



The CLEAN PAPER

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

یک مگس می‌تواند بو را گم کند و باز هم برگردد. در یک توده بوی مجازی، جهت به یادمانده کمک کرد

مگس‌های میوه مهار شده پس از ورود به هوای پاک بارها به مرز بو برگشتند. رفتار، مدل‌سازی و دستکاری عصبی از حافظه‌ای فشرده از جهت، نه یک نقشه کامل، پشتیبانی می‌کنند. نتیجه از یک آزمون کنترل‌شده واقعیت مجازی به دست آمده و هنوز نشان نمی‌دهد همین راهبرد در پرواز آزاد طبیعی به کار می‌رود.

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: 7-10827-026-s41586/1038.10

یک مگس می تواند بو را گم کند و باز هم به سوی آن برگردد

مگس بو را پشت سر گذاشته بود.

در هوای پاک به راه رفتن ادامه می داد، گاهی ده ها ثانیه و صدها میلی متر مجازی. سپس به سوی مرزی که از آن عبور کرده بود برگشت و دوباره بو را پیدا کرد. در آن لحظه، خود بو دیگر نمی توانست راه بازگشت را نشان دهد.

این مشاهده مرکزی یک مطالعه تازه در Nature درباره ناولری مگس میوه است. پژوهشگران استدلال می کنند مگس ها از حافظه ای فشرده از جهت استفاده کردند: نه نقشه ای از کل توده بو، و نه حافظه ای از مسافت طی شده، بلکه جهتی به سوی مرزی که دیگر قابل تشخیص نبود.

نتیجه چشمگیر است، چون نشان می دهد چه مقدار اندکی اطلاعات ذخیره شده می تواند کافی باشد. اما بزرگ نمایی آن هم آسان است. این مگس ها آزادانه در یک چشم انداز طبیعی پرواز نکردند. در حالی که مهار شده بودند روی توپی شناور بر هوا در یک دنیای مجازی بسیار کنترل شده راه رفتند. مطالعه از یک راهبرد مبتنی بر بردار در همین دستگاه پشتیبانی می کند؛ نشان نمی دهد مگس ها نقشه ذهنی می سازند، همه روش های دنبال کردن بو توسط جانوران را توضیح نمی دهد و سلول هایی را که حافظه در آن ها فیزیکی ذخیره شده است مشخص نمی کند.

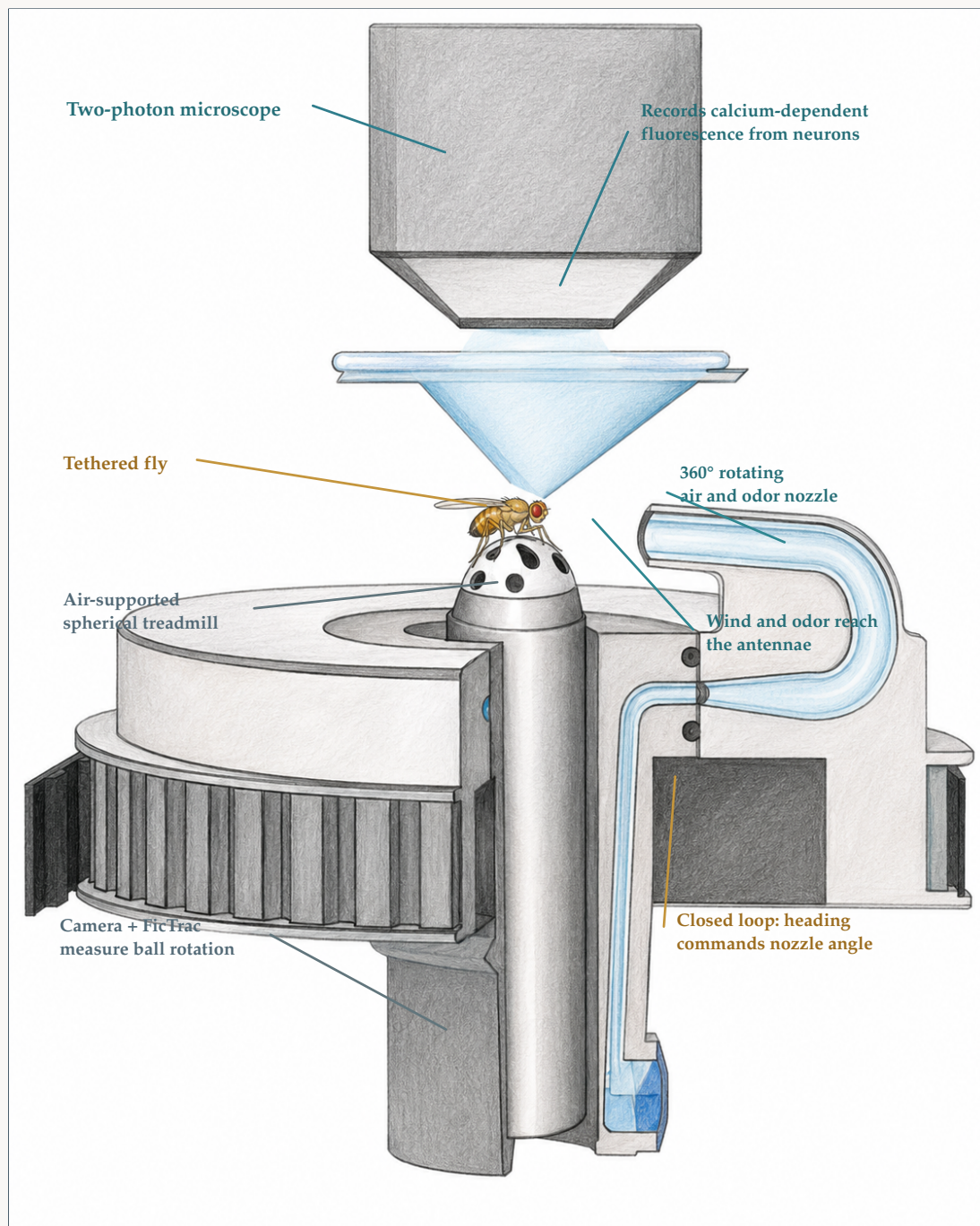
راهروی نامرئی را نرم افزار ساخته بود

توده بو ناحیه ای از هواست که مولکول های بو را حمل می کند و با جریان هوا جابه جا می شود. در فضای باز، با تغییر باد این توده خم می شود، تکه تکه می گردد و دوباره به هم می پیوندد. بنابراین دشوار است بدانیم جانور در هر لحظه دقیقاً چه بویی دریافت کرده است.

پژوهشگران مسئله را با واقعیت مجازی حلقه بسته قابل کنترل کردند. بدن مگس در جای خود، بالای توپی سبک که روی هوا شناور بود، ثابت نگه داشته شد. وقتی مگس راه می رفت، دوربین چرخش توپ را حدود 60 بار در ثانیه اندازه می گرفت. نرم افزار آن چرخش را به موقعیت و جهت دوبعدی مجازی تبدیل می کرد.

همین جهت یک نازل موتوردار را کنترل می کرد که می توانست 360 درجه بچرخد. با تغییر جهت مجازی مگس، نازل نیز پیرامون آن جابه جا می شد تا باد در دنیای مجازی مگس در جهت ثابتی باقی بماند. هم زمان کنترل کننده های دبی جرمی، بر اساس موقعیت مجازی مگس مقدار هوای پاک یا بوی سرکه سیب را که به شاخک ها می رسید تغییر می دادند. در نتیجه عبور از یک مرز تعریف شده با نرم افزار بو را روشن یا خاموش می کرد و راهرویی خیالی به عرض 50 میلی متر و طول یک متر می ساخت، هر چند خود مگس هرگز توپ را ترک نمی کرد.

دستگاه در هر لحظه رکوردی هم زمان از موقعیت مجازی، جهت، وضعیت بو و کنترل جریان هوا تولید می کرد. از این رکورد، پژوهشگران مسیرها را بازسازی کردند، هر ورود و خروج را علامت زدند و سنجیدند مگس با چه میزان مستقیم بودن برمی گردد. باد نشانه جهت خارجی را فراهم می کرد؛ حرکت خود مگس تعیین می کرد چه زمانی با هریک از دو سوی مرز مجازی بو روبه رو شود.



مگس در حالی مهار شده بود که روی توپی شناور بر هوا راه می‌رفت. دوربین و FicTrac چرخش توپ را به حرکت و جهت مجازی تبدیل می‌کردند؛ سپس نرم‌افزار نازل هوا و بو را می‌چرخاند و بر اساس موقعیت مجازی بو را روشن یا خاموش می‌کرد. در آزمایش‌های جداگانه تصویربرداری عصبی، میکروسکوپ دوفوتونی بالای مگس فلورسانس وابسته به کلسیم را از نورون‌های EPG یا FC2 ثبت می‌کرد و امکان هم‌تراز کردن فعالیت عصبی با رفتار را می‌داد. میکروسکوپ برای همهٔ آزمون‌های رفتاری لازم نبود.

One behavioral cycle at a virtual odor boundary

Wind remained the external direction cue; software switched odor with virtual position.



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

در آزمون کنترل شده، مگس برای مدت کوتاهی وارد راهروی مجازی بو شد، از آن خارج شد، در هوای بدون بو حرکت کرد و به صورت جهت دار بازگشت. این رفتار از وجود یک جهت بازگشت به یادمانده پشتیبانی می کند؛ اما نشان نمی دهد این اطلاعات کجا ذخیره می شوند.

The Clean Paper CC BY 0.4

در آزمایش اصلی راهروی عمودی، 40 مگس بارها وارد ناحیه بو شدند، با چرخش مخالف از آن خارج شدند و به همان لبه برگشتند. «عمودی» نامی است که مقاله برای هندسه صفر درجه به کار می برد: محور طولی راهرو موازی جهت رو به باد بود. به این معنا نیست که دستگاه به صورت عمودی قرار داشت.

نویسندگان این الگو را ردگیری لبه می نامند. یک بازه رفتاری (bout) یک قسمت پیوسته میان دو عبور از مرز است: بازه داخلی از ورود تا خروج و بازه خارجی از خروج تا بازگشت مگس ادامه دارد. در 755 بازه داخلی، هر حضور به طور متوسط 9.4 ثانیه طول کشید. هنگام بازگشت، میانگین فاصله از مرز 4.10 میلی متر بود. کمتر از 4% از 793 بازه تمام عرض راهرو را طی کردند و به لبه مقابل رسیدند.

دو عدد آخر درباره بازه های رفتاری اند، نه صدها مگس مستقل. این تفاوت مهم است، چون یک جانور می تواند بازه های متعددی ایجاد کند.

بازگشت ها فقط یک رفلکس ثابت رو به باد نبودند

چند آزمایش، توضیح های ساده تر را آزمودند.

پژوهشگران ابتدا تغییر دادند وقتی مگس در امتداد راهرو رو به باد حرکت می کند چه اتفاقی می افتد. بو می توانست به سوی منبع مجازی قوی تر شود، ثابت بماند یا ضعیف تر شود. مگس ها در هر سه حالت مسیرهای مشابهی ساختند. بنابراین قانون ساده ای مانند «همیشه به جایی برو که بو قوی تر می شود» نمی تواند ردگیری لبه را در این دستگاه توضیح دهد.

سپس لبه جانبی راهرو را به یک پروفایل گاوسی نرم تبدیل کردند که در آن غلظت به تدریج تغییر می کرد، نه این که ناگهان روشن و خاموش شود. مگس ها نزدیک پهلوی جمع شدند که غلظت سریع تر تغییر می کرد، نه در مرکز که بوقوی تر بود. پس نشانه مرتبط، تغییر جانبی ای بود که یک مرز مؤثر را تعریف می کرد، نه افزایش ضروری بو به سمت منبع در امتداد راهرو.

این به معنای بی اهمیت بودن گرادیان غلظت در طبیعت نیست. یعنی در شرایط آزمایش شده، برای این رفتار افزایش بو به سوی منبع لازم نبود.

پژوهشگران همچنین جهت راهرو را تغییر دادند. گروه های جداگانه راهروهای صفر، 45 و 90 درجه را دنبال کردند و گروهی دیگر با راهروی روبه رو شد که پس از خروج به پهلوی می پرید. اندازه گروه ها به ترتیب 40، 21، 20 و 24 مگس بود. مسیرهای خارجی آن ها با هندسه تغییر کرد. یک قانون کلی مانند «همیشه رو به باد بچرخ» این انعطاف را توضیح نمی دهد.

در این دستگاه، بو با اختلافی حدود دو میلی ثانیه به دو شاخک می رسید. تحریک اپتوژنتیکی دوطرفه همراه با باد توانست الگویی شبیه ردگیری لبه ایجاد کند. اپتوژنتیک از پروتئین های حساس به نور برای تغییر فعالیت سلول های منتخب استفاده می کند. در این جا نتیجه نشان می دهد تفاوت چپ-راست در زمان رسیدن بو برای این رفتار ضروری نبود. اما مقایسه دوطرفه را برای جانوران آزاد در توده های بوی دیگر بی اهمیت نمی کند.

یک بردار از یک نقشه کوچک تر است

بردار جهت و اندازه دارد. کمیت ذخیره شده مفید در این جا عمدتاً جهت بود: مگس برای رسیدن به مرز توده بو باید به کدام سمت بچرخد؟ مطالعه شواهدی پیدا نکرد که مگس طرح کامل توده بو یا موقعیت خودش را درون آن ذخیره کند.

نویسندگان ابتدا با درهم ریختن اجزای حرکت واقعی مگس مسیرهای مصنوعی ساختند. طول حرکت های مستقیم و زاویه های چرخش مشاهده شده را به طور تصادفی برداشتند و به هم دوختند. بعضی از این راهروندگان مصنوعی در نهایت دوباره به مرز بو برخورد کردند، اما از مگس های واقعی دورتر سرگردان شدند و مسیرهای کم تر مستقیمی پیوندند. حتی افزودن تمایل معمول مگس ها به چرخیدن رو به باد نیز بازگشت های کوتاه و جهت دار را بازتولید نکرد. بنابراین رفتار واقعی جهت مندی بیشتری از یک ترکیب تصادفی همان حرکت ها داشت.

پژوهشگران بعد مدلی با دو حالت ساختند: ترک مرز و بازگشت به مرز. این حالت ها برچسبی برای تک تک لحظات داخل یا خارج بو نبودند؛ قوانین هدایت جایگزینی بودند که هنگام حرکت مگس می توانستند بین هم جابه جا شوند.

هر عبور از مرز به مدل جهتی برای یادآوری می داد. هنگام خروج، مدل جهتی را که در فاز ترک کردن استفاده می شد به روزرسانی می کرد. هنگام ورود، یک جهت بازگشت جداگانه را به روز می کرد: در عمل، «وقتی مرز را پیدا کردم، در این جهت حرکت می کردم». در بازگشت بعدی، همین جهت به یادمانده حرکت مگس شبیه سازی شده را به سوی لبه سوگیری می داد.

پژوهشگران مدل را با مسیرهای راهروهای صفر، 45 و 90 درجه برازش کردند. در مقایسه خلاصه، 72 مگس واقعی و 75 شبیه سازی آمارهای مسیر مشابهی تولید کردند. وقتی جهت بازگشت آموخته شده هنگام ورود حذف شد، ردگیری در همه جهت های راهرو کارایی کمتری داشت. این از مفید بودن حافظه جهت ورود پشتیبانی می کند؛ اما اثبات نمی کند مغز مگس واقعاً معادلات مدل را اجرا می کند.

«حافظه» در این مقاله یعنی چه؟

و مدل رفتار، که است استنباطی جهت دار» «حافظه» نخواندند. مگس مغز از مستقیماً را ذخیره شده فلشی پژوهشگران کند. بازتولید را مسیر مهم آمارهای می تواند متغیر جهت چند می گوید مدل می کنند. پشتیبانی آن از عصبی اندازه گیری های

است. حافظه ذخیره محل نورونی نام گذاری شده گروه یک یا می کند اجرا تحت اللفظی به طور را معادلات مگس نمی کند ثابت

یک تجربه اضافی با قطعه ای 45 درجه ای در جهت مخالف، رفتار بعدی 10 مگس را تغییر داد و در کنار آن 29 شبیه سازی مدل نیز بررسی شد. این نتیجه توضیح جهت محور را مشخص تر از یک توصیف پس از مشاهده می کند، اما همچنان تفسیری مبتنی بر مدل باقی می ماند.

یک مرجع جهت و یک هدف فعلی

سپس مطالعه فعالیت در کمپلکس مرکزی مغز مگس، ناحیه ای درگیر در ناوبری، را اندازه گیری و مختل کرد.

دو سیگنال با دو وظیفه متفاوت

را مگس فعلی جهت می کند: عمل قطب نما مانند EPG فعالیت مرکزی اند. کمپلکس در نورونی جمعیت دو نام FC2 و EPG هدایت مدار یک کند. حرکت آن به می کوشد مگس که است مرتبط جهتی با FC2 فعالیت می کند. دنبال باد به نسبت هیچ کدام نمی دهد نشان اما می کند، آزمایش را جمعیت دو هر مطالعه کند. مقایسه هدف آن با را فعلی جهت می تواند پایین دست می کنند. ذخیره را حافظه کل به تنهایی

نورون های EPG سیگنال جهت دارند: الگوی فعالیت آن ها جهت رو به روی مگس را نسبت به یک نشانه خارجی دنبال می کند. پژوهشگران با تصویربرداری کلسیمی، یعنی خوانش نوری غیرمستقیم فعالیت عصبی، دریافتند فاز فعالیت EPG هنگام ردگیری لبه، جهت نسبت به باد را دنبال می کند. این تحلیل از 16 آزمون روی 9 مگس استفاده کرد.

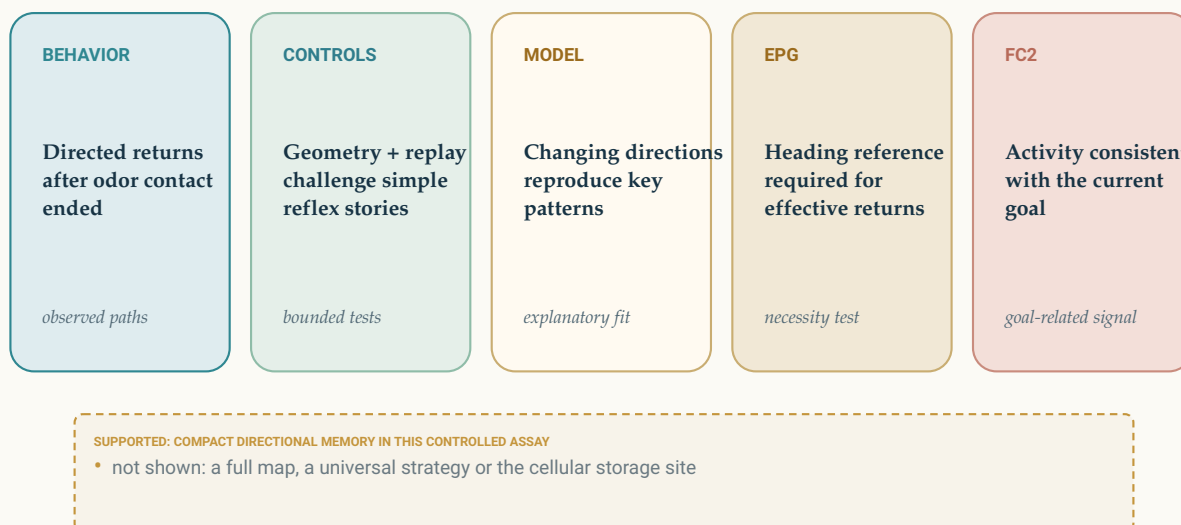
برای مهار نورون های EPG، پژوهشگران آن ها را طوری مهندسی کردند که **GtACR1** را بیان کنند؛ کانال آتیونی که با نور سبز فعال می شود. یک LED در سراسر آزمون روشن ماند، این کانال را فعال کرد و نورون های منتخب را سرکوب کرد؛ همان نور در مگس های کنترل ژنتیکی اختلال ایجاد نکرد.

وقتی نورون های EPG به این روش مهار شدند، 12 مگس آزمایشی نسبت به 6 مگس کنترل ژنتیکی بازگشت های جهت دار کم اثرتری انجام دادند. نتیجه محدود این است که مرجع جهتی حمل شده توسط فعالیت EPG برای ردگیری مؤثر لبه در شرایط آزمایش شده لازم بود. این مدرک نیست که نورون های EPG به تنهایی جهت مرز را ذخیره می کنند.

نورون های FC2 رابطه متفاوتی نشان دادند. فعالیت جمعیتی آن ها با هدف ناوبری فعلی مرتبط بود و پیش از چرخش ها در آزمون به سمت مرز توده بو اشاره می کرد. تصویربرداری از 6 مگس استفاده کرد و مقایسه های خاموش سازی، بسته به تحلیل، گروه هایی 9 تا 14 مگسی داشتند. خاموش سازی ردگیری لبه را مختل کرد.

Five evidence layers, five different claims

The cards converge; they are not a directly observed neural chain.



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

رفتار، تغییر هندسه توده بو، یک مدل برازش شده و دواختلال عصبی از بخش‌های متفاوت توضیح حافظه جهت‌دار پشتیبانی می‌کنند. در کنار هم از یک جهت هدف فشرده در این آزمون کنترل‌شده پشتیبانی می‌کنند، نه یک نقشه کامل یا محل سلولی اثبات‌شده برای ذخیره حافظه.

The Clean Paper CC BY 0.4

این شواهد همگرا هستند، نه زنجیره‌ای از علیت که از آن عکس گرفته شده باشد. فعالیت EPG یک مرجع جهت ضروری فراهم کرد. فعالیت FC2 با جهت هدف سازگار بود و برای رفتار مؤثر لازم بود. آزمایش‌ها یک «انگرم» حافظه واحد را پیدا نکردند و ثابت نکردند سیناپس‌های FC2 جهت را به‌طور فیزیکی ذخیره می‌کنند.

برای یک تشبیه تقریبی در مقیاس انسانی، تصور کنید از یک نوار باریک مه بیرون می‌آید در حالی که باد ثابت هنوز جهت شمال را به شما می‌گوید. قطب‌نما می‌تواند بگوید رو به کدام سمت هستید، اما بازگشت به مه علاوه بر آن به جهت به‌یادمانده‌ای به سوی لبه نیاز دارد. مقایسه جهت فعلی با آن جهت مطلوب می‌گوید به کدام سمت بچرخید. این همان تقسیم کار پیشنهادی میان سیگنال‌های EPG و FC2 است. یک تشبیه توضیحی است، نه مدرکی که انسان از همان سلول‌ها یا الگوریتم استفاده می‌کند.

حافظه به عمل وابسته بود، نه فقط زمان‌بندی بو

در یک آزمایش بازپخش، مگس‌ها همان توالی زمانی بو را مانند قبل دریافت کردند، اما زمان‌بندی دیگر به کاری که در همان لحظه انجام می‌دادند وابسته نبود. سوگیری جهت‌دار آموخته‌شده در بازه‌های بازپخش ضعیف شد. این نتیجه از یک به‌روزرسانی کنش‌وابسته (operant) پشتیبانی می‌کند: مهم فقط مواجهه منفعل با یک توالی بو نبود، بلکه رابطه میان بو و حرکت خود مگس بود.

مخرج آماری در این تحلیل‌ها تغییر می‌کند. پل‌های Data Extended بسته به مقایسه شامل 8 یا 9 مگس‌اند؛ سری بازه‌های متوالی از 8 مگس استفاده می‌کند؛ پل‌های مسیر دست کم 10 ورود مؤثر می‌خواهند؛ و پل‌های مدل جفت‌شده از 21 مسیر شبیه‌سازی‌شده استفاده می‌کنند که آن‌ها نیز آستانه ورود را برآورده می‌کنند. این‌ها یک نمونه تجمع‌شده هشت‌تایی نیستند.

توده بوی نامنظم تر مفید بود، اما همچنان مجازی

پژوهشگران همچنین یک توده بوی قبلاً ثبت شده و نامنظم تر را بازپخش کردند. آن را در فضا و زمان پنج برابر مقیاس کردند تا مگس های مهار شده بتوانند به اندازه کافی با آن روبه رو شوند. ده مورد از 12 مگس به فاصله کمتر از 50 میلی متر مجازی از منبع رسیدند.

این به معنای یافتن یک منبع واقعی در هوای آزاد توسط ده مگس نیست. عملکرد در یک بازپخش کنترل شده از توده ای طبیعی تر است.

برای هر نوع توده پویا، مدل 2,000 مسیر تولید کرد. مقایسه توده مقیاس شده پس از الزام به یک ورود مؤثر و حذف مسیرهایی که بیش از حد نزدیک منبع شروع می شدند، 1,850 مورد از آن 2,000 را تحلیل کرد. حافظه نزدیک منبع بیشتر کمک می کرد، جایی که برخورد های پیاپی ساختار جهت دار منسجم تری حفظ می کردند؛ و در ناحیه تلاطم تر پایین باد کمتر کمک می کرد.

همین قید بخشی از نتیجه است. یک جهت فشرده فقط زمانی می تواند مفید باشد که جهان به اندازه ای منسجم بماند تا برخورد قبلی درباره برخورد بعدی اطلاعات مفیدی بدهد.

مطالعه چه چیزی را نشان نمی دهد؟

- نشان نمی دهد مگس یک نقشه فضایی کامل می سازد.
- پرواز آزاد در یک توده طبیعی دست نخورده را نشان نمی دهد.
- ثابت نمی کند همه ناوبری هدایت شده با بو از این راهبرد استفاده می کند.
- نشان نمی دهد نورون های EPG یا FC2 تنها محل فیزیکی ذخیره حافظه اند.
- مدل برازش شده را به الگوریتم زیستی تحت اللفظی مگس تبدیل نمی کند.
- مستقیماً به ناوبری انسان تعمیم داده نمی شود.

مطالعه هرچه مشخص تر می شود قوی تر است. کنترل حلقه بسته به پژوهشگران دسترسی دقیق به هر برخورد با بو داد. سپس تغییر هندسه، بازپخش، مدل سازی، تصویربرداری کلسیمی و خاموش سازی بخش های متفاوت یک توضیح را آزمودند. با این حال گروه های رفتاری، تصویربرداری و خاموش سازی جدا بودند؛ اندازه نمونه ها از پیش تعیین نشده بود؛ جمع آوری و تحلیل داده ها تصادفی سازی یا کور نشده بود؛ و کمتر از 10% مگس های مهار شده به دلیل مشکلات سازگاری، پاسخ یا ردیابی کار گذاشته شدند.

این محدودیت ها پدیده را پاک نمی کنند. مرزهای آن را تعریف می کنند.

خلاصه روشن

مگس های میوه مهار شده که در راهروی مجازی بو راه می رفتند، پس از ترک بو بارها به مرزی برگشتند که دیگر نمی توانستند حسش کنند. تغییر غلظت و هندسه راهرو، یک مدل سوئیچینگ برازش شده، تصویربرداری عصبی و خاموش سازی اپتورنتیکی از توضیحی پشتیبانی می کنند که در آن مگس به جای نقشه کامل از جهت به یادمانده ای فشرده استفاده می کند. نورون های EPG مرجع جهت ضروری فراهم کردند، در حالی که فعالیت FC2 با جهت هدف فعلی سازگار بود. نتیجه محدود به یک آزمون کنترل شده راه رفتن است؛ محل سلولی ذخیره حافظه را مشخص نمی کند و نشان نمی دهد همین محاسبه در پرواز آزاد طبیعی رخ می دهد.

بررسی بدون اغراق

مقاله چه چیزی نشان می‌دهد: در یک آزمون مهارشده حلقه‌بسته، مگس‌ها به‌صورت جهت‌دار به مرزهای مجازی بویی برگشتند که دیگر نمی‌توانستند حس کنند. چند کنترل رفتاری، مدل‌سازی و دستکاری عصبی از یک راهبرد مبتنی بر بردار پشتیبانی می‌کنند.

چه چیزی استنباط می‌شود: این که رفتار از یک حافظه جهت‌دار فشرده استفاده می‌کند و فعالیت جمعیتی FC2 یک هدف ناوبری فعلی را نمایش می‌دهد. محتوای حافظه مستقیماً خوانده نشد.

چه چیزی نشان داده نشده است: نقشه ذهنی کامل، راهبرد جهانی بویایی، عملکرد پرواز آزاد در توده طبیعی، محل واحد ذخیره حافظه یا همتای انسانی.

محدودیت‌های اصلی: یک گونه و دستگاه کنترل‌شده؛ گروه‌های متفاوت مگس و واحدهای تحلیل متفاوت میان آزمایش‌ها؛ سیگنال‌های غیرمستقیم کلسیمی؛ آزمون‌های ضرورت که کفایت را ثابت نمی‌کنند؛ و توده طبیعی نما که بازپخش و مقیاس شده بود.

یک خواننده عمومی تا چه حد باید اطمینان داشته باشد؟ اطمینان بالا که پدیده بازگشت جهت‌دار در این دستگاه واقعی است و فعالیت‌های مرتبط با جهت و هدف در کپلکس مرکزی اهمیت دارند. اطمینان متوسط به مدل به‌عنوان توضیحی فشرده. اطمینان پایین به هر ادعایی که آن را بدون تغییر به فضای باز تعمیم دهد یا آن را یک نقشه کامل بنامد.

منابع

(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>