The CLEAN PAPER

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

يمكن لذبابة أن تفقد الرائحة ثم تستدير عائدة. في سحابة افتراضية، ساعد اتجاه محفوظ

عادت ذبابات فاكهة مثبتة مراراً إلى حد للرائحة بعد أن مشت في هواء نظيف. تدعم السلوكيات والنمذجة والاضطرابات العصبية ذاكرة مدمجة للاتجاه، لا خريطة كاملة. تأتي النتيجة من اختبار واقع افتراضي مضبوط ولا تُظهر بعد الاستراتيجية نفسها في طيران طبيعي حر.

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 oflactory 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: 7-10827-026-s41586/1038.10

يمكن لذبابة أن تفقد الرائحة ثم تستدير عائدة نحوها

كانت الذبابة قد تركت الرائحة خلفها.

واصلت المشي في هواء نظيف، أحياناً لعشرات الثواني ومئات المليمترات الافتراضية. ثم استدارت نحو الحد الذي عبرته ووجدت الرائحة من جديد. في تلك اللحظة، لم تعد الرائحة نفسها قادرة على الإشارة إلى طريق العودة.

هذه هي الملاحظة المركزية في دراسة جديدة في Nature عن ملاحة ذبابة الفاكهة. يجادل الباحثون بأن الذباب استخدم ذاكرة مدمجة للاتجاه: ليست خريطة كاملة لسحابة الرائحة، ولا ذاكرة للمسافة المقطوعة، بل اتجاهاً محفوظاً نحو حد لم يعد قابلاً للكشف.

النتيجة لافتة لأنها تبين مدى ضآلة المعلومات المخزنة التي قد تكفي. ومن السهل أيضاً المبالغة فيها. لم تطِر هذه الذبابات بحرية في منظر طبيعي. بل مشت وهي مثبتة على كرة مدعومة بالهواء داخل عالم افتراضي مضبوط بإحكام. تدعم الدراسة استراتيجية قائمة على متجه داخل ذلك الجهاز؛ ولا تُظهر أن الذباب يبني خرائط ذهنية، ولا تفسر كل الطرق التي تتبع بها الحيوانات الروائح، ولا تحدد الخلايا التي تُخزن فيها الذاكرة فيزيائياً.

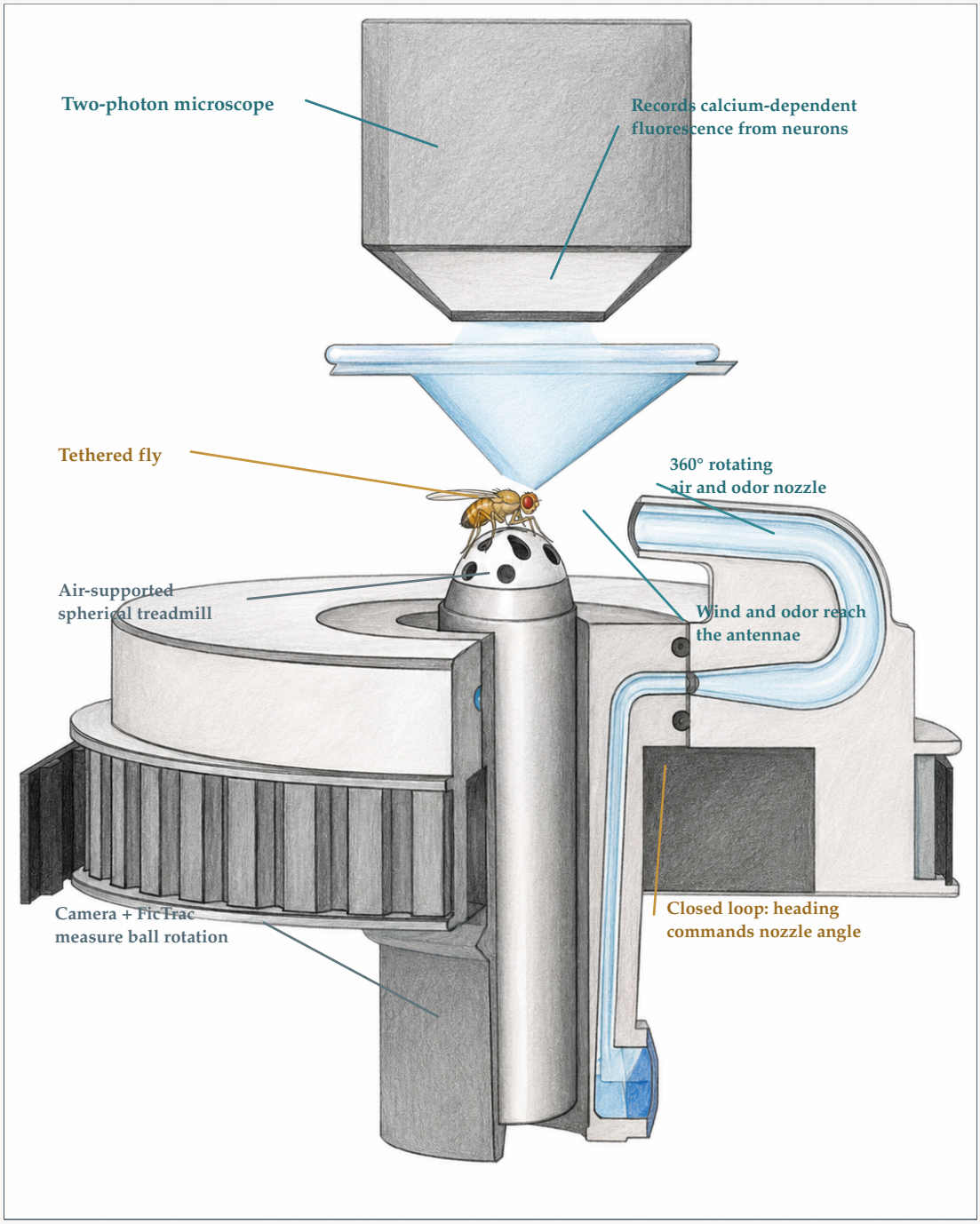
الممر غير المرئي صنعه البرنامج

سحابة الرائحة هي المنطقة المتحركة من الرائحة التي يحملها الهواء. وفي الخارج تنثني السحابة وتتفتت وتلتئم من جديد مع تغير الريح. وهذا يجعل من الصعب معرفة ما الذي شمه الحيوان بدقة في كل لحظة.

جعل الباحثون المشكلة قابلة للتحكم باستخدام **واقع افتراضي بحلقة مغلقة.** ثُبت جسم الذبابة في مكانه فوق كرة خفيفة تطفو على الهواء. وأثناء مشي الذبابة، كانت كاميرا تقيس دوران الكرة نحو 60 مرة في الثانية. ثم يحول البرنامج هذا الدوران إلى موضع واتجاه افتراضيين ثنائيي الأبعاد.

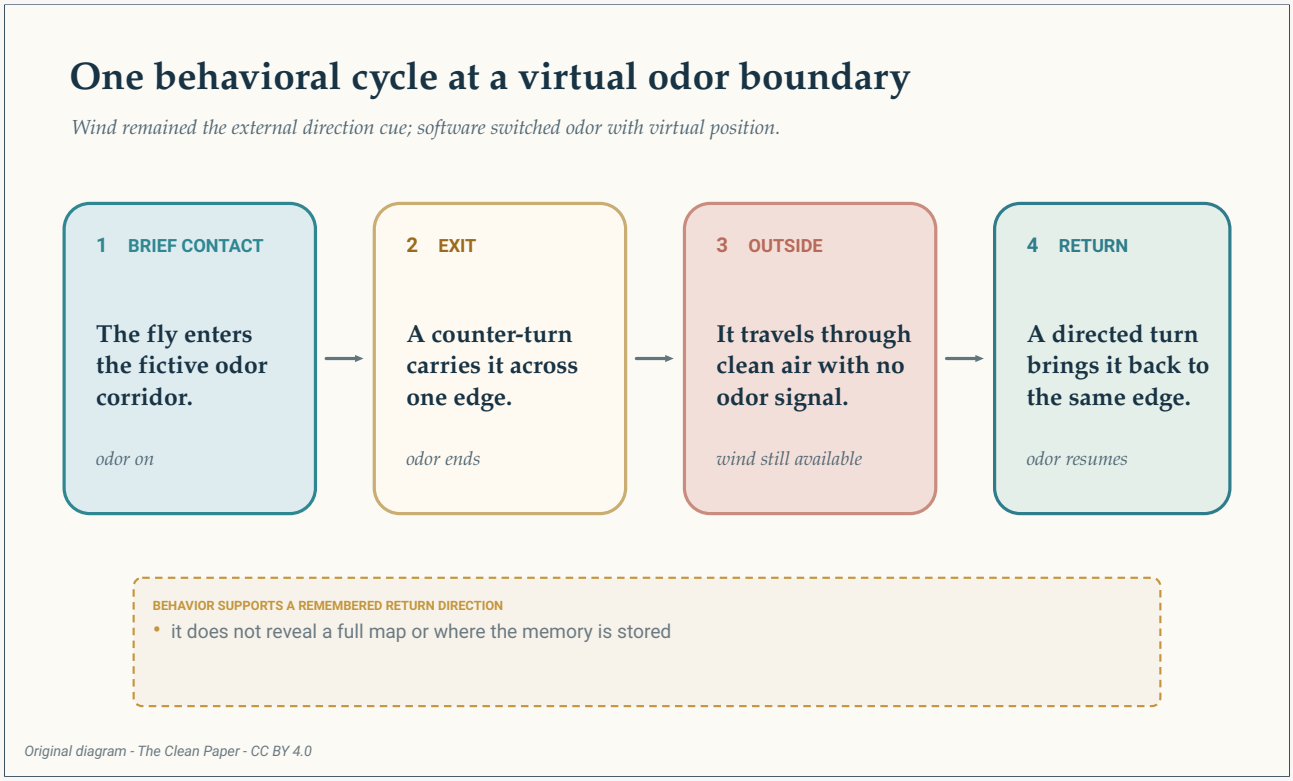
كان هذا الاتجاه يتحكم في فوهة بمحرك يمكنها الدوران 360 درجة. ومع تغير اتجاه الذبابة الافتراضي، تحركت الفوهة حولها لتحافظ على محاذاة الريح مع اتجاه ثابت في عالم الذبابة الافتراضي. وفي الوقت نفسه، غيرت متحكمات التدفق الكتلي كمية الهواء النظيف أو رائحة خل التفاح التي تصل إلى قرني الاستشعار بحسب موضع الذبابة الافتراضي. وهكذا كان عبور حد يحدده البرنامج يشغل الرائحة أو يوقفها، منشئاً ممراً افتراضياً عرضه 50 مليمتر وطوله متر واحد، رغم أن الذبابة لم تغادر الكرة قط.

أنتج الجهاز سجلاً متزامناً لموضع الذبابة الافتراضي واتجاهها وحالة الرائحة وضوابط تدفق الهواء في كل نقطة زمنية. ومن هذا السجل أعاد الباحثون بناء المسارات، وحددوا كل دخول وخروج، وقاسوا مدى مباشرة عودة الذبابة. كانت الريح توفر إشارة الاتجاه الخارجية؛ أما حركة الذبابة نفسها فكانت تحدد متى تصادف أياً من جانبي حد الرائحة الافتراضي.



بقيت الذبابة مثبتة فوق كرة مدعومة بالهواء. حولت كاميرا وFicTrac دوران الكرة إلى حركة واتجاه افتراضيين؛ ثم كان البرنامج يدير فوهة الهواء والرائحة ويشغل الرائحة بحسب الموضع الافتراضي. وفي تجارب تصوير عصبي منفصلة، سجل مجهر ثنائي الفوتون فوق الذبابة فلورة تعتمد على الكالسيوم من عصبونات EPG أو FC2، ما سمح بمجاذاة النشاط العصبي مع السلوك. لم يكن المجهر مطلوباً في كل تجربة سلوكية.

The Clean Paper CC BY 0.4



في الاختبار المضبوط، دخلت ذبابة ممر الرائحة الافتراضي لفترة قصيرة، ثم غادرته، وتحركت في هواء خال من الرائحة، ونفذت عودة موجهة. يدعم السلوك وجود اتجاه عودة محفوظ؛ لكنه لا يكشف أين تُخزن هذه المعلومة.

The Clean Paper CC BY 0.4

في تجربة **الممر الرأسي** الرئيسية، دخلت **40 ذبابة** الرائحة مراراً، ثم انعطفت إلى خارجها وعادت إلى الحافة نفسها. «رأسي» هو اسم الورقة لهندسة 0 درجة: كان المحور الطويل للممر موازياً لاتجاه عكس الريح. ولا يعني أن الجهاز كان قائماً عمودياً.

يسمي المؤلفون هذا النمط **تتبع الحافة**. **والجولة** هي حلقة واحدة متصلة بين عبورين للحد: تبدأ الجولة الداخلية بالدخول وتنتهي بالخروج، بينما تبدأ الجولة الخارجية بالخروج وتنتهي عندما تعود الذبابة. عبر 755 جولة داخلية، استمرت الزيارة في المتوسط 9.4 ثوان. وأثناء العودة، كان متوسط المسافة عن الحد 4.10 مليمترات. وأقل من 4% من 793 جولة عبرت الممر كله إلى الحافة المقابلة.

الرقمان الأخيران يصفان جولات، لا مئات الذبابات المستقلة. والتمييز مهم لأن الحيوان الواحد يمكن أن يساهم بعدة جولات.

لم تكن العودة مجرد منعكس ثابت نحو عكس الريح

اختبرت عدة تجارب تفسيرات أبسط.

غيّر الباحثون أولاً ما يحدث **على طول** الممر حين تمشي الذبابة عكس اتجاه الريح. كان بإمكان الرائحة أن تصبح أقوى باتجاه المصدر الافتراضي، أو تبقى ثابتة، أو تضعف. أنتجت الذبابات مسارات متشابهة في الحالات الثلاث. ولذلك لا تستطيع قاعدة بسيطة مثل «استمر حيث تصبح الرائحة أقوى» تفسير تتبع الحافة في هذا الجهاز.

ثم جعلوا الحافة **الجانبية** للممر أكثر نعومة على شكل منحنى Gaussian، بحيث يتغير التركيز تدريجياً بدلاً من الانتقال المفاجئ. تجمعت الذبابات قرب الجانب الذي تغير فيه التركيز بأسرع صورة، لا في المركز حيث كانت الرائحة أقوى. إذن كانت الإشارة ذات الصلة هي التغير الجانبي

الذي يحدد حداً فعالاً، لا ضرورة وجود زيادة باتجاه المصدر على طول الممر.

هذا لا يعني أن تدرجات التركيز لا تهم أبداً في الطبيعة. بل يعني أن زيادة باتجاه المصدر لم تكن مطلوبة لهذا السلوك تحت الظروف المختبرة.

غيّر الباحثون أيضاً اتجاه الممر. تتبعت مجموعات منفصلة ممرات بزاوية 0 و45 و90 درجة، وواجهت مجموعة أخرى ممراً يقفز جانبياً بعد الخروج. كانت أحجام المجموعات 40 و21 و20 و24 ذبابة على التوالي. وتغيرت المسارات الخارجية مع الهندسة. ولذلك لا تفسر المرونة قاعدة عامة مثل «انعطف دائماً عكس الريح».

في هذا الإعداد، وصلت الرائحة إلى قرني الاستشعار خلال نحو ميلي ثانيتين. وأمكن لاستثارة بصرية وراثية ثنائية الجانب مقترنة بالريح أن تعيد إنتاج نمط شبيه بتتبع الحافة. **الوراثة البصرية** تستخدم بروتينات حساسة للضوء لتغيير خلايا مختارة. تشير النتيجة هنا إلى أن فرقاً بين اليسار واليمين في زمن وصول الرائحة لم يكن ضرورياً لهذا السلوك. لكنها لا تجعل المقارنة الثنائية عديمة الصلة بالحيوانات الحرة في سحب أخرى.

المتجه أصغر من الخريطة

المتجه اتجاه مع مقدار. وكانت الكمية المخزنة المفيدة هنا اتجاهية أساساً: في أي اتجاه ينبغي للذبابة أن تنعطف كي تصل إلى حد السحابة؟ لم تجد الدراسة دليلاً على أن الذبابة خزنت تخطيطاً كاملاً للسحابة أو موضعها داخلها.

أنشأ المؤلفون أولاً مسارات اصطناعية بخلط مكونات حركة ذباب حقيقي. سحبوا أطوال الجري وزوايا الانعطاف المرصودة عشوائياً ووصلوها معاً. وصلت بعض هذه المشايات الاصطناعية في النهاية إلى حد الرائحة مجدداً، لكنها تاهت لمسافات أبعد وسلكت مسارات أقل مباشرة من الذباب الحقيقي. وحتى إضافة الميل العادي للذباب إلى الانعطاف عكس الريح لم تعِد إنتاج العودات القصيرة الموجهة. إذن احتوى السلوك الحقيقي على معلومات اتجاهية أكثر من إعادة خلط عشوائية للحركات نفسها.

ثم بنى الباحثون نموذجاً بوضعين: **مغادرة الحد والعودة إلى الحد.** لم تكن هذه الأوضاع تسميات لكل لحظة داخل الرائحة أو خارجها، بل قواعد توجيه بديلة يمكن أن تتبدل أثناء الحركة.

كان كل عبور للحد يعطي النموذج اتجاهاً ليتذكره. عند الخروج، يحدث اتجاهاً يستخدم أثناء الابتعاد. وعند الدخول، يحدث اتجاه عودة منفصلاً: عملياً، «عندما وجدت الحد كنت أتحرك بهذه الطريقة». وخلال عودة لاحقة، يدفع ذلك الاتجاه المحفوظ حركة الذبابة المحاكاة نحو الحافة.

لائم الباحثون النموذج مع المسارات عبر ممرات 0 و45 و90 درجة. وفي المقارنة الملخصة، أنتجت 72 ذبابة حقيقية و75 محاكاة إحصاءات مسار متشابهة. وعندما أُزيل اتجاه العودة المتعلم عند الدخول، أصبح التتبع أقل كفاءة عبر كل اتجاهات الممر. يدعم ذلك فائدة ذاكرة لاتجاه الدخول، ولا يثبت أن دماغ الذبابة يشغل فعلياً معادلات النموذج حرفياً.

> **ماذا تعني «الذاكرة» في هذه الورقة؟**
>
> العصبية. والقياسات والنموذج السلوكيات تدعمه استدلال الاتجاهية» «الذاكرة الذبابة. دماغ من مباشرة مخزناً سهماً الباحثون يقرأ لم المعادلات تنفذ الذبابة أن يثبت ولا للمسار. مهمة إحصاءات إنتاج إعادة يستطيع المتغيرة الاتجاهات من قليلاً عدداً إن النموذج يقول التخزين. موقع هي واحدة مسماة عصبية مجموعة أن أو حرفياً

كما أن تجربة إضافية مع قطعة بزاوية 45 درجة في الاتجاه المعاكس غيّرت السلوك اللاحق لدى 10 ذبابات، إلى جانب 29 محاكاة للنموذج.

وهذا يجعل التفسير الاتجاهي أكثر تحديداً من وصف بعدي، مع بقائه تفسيراً قائماً على نموذج.

مرجع للاتجاه وهدف حالي

قاست الدراسة بعد ذلك النشاط في **المجمع المركزي** بدماغ الذبابة وعطلته، وهو منطقة تشارك في الملاحة.

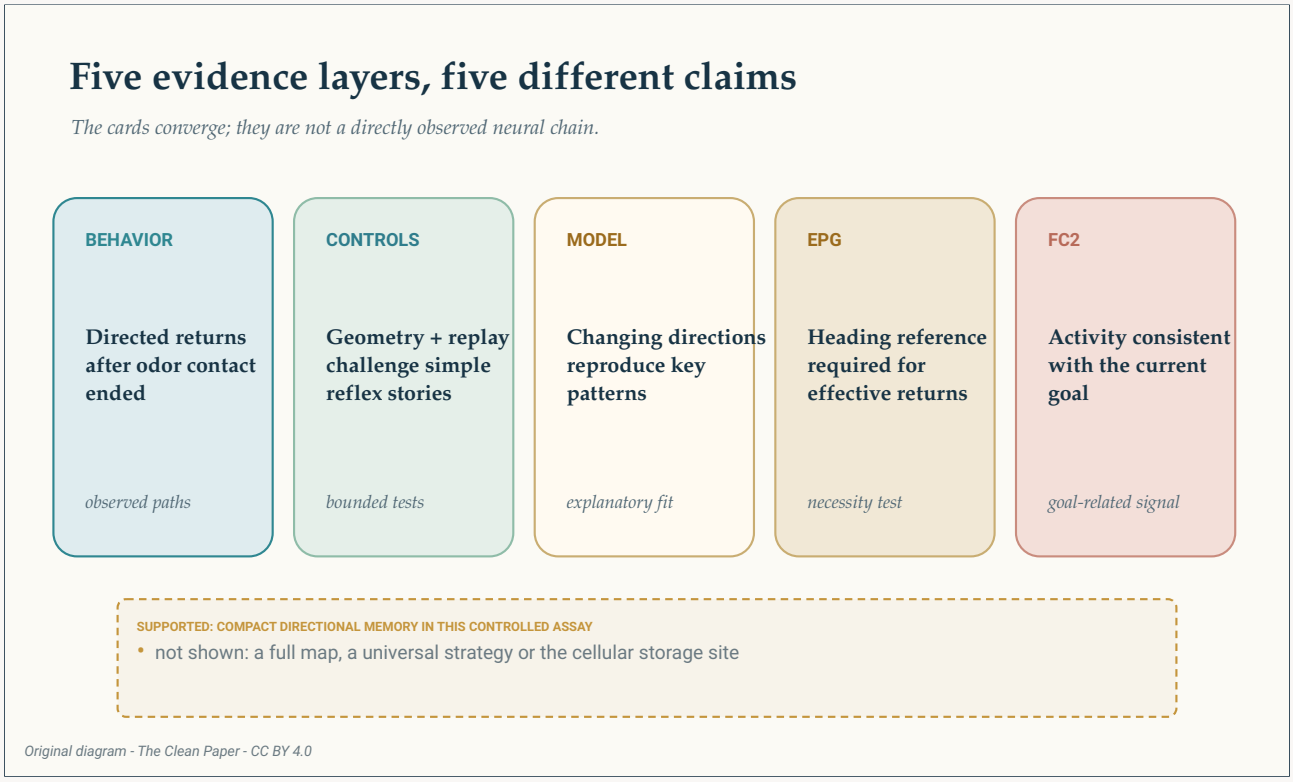
> **إشارتان بوظيفتين مختلفتين**
> تواجهه الذي الاتجاه يتتبع بوصلة: كقراءة EPG نشاط يعمل المركزي. المجمع في العصبونات من لمجموعتين اسمان وEPG FC2 مقارنة المصب في توجيه لدائرة ويمكن نحوه. السير الذبابة تحاول الذي بالاتجاه FC2 نشاط ويرتبط الريح. إلى بالنسبة حالياً الذبابة كلها. الذاكرة تخزن وحدها منهما أياً أن تُظهر لا لكنها المجموعتين، الدراسة تختبر بالهدف. الحالي الاتجاه

تحمل **عصبونات EPG** إشارة اتجاه: يتتبع نمط نشاطها الاتجاه الذي تواجهه الذبابة بالنسبة إلى إشارة خارجية. وباستخدام تصوير الكالسيوم، وهو قراءة بصرية غير مباشرة للنشاط العصبي، وجد الباحثون أن طور نشاط EPG تتبع اتجاه الذبابة بالنسبة إلى الريح أثناء تتبع الحافة. استخدم هذا التحليل 16 تجربة من 9 ذبابات.

ولتثبيط عصبونات EPG، عدلها الباحثون وراثياً لتعبر عن **GtACR1**، وهي قناة أنيونية تُشغل بالضوء الأخضر. ظل مصباح LED مضاءً طوال تجربة الاختبار، ففعّل القناة وكبح العصبونات المختارة؛ ولم يضر الضوء نفسه ذبابات الضبط الوراثية.

عندما ثُبطت عصبونات EPG بهذه الطريقة، نفذت 12 ذبابة تجريبية عودات موجهة أقل كفاءة من 6 ذبابات ضبط وراثية. والاستنتاج المحدود هو أن مرجع الاتجاه الذي يحمله نشاط EPG كان ضرورياً لتتبع فعال للحافة تحت الظروف المختبرة. وليس هذا دليلاً على أن عصبونات EPG وحدها خزنت اتجاه الحد.

أما **عصبونات FC2** فأظهرت علاقة مختلفة. ارتبط نشاطها السكاني بهدف الملاحة الحالي وأشار نحو حد السحابة قبل الانعطافات في الاختبار. استخدم التصوير 6 ذبابات، واستخدمت مقارنات الإسكات مجموعات من 9 إلى 14 ذبابة بحسب التحليل. وأضعف الإسكات تتبع الحافة.



تدعم السلوكيات، وهندسة السحابة المتغيرة، ونموذج ملائم، واضطرابان عصبيان أجزاء مختلفة من تفسير الذاكرة الاتجاهية. وتدعم مجتمعة اتجاهاً هدفياً مدمجاً في هذا الاختبار المضبوط، لا خريطة كاملة ولا موقع تخزين خلوياً مثبتاً.

The Clean Paper CC BY 0.4

هذا دليل متقارب، لا سلسلة سببية مصورة. وفر نشاط EPG مرجع اتجاه مطلوباً. وكان نشاط FC2 متسقاً مع اتجاه هدف وكان ضرورياً للسلوك الفعال. ولم تحدد التجارب «إنغرام» ذاكرة واحداً أو تثبت أن مشابك FC2 خزنت الاتجاه فيزيائياً.

كتشبيه تقريبي على مقياس بشري، تخيل أنك خرجت من شريط ضيق من الضباب بينما تظل ريح ثابتة تخبرك أين الشمال. تستطيع البوصلة إخبارك إلى أين تواجه، لكن العودة إلى الضباب تتطلب أيضاً اتجاهًا محفوظاً نحو حافته. ومقارنة اتجاهك الحالي بذلك الاتجاه المرغوب تخبرك بأي طريق تنعطف. هذا هو تقسيم العمل المقترح هنا لإشارات EPG وFC2. إنه تشبيه تفسيري، لا دليلاً على أن البشر يستخدمون الخلايا أو الخوارزمية نفسها.

الذاكرة اعتمدت على الفعل، لا على توقيت الرائحة وحده

في تجربة إعادة تشغيل، تلقت الذبابات تسلسل أزمنة الرائحة نفسه كما من قبل، لكن التوقيت لم يعد مرتبطاً بما كانت تفعله في اللحظة نفسها. ضعف الانحياز الاتجاهي المتعلم عبر جولات الإعادة. يدعم ذلك تحديثاً **إجرائياً مرتبطاً بالفعل**: لم يكن المهم التعرض السلبي لتسلسل رائحة فقط، بل العلاقة بين الرائحة وحركة الذبابة.

يتغير المقام عبر هذه التحليلات. تضم لوحات البيانات الموسعة 8 أو 9 ذبابات بحسب المقارنة، وتستخدم سلسلة الجولات المتتابعة 8 ذبابات، وتتطلب لوحات المسار ما لا يقل عن 10 دخولات فعالة، وتستخدم لوحات النموذج المقترنة 21 مساراً محاكياً يستوفي أيضاً عتبة الدخول. هذه ليست عينة واحدة مجمعة من ثماني ذبابات.

سحابة أكثر اضطراباً كانت مفيدة، لكنها ظلت افتراضية

أعاد الباحثون أيضاً تشغيل سحابة أكثر اضطراباً سُجلت سابقاً. كبروها خمسة أضعاف في المكان والزمن حتى تتمكن الذبابات المثبتة من مصادفتها مرات كافية. وصل **10 من أصل 12 ذبابة** إلى مسافة 50 مليمتر افتراضي من مصدرها.

هذا ليس عشر ذبابات تعثر على مصدر حقيقي في الهواء الطلق. بل أداء في إعادة تشغيل مضبوطة لسحابة ذات طابع طبيعي.

ولكل نوع من السحب الديناميكية، ولد النموذج 2,000 مسار. حللت مقارنة السحابة المكبرة 1,850 من أصل 2,000 بعد اشتراط دخول فعال واستبعاد المسارات التي بدأت قريبة جداً من المصدر. ساعدت الذاكرة أكثر قرب المصدر، حيث احتفظت اللقاءات المتتالية ببنية اتجاهية متماسكة، وأقل في المنطقة الأكثر اضطراباً بعيداً مع الريح.

هذا التحفظ جزء من النتيجة. لا يمكن لاتجاه مدمج أن يساعد إلا عندما يبقى العالم متماسكاً بما يكفي كي يخبر اللقاء السابق شيئاً مفيداً عن اللقاء التالي.

ما الذي لا تُظهره الدراسة؟

- إنها لا تُظهر ذبابة تبني خريطة مكانية كاملة.
- إنها لا تُظهر طيراناً حراً عبر سحابة طبيعية غير معدلة.
- إنها لا تثبت أن كل الملاحة الموجهة بالرائحة تستخدم هذه الاستراتيجية.
- إنها لا تُظهر أن عصبونات EPG أو FC2 هي موقع التخزين الفيزيائي الحصري للذاكرة.
- إنها لا تحول النموذج الملائم إلى الخوارزمية البيولوجية الحرفية للذبابة.
- إنها لا تعمم مباشرة على الملاحة البشرية.

الدراسة أقوى ما تكون حين تكون أكثر تحديداً. أعطى التحكم بحلقة مغلقة الباحثين وصولاً دقيقاً إلى كل مواجهة مع الرائحة. ثم اختبرت تغييرات الهندسة وإعادة التشغيل والنمذجة وتصوير الكالسيوم والإسكات أجزاء مختلفة من تفسير واحد. لكن مجموعات السلوك والتصوير والإسكات كانت منفصلة؛ ولم تحدد أحجام العينات مسبقاً؛ ولم يكن جمع البيانات وتحليلها عشوائياً أو معمى؛ واستُبعد أقل من 10% من الذبابات المثبتة لمشكلات في التأقلم أو الاستجابة أو التتبع.

هذه الحدود لا تمحو الظاهرة. بل تحددها.

الخلاصة الواضحة

عادت ذبابات فاكهة مثبتة تمشي في ممر رائحة افتراضي مراراً إلى حد الرائحة بعد أن تركت الرائحة خلفها. تدعم تغييرات التركيز وهندسة الممر، ونموذج تبديل ملائم، والتصوير العصبي، والإسكات الوراثي البصري تفسيراً تستخدم فيه الذبابة اتجاهاً محفوظاً مدمجاً بدلاً من خريطة كاملة. وفرت عصبونات EPG مرجع اتجاه ضرورياً، بينما كان نشاط FC2 متسقاً مع اتجاه الهدف الحالي. النتيجة محصورة في اختبار مشي مضبوط؛ ولا تحدد موقع التخزين الخلوي للذاكرة ولا تُظهر الحساب نفسه في طيران طبيعي حر.

مراجعة بلا تهويل

ما الذي تُظهره الورقة: في اختبار مثبت بحلقة مغلقة، نفذت الذبابات عودات موجهة إلى حدود رائحة افتراضية لم تعد تستطيع شمها. وتدعم ضوابط سلوكية متعددة ونمذجة واضطرابات عصبية استراتيجية قائمة على متجه.

ما هو مستنتج: أن السلوك يستخدم ذاكرة اتجاهية مدمجة، وأن نشاط مجموعة FC2 يمثل هدف الملاحة الحالي. لم يُقرأ محتوى الذاكرة مباشرة.

ما الذي لا تُظهره: خريطة ذهنية كاملة، أو استراتيجية شمية عالمية، أو أداء طيران حر في سحابة طبيعية، أو موقع تخزين واحد للذاكرة، أو نظيراً بشرياً.

القيود الرئيسية: نوع واحد وجهاز مضبوط؛ مجموعات ذباب ووحدات تحليل مختلفة بين التجارب؛ إشارات كالسيوم غير مباشرة؛ اختبارات ضرورة لا تثبت الكفاية؛ وسحابة ذات طابع طبيعي لكنها أُعيد تشغيلها وكُبرت.

ما مقدار الثقة المناسبة للقارئ العام؟ ثقة عالية بأن ظاهرة العودة الموجهة حقيقية في هذا الجهاز وأن نشاط المجمع المركزي المرتبط بالاتجاه والهدف مهم. وثقة متوسطة في النموذج كتفسير مدمج. وثقة منخفضة في أي ادعاء يمدده دون تغيير إلى الهواء الطلق أو يسميه خريطة كاملة.

المصادر

(2026) Nature Drosophila, in navigation oflactory for strategy vector-based A al., et Siliciano
https://doi.org/10.1038/s41586-026-10827-7

Drosophila in navigation oflactory for strategy vector-based A for archive data al., et Siliciano
https://doi.org/10.5281/zenodo.20751812

Edge-Tracking-Model Laboratory, Ruta
https://github.com/rutalaboratory/Edge-Tracking-Model