quan trọng. Nó không chứng minh rằng ruồi thực thi các phương trình theo nghĩa đen, hay rằng một nhóm nơron cụ thể là nơi lưu trữ trí nhớ.

Một trải nghiệm bổ sung với một đoạn 45 độ có hướng ngược lại đã làm thay đổi hành vi sau đó ở 10 con ruồi, cùng với 29 mô phỏng mô hình. Điều này khiến cách giải thích bằng hướng cụ thể hơn một mô tả hậu nghiệm, dù vẫn là một diễn giải dựa trên mô hình.

Một mốc hướng hiện tại và một mục tiêu đang theo đuổi

Tiếp theo, nghiên cứu đo và gây gián đoạn hoạt động trong **phức hợp trung tâm** của não ruồi, một vùng tham gia định hướng.

> **Hai tín hiệu với hai nhiệm vụ khác nhau**
>
> EPG và FC2 là tên của hai quần thể nơron trong phức hợp trung tâm. Hoạt động EPG giống một chỉ số la bàn: nó theo dõi hướng mà ruồi đang quay mặt so với gió. Hoạt động FC2 liên quan đến hướng mà ruồi đang cố di chuyển tới. Một mạch điều khiển hướng ở phía hạ lưu có thể so sánh hướng hiện tại với mục tiêu đó. Nghiên cứu kiểm tra cả hai quần thể, nhưng không cho thấy riêng quần thể nào lưu toàn bộ trí nhớ.

Các nơron EPG mang tín hiệu hướng: mẫu hoạt động của chúng theo dõi hướng ruồi đang quay mặt so với một tín hiệu bên ngoài. Bằng chụp ảnh canxi, một phép đọc quang học gián tiếp của hoạt động thần kinh, các nhà nghiên cứu phát hiện pha hoạt động EPG đi theo hướng tương đối với gió trong khi ruồi theo mép. Phân tích này dùng 16 thử nghiệm từ 9 con ruồi.

Để ức chế nơron EPG, các nhà nghiên cứu biến đổi chúng để biểu hiện **GtACR1**, một kênh anion được bật bằng ánh sáng xanh lục. Một đèn LED được giữ sáng trong toàn bộ thử nghiệm, kích hoạt kênh này và ức chế các nơron đã chọn; cùng mức chiếu sáng đó không làm suy giảm hành vi ở ruồi đối chứng di truyền.

Khi nơron EPG bị ức chế theo cách này, 12 con ruồi thí nghiệm thực hiện các lần quay lại có định hướng kém hiệu quả hơn 6 con ruồi đối chứng di truyền. Kết luận có giới hạn là mốc hướng do hoạt động EPG cung cấp cần thiết cho việc theo mép hiệu quả trong các điều kiện được thử. Đây không phải bằng chứng rằng riêng nơron EPG lưu hướng của ranh giới.

Các nơron FC2 cho thấy một mối quan hệ khác. Hoạt động quần thể của chúng liên quan đến mục tiêu định hướng hiện tại và hướng về phía ranh giới luồng mùi trước các lần rẽ trong phép thử. Phần chụp ảnh dùng 6 con ruồi, còn các so sánh ức chế dùng nhóm từ 9 đến 14 con tùy phân tích. Việc ức chế làm suy giảm hành vi theo mép.

Hành vi, hình học luồng mùi bị thay đổi, một mô hình đã khớp và hai phép can thiệp thần kinh hỗ trợ những phần khác nhau của cách giải thích bằng trí nhớ định hướng. Cùng nhau, chúng ủng hộ một hướng mục tiêu gọn trong phép thử được kiểm soát này, không phải một bản đồ hoàn chỉnh hay một vị trí lưu trữ tế bào đã được chứng minh.

The Clean Paper CC BY 4.0

Đây là bằng chứng hội tụ, không phải một chuỗi nhân quả được chụp lại. Hoạt động EPG cung cấp một mốc hướng cần thiết. Hoạt động FC2 phù hợp với một hướng mục tiêu và cần thiết cho hành vi hiệu quả. Các thí nghiệm không xác định được một “engram” trí nhớ duy nhất hoặc chứng minh rằng các synapse FC2 lưu hướng về mặt vật lý.

Như một phép tương tự ở quy mô con người, hãy tưởng tượng bạn bước ra khỏi một dải sương

mù hẹp trong khi gió đều vẫn cho biết hướng bắc. La bàn có thể cho bạn biết mình đang quay mặt về đâu, nhưng để quay lại vùng sương còn cần nhớ phương hướng tới mép của nó. So sánh hướng hiện tại với phương hướng mong muốn cho biết nên quay theo chiều nào. Đó là sự phân công được gợi ý ở đây cho tín hiệu EPG và FC2. Đây chỉ là phép tương tự giải thích, không phải bằng chứng rằng con người dùng cùng tế bào hoặc thuật toán.

Trí nhớ phụ thuộc vào hành động, không chỉ vào thời điểm xuất hiện mùi

Trong một thí nghiệm phát lại, ruồi nhận cùng chuỗi thời điểm có mùi như trước, nhưng thời điểm đó không còn gắn với việc chúng đang làm. Độ lệch hướng đã học yếu dần qua các bout phát lại. Điều này ủng hộ một cập nhật **operant**, tức gắn với hành động: điều quan trọng không chỉ là tiếp xúc thụ động với một chuỗi mùi, mà là mối quan hệ giữa mùi và chuyển động của ruồi.

Mẫu số thay đổi giữa các phân tích đó. Các panel Extended Data có 8 hoặc 9 con ruồi tùy phép so sánh; chuỗi bout liên tiếp dùng 8 con; các panel quỹ đạo yêu cầu ít nhất 10 lần đi vào hiệu quả; và các panel mô hình ghép cặp dùng 21 quỹ đạo mô phỏng cũng đạt ngưỡng đi vào đó. Đây không phải là một mẫu gộp gồm tám con ruồi.

Một luồng mùi bất quy tắc hơn có ích, nhưng vẫn là ảo

Các nhà nghiên cứu cũng phát lại một luồng mùi bất quy tắc hơn đã được ghi trước đó. Họ phóng đại nó gấp năm lần về không gian và thời gian để ruồi bị cố định có thể gặp nó đủ thường xuyên. **Mười trong số 12 con ruồi** đến trong phạm vi 50 milimét ảo của nguồn.

Đó không phải mười con ruồi tìm được một nguồn thật trong không khí ngoài trời. Đó là hiệu suất trong một bản phát lại được kiểm soát của một luồng mùi mang tính tự nhiên hơn.

Với mỗi loại luồng mùi động, mô hình tạo 2.000 quỹ đạo. Phép so sánh luồng mùi đã phóng đại phân tích 1.850 trong số 2.000 quỹ đạo này sau khi yêu cầu một lần đi vào hiệu quả và loại các quỹ đạo bắt đầu quá gần nguồn. Trí nhớ giúp nhiều hơn khi ở gần nguồn, nơi các lần gặp liên tiếp còn giữ cấu trúc hướng nhất quán, và ít hơn ở vùng nhiễu loạn hơn xa về phía xuôi gió.

Điều kiện này là một phần của kết quả. Một hướng gọn chỉ có thể giúp khi thế giới còn đủ nhất quán để lần gặp trước nói được điều gì hữu ích về lần gặp tiếp theo.

Nghiên cứu không cho thấy điều gì

- Nó **không** cho thấy một con ruồi xây dựng bản đồ không gian hoàn chỉnh.
- Nó **không** cho thấy bay tự do qua một luồng mùi tự nhiên không bị chỉnh sửa.
- Nó **không** xác lập rằng mọi hành vi định hướng theo mùi đều dùng chiến lược này.
- Nó **không** cho thấy nơron EPG hoặc FC2 là vị trí vật lý duy nhất lưu trí nhớ.
- Nó **không** biến mô hình đã khớp thành thuật toán sinh học theo nghĩa đen của ruồi.
- Nó **không** suy rộng trực tiếp sang định hướng ở người.

Nghiên cứu mạnh nhất ở chính phạm vi cụ thể của nó. Điều khiển vòng kín cho phép các nhà nghiên cứu truy cập chính xác từng lần gặp mùi. Thay đổi hình học, phát lại, mô hình hóa, chụp ảnh canxi và ức chế sau đó kiểm tra các phần khác nhau của cùng một lời giải thích. Nhưng các nhóm hành vi, chụp ảnh và ức chế là các cohort riêng; kích thước mẫu không được xác định trước; thu thập và phân tích dữ liệu không được ngẫu nhiên hóa hay làm mù; và dưới 10% số ruồi bị cố định bị loại vì vấn đề thích nghi, đáp ứng hoặc theo dõi.

Những giới hạn đó không xóa bỏ hiện tượng. Chúng xác định phạm vi của nó.

Tóm tắt gọn

Ruồi giấm bị cố định, đi bộ qua một hành lang mùi ảo, liên tục quay lại một ranh giới sau khi đã rời vùng có mùi. Thay đổi nồng độ và hình học hành lang, một mô hình chuyển đổi đã khớp, chụp ảnh thần kinh và ức chế quang di truyền cùng hỗ trợ cách giải thích rằng ruồi dùng một hướng được ghi nhớ gọn thay vì một bản đồ hoàn chỉnh. Nơron EPG cung cấp một mốc hướng cần thiết, còn hoạt động FC2 phù hợp với hướng mục tiêu hiện tại. Kết quả chỉ áp dụng cho một phép thử đi bộ được kiểm soát; nó không xác định vị trí lưu trữ trí nhớ ở cấp tế bào và cũng không cho thấy cùng chiến lược trong bay tự do ngoài tự nhiên.

Đánh giá thẳng thắn

Bài báo cho thấy điều gì: Trong một phép thử vòng kín với ruồi bị cố định, ruồi quay lại có định hướng tới những ranh giới mùi ảo mà chúng không còn cảm nhận được. Nhiều phép kiểm soát hành vi, mô hình hóa và can thiệp thần kinh hỗ trợ một chiến lược dựa trên vectơ.

Điều được suy ra: Hành vi dùng một trí nhớ định hướng gọn, và hoạt động quần thể FC2 biểu diễn một mục tiêu định hướng hiện tại. Nội dung trí nhớ không được đọc trực tiếp.

Điều nghiên cứu không cho thấy: Một bản đồ tinh thần hoàn chỉnh, một chiến lược khứu giác phổ quát, hiệu suất bay tự do trong luồng mùi tự nhiên, một vị trí lưu trữ trí nhớ duy nhất hay một cơ chế tương đương ở người.

Các giới hạn chính: Một loài và một thiết bị được kiểm soát; các cohort ruồi và đơn vị phân tích khác nhau giữa thí nghiệm; tín hiệu canxi gián tiếp; các phép kiểm tra tính cần thiết không chứng minh tính đủ; và luồng mùi mang tính tự nhiên chỉ được phát lại và phóng đại.

Một độc giả phổ thông nên tin tưởng đến mức nào? Tin tưởng cao rằng hiện tượng quay lại có định hướng là thật trong thiết bị này và hoạt động của phức hợp trung tâm liên quan đến hướng và mục tiêu là quan trọng. Tin tưởng vừa phải rằng mô hình là một lời giải thích gọn. Tin tưởng thấp đối với bất kỳ tuyên bố nào mở rộng nguyên vẹn kết quả ra ngoài trời hoặc gọi nó là một bản đồ hoàn chỉnh.

Nguồn

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