The Clean Paper

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

'n Vlieg kan 'n reuk verloor en steeds terugdraai. In 'n virtuele pluim het 'n onthoude rigting gehelp

Vasgemaakte vrugtevlieë het herhaaldelik na 'n reukgrens teruggekeer nadat hulle skoon lug binnegestap het. Gedrag, modellering en neurale versteurings ondersteun 'n kompakte geheue van rigting, nie 'n volledige kaart nie. Die resultaat kom uit 'n beheerde virtuelewerklikheidstoets en toon nog nie dieselfde strategie in vrye natuurlike vlug nie.

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

’n Vlieg kan ’n reuk verloor en steeds daarheen terugdraai

Die vlieg het die reuk agtergelaat.

Dit het deur skoon lug bly loop, soms vir tientalle sekondes en honderde virtuele millimeters. Toe draai dit na die grens wat dit oorgesteek het en vind die reuk weer. Op daardie oomblik kon die reuk self nie die pad terug aanwys nie.

Dit is die sentrale waarneming in ’n nuwe Nature-studie oor vrugtevliegnavigasie. Die navorsers voer aan dat die vlieë ’n kompakte geheue van rigting gebruik het: nie ’n kaart van die hele reukpluim nie, en nie ’n geheue van die afstand wat afgelê is nie, maar ’n onthoude koers na ’n grens wat nie meer opgespoor kon word nie.

Die resultaat is opvallend omdat dit toon hoe min gestoorde inligting genoeg kan wees. Dit is ook maklik om te oordryf. Hierdie vlieë het nie vry deur ’n natuurlike landskap gevlieg nie. Hulle het vasgemaak op ’n luggedraagde bal binne ’n streng beheerde virtuele wêreld geloop. Die studie ondersteun ’n vektorgebaseerde strategie in daardie apparaat; dit toon nie dat vlieë verstandelike kaarte bou, verduidelik nie elke manier waarop diere reuke volg nie en identifiseer nie die selle waarin ’n geheue fisies gestoor word nie.

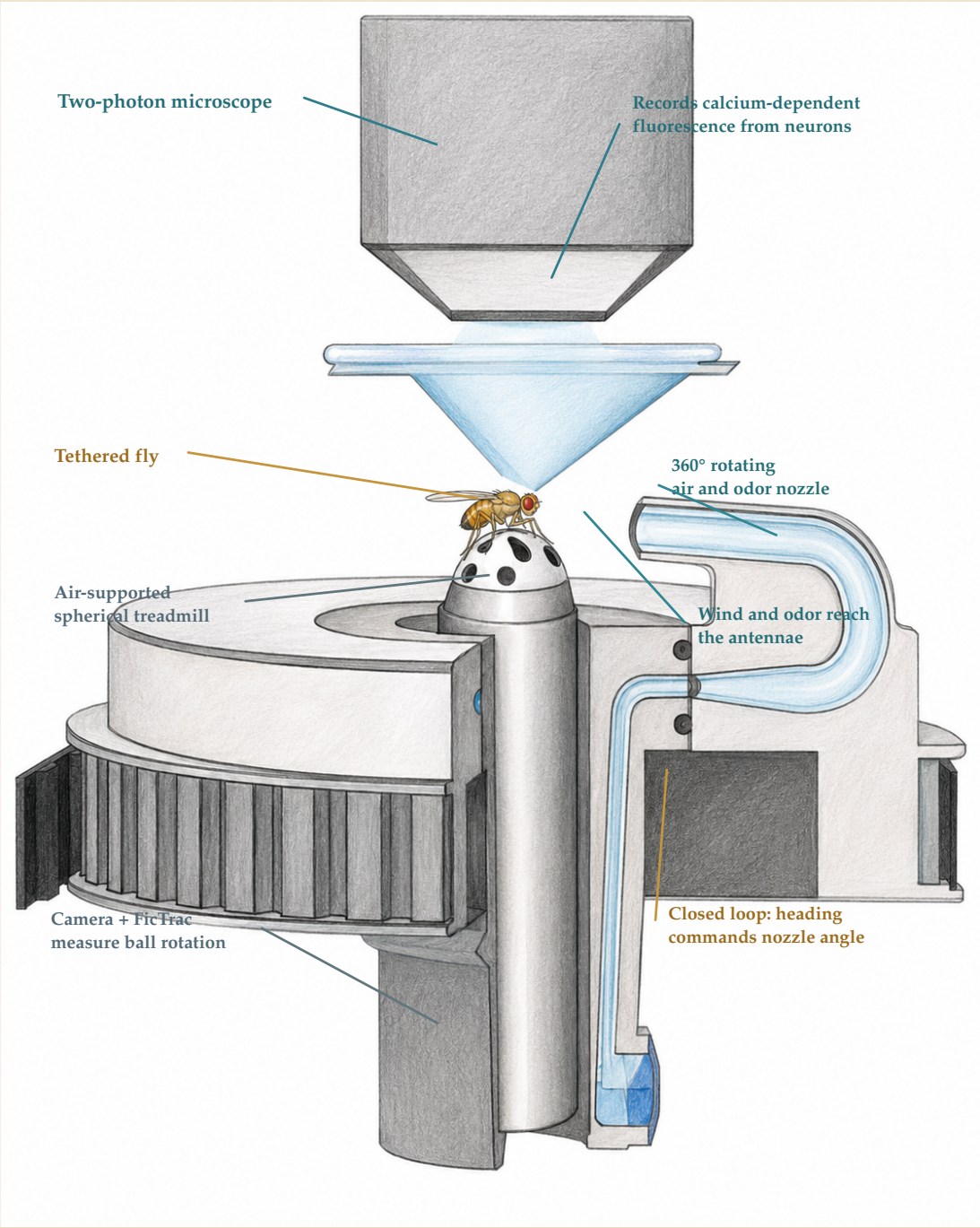
Die onsigbare gang is deur sagteware gemaak

’n Reukpluim is die bewegende gebied van reuk wat deur lug gedra word. Buitenshuis buig ’n pluim, breek uitmekaar en verbind weer soos die wind verander. Dit maak dit moeilik om presies te weet wat ’n dier op elke oomblik geruik het.

Die navorsers het die probleem beheerbaar gemaak met **geslotelus-virtuele werklikheid**. Die vlieg se liggaam is bo ’n liggewigbal wat op lug dryf, vasgemaak. Terwyl die vlieg geloop het, het ’n kamera die bal se rotasie ongeveer 60 keer per sekonde gemeet. Sagteware het daardie rotasie in ’n virtuele tweedimensionele posisie en koers vertaal.

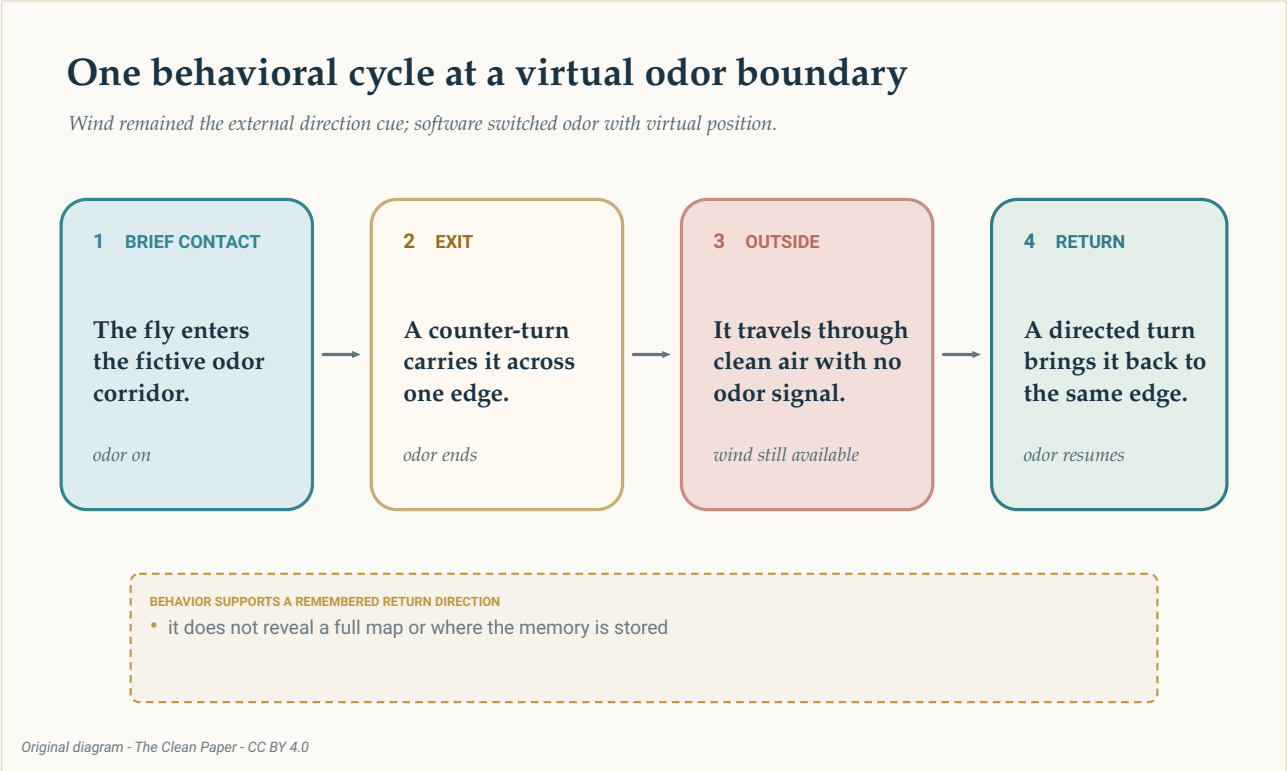
Daardie koers het ’n gemotoriseerde spuitstuk beheer wat deur 360 grade kon draai. Soos die vlieg sy virtuele koers verander het, het die spuitstuk rondom hom beweeg om die wind met ’n stabiele rigting in die vlieg se virtuele wêreld belyn te hou. Terselfdertyd het massavloeibeheerders verander hoeveel skoon lug of appelasynreuk die antennas bereik het volgens die vlieg se virtuele posisie. Die oorsteek van ’n sagtewaregedefinieerde grens het dus die reuk aan- of afgeskakel en ’n fiktiewe gang van 50 millimeter breed en een meter lank geskep, hoewel die vlieg nooit die bal verlaat het nie.

Die apparaat het op elke tydstip ’n gesinchroniseerde rekord van die vlieg se virtuele posisie, koers, reuktoestand en lugvloeibeheer gelewer. Uit daardie rekord het die navorsers trajekte gerekonstrueer, elke ingang en uitgang gemerk en gemeet hoe direk die vlieg teruggekeer het. Wind het die eksterne rigtingaanwyser verskaf; die vlieg se eie beweging het bepaal wanneer dit enige kant van die virtuele reukgrens teëgekom het.



Die vlieg het vasgemaak bo ’n luggedraagde bal gebly. ’n Kamera en FicTrac het balrotasie in virtuele beweging en koers omgeskakel; sagteware het daarna die lug-en-reukspuitstuk gedraai en reuk volgens virtuele posisie geskakel. Tydens afsonderlike neurale beeldvormingstoetse het die tweefotonmikroskoop bo die vlieg kalsiumafhanklike fluoressensie van EPG- of FC2-neurone opgeneem, sodat neurale aktiwiteit met gedrag belyn kon word. Die mikroskoop was nie vir elke gedragstoets nodig nie.

The Clean Paper CC BY 4.0



In die beheerde toets het 'n vlieg die virtuele reukgang kort binnegegaan, dit verlaat, deur reuklose lug gereis en 'n gerigte terugkeer gemaak. Die gedrag ondersteun 'n onthoude terugkeerrigting; dit onthul nie waar daardie inligting gestoor word nie.

The Clean Paper CC BY 4.0

In die hoofeksperiment met 'n **vertikale gang** het **40 vlieë** herhaaldelik die reuk binnegegaan, in die teenoorgestelde rigting daaruit gedraai en na dieselfde rand teruggekeer. "Vertikaal" is die artikel se naam vir die 0-grade-geometrie: die gang se lang as het parallel met die opwindse rigting geloop. Dit beteken nie dat die apparaat regop gestaan het nie.

Die outeurs noem hierdie patroon **randvolging**. 'n **Episode** is een deurlopende tydperk tussen grensoorsteekings: 'n binne-episode loop van ingang tot uitgang, en 'n buite-episode van uitgang totdat die vlieg terugkeer. Oor 755 binne-episodes het 'n besoek gemiddeld 4,9 sekondes geduur. Tydens terugkeer was die gemiddelde afstand van die grens 10,4 millimeter. Minder as 4% van 793 episodes het heeltemal na die gang se teenoorgestelde rand oorgesteek.

Daardie laaste twee getalle beskryf episodes, nie honderde onafhanklike vlieë nie. Die onderskeid maak saak omdat een dier baie episodes kan bydra.

Die terugkeer was nie bloot 'n vaste opwindse refleks nie

Verskeie eksperimente het eenvoudiger verklarings getoets.

Die navorsers het eers verander wat **langs** die gang gebeur terwyl 'n vlieg opwind loop. Die reuk kon sterker word na die virtuele bron, konstant bly of swakker word. Die vlieë het in al drie gevalle soortge-

lyke paaie gevolg. ’n Eenvoudige reël soos “gaan voort waar die reuk sterker word” kan randvolging in hierdie apparaat dus nie verklaar nie.

Hulle het daarna die gang se **sywaartse** rand in ’n Gaussiese profiel versag, waar die konsentrasie geleidelik verander het in plaas daarvan om skielik te skakel. Die vlieë het naby die flank saamgedrom waar die konsentrasie die vinnigste verander het, nie in die middel waar die reuk die sterkste was nie. Die relevante aanwyser was dus die laterale verandering wat ’n effektiewe grens gemerk het, eerder as ’n vereiste toename na die bron langs die gang.

Dit beteken nie dat konsentrasiegradiënte nooit in die natuur saak maak nie. Dit beteken dat ’n toename na die bron nie vir hierdie gedrag onder die getoetste toestande nodig was nie.

Die navorsers het ook die gang se oriëntasie verander. Afsonderlike groepe het vertikale, 45-grade- en 90-grade-gange gevolg, en ’n ander groep het ’n gang teëgekom wat ná uitgange sywaarts gespring het. Die groepgroottes was onderskeidelik 40, 21, 20 en 24 vlieë. Hul buitepaaie het met die geometrie verander. ’n Algemene reël soos “draai altyd opwind” kan daardie buigsaamheid nie verklaar nie.

In hierdie opstelling het reuk die twee antennas binne ongeveer twee millisekondes bereik. Die koppeling van bilaterale optogenetiese aktivering met wind kon ’n randvolgingagtige patroon naboots. **Optogenetika** gebruik ligsensitiewe proteïene om geselekteerde selle te verander. Hier dui die resultaat daarop dat ’n links-teenoor-regs-verskil in die aankomstyd van reuk nie vir hierdie gedrag nodig was nie. Dit maak bilaterale vergelyking nie irrelevant vir vrybewegende diere in ander pluime nie.

’n Vektor is kleiner as ’n kaart

’n **Vektor** is ’n rigting saam met ’n grootte. Die nuttige gestoorde hoeveelheid hier was hoofsaaklik rigtinggewend: watter kant moet die vlieg draai om die pluimgrens te bereik? Die studie het nie bewys gevind dat die vlieg ’n volledige uitleg van die pluim of sy eie posisie daarin gestoor het nie.

Die outeurs het eers kunsmatige paaie gemaak deur die bestanddele van werklike vliegbeweging te herskommel. Hulle het waargenome looplengtes en draaihoeke lukraak getrek en aanmekaar gesit. Sommige van hierdie sintetiese wandelaars het uiteindelik weer die reukgrens getref, maar hulle het verder rondgedwaal en minder direkte roetes as werklike vlieë geneem. Selfs die toevoeging van die vlieë se gewone neiging om opwind te draai, het nie die kort, gerigte terugkeer gereproduseer nie. Die werklike gedrag het dus meer rigting bevat as ’n ewekansige hersamestelling van dieselfde bewegings.

Die navorsers het daarna ’n model met twee modusse gebou: **verlaat die grens** en **keer na die grens terug**. Hierdie modusse was nie etikette vir elke oomblik binne of buite die reuk nie. Dit was alternatiewe stuurreëls wat kon wissel terwyl die vlieg beweeg.

Elke grensoorsteeking het die model ’n rigting gegee om te onthou. By uitgang het dit ’n rigting opgedateer wat tydens vertrek gebruik is. By ingang het dit ’n afsonderlike terugkeerrigting opgedateer: in effek, “toe ek die grens gevind het, het ek hierdie kant toe beweeg.” Tydens ’n latere terugkeer het daardie onthoude rigting die gesimuleerde vlieg se beweging terug na die rand bevoordeel.

Die navorsers het die model by trajekte oor die 0-, 45- en 90-grade-gange gepas. In die samevattende vergelyking het 72 werklike vlieë en 75 simulasies soortgelyke padstatistiek opgelewer. Toe die terugkeerrigting wat by ingang geleer is, verwyder is, het volging oor alle gangoriëntasies minder doeltreffend geword. Dit ondersteun die nuttigheid van ’n geheue vir die ingangsrigting; dit bewys nie dat ’n vlieg se brein die model se vergelykings letterlik uitvoer nie.

> **Wat beteken “geheue” in hierdie artikel?**
>
> Die navorsers het nie ’n gestoorde pyl direk uit ’n vlieg se brein gelees nie. “Rigtinggeheue” is ’n afleiding wat deur gedrag, ’n model en neurale metings ondersteun word. Die model sê dat ’n paar veranderende rigtings belangrike padstatistiek kan reproduseer. Dit bewys nie dat die vlieg die vergelykings letterlik implementeer of dat een benoemde groep neurone die stoorplek is nie.

’n Bykomende ervaring met ’n teenoorgesteld georiënteerde 45-grade-segment het latere gedrag in 10 vlieë verskuif, saam met 29 modelsimulasies. Dit maak die rigtingverklaring meer spesifiek as ’n beskrywing wat ná die tyd gemaak is, terwyl dit steeds ’n modelgebaseerde interpretasie bly.

’n Koersverwysing en ’n huidige doelwit

Die studie het daarna aktiwiteit in die vlieg se **sentrale kompleks**, ’n breinstreek wat by navigasie betrokke is, gemeet en versteur.

> **Twee seine met verskillende take**
>
> EPG en FC2 is name vir twee neuronbevolkings in die sentrale kompleks. EPG-aktiwiteit werk soos ’n kompaslesing: dit volg die rigting waarin die vlieg tans kyk relatief tot die wind. FC2-aktiwiteit hou verband met die rigting waarin die vlieg probeer beweeg. ’n Stuurkring stroomaf kan die huidige koers met daardie doelwit vergelyk. Die studie toets albei bevolkings, maar toon nie dat een van hulle alleen die hele geheue stoor nie.

EPG-neurone dra ’n koersein: hul aktiwiteitspatroon volg die rigting waarin die vlieg kyk relatief tot ’n eksterne aanwyser. Met kalsiumbeeldvorming, ’n indirekte optiese uitlees van neurale aktiwiteit, het die navorsers gevind dat die fase van EPG-aktiwiteit die koers relatief tot die wind tydens randvolging gevolg het. Hierdie ontleding het 16 toetse van 9 vlieë gebruik.

Om EPG-neurone te inhibeer, het die navorsers hulle geneties aangepas om **GtACR1** uit te druk, ’n anioonkanaal wat deur groen lig aangeskakel word. ’n LED het gedurende die hele toetslopie aangebly, die kanaal geaktiveer en die geselekteerde neurone onderdruk; dieselfde beligting het genetiese kontrolevlieë nie benadeel nie.

Toe EPG-neurone op hierdie manier geïnhibeer is, het 12 eksperimentele vlieë minder doeltreffende gerigte terugkeer gemaak as 6 genetiese kontrolevlieë. Die begrensde gevolgtrekking is dat die ko-

ersverwysing wat deur EPG-aktiwiteit gedra word, vir doeltreffende randvolging onder die getoetste toestande nodig was. Dit is nie bewys dat EPG-neurone alleen die grensrigting gestoor het nie.

FC2-neurone het ’n ander verband getoon. Hul bevolkingsaktiwiteit het met die huidige navigasie-doelwit verband gehou en vóór draaie in die toets na die pluimgrens gewys. Beeldvorming het 6 vlieë gebruik, en stilmaakvergelykings het groepe van 9 tot 14 vlieë gebruik, afhangend van die ontleding. Stilmaak het randvolging benadeel.

Gedrag, veranderde pluimgeometrie, ’n gepaste model en twee neurale versteurings ondersteun verskillende dele van die rigtinggeheueverklaring. Saam ondersteun hulle ’n kompakte doelrigting in hierdie beheerde toets, nie ’n volledige kaart of ’n bewese sellulêre stoorplek nie.

The Clean Paper CC BY 4.0

Dit is konvergerende bewyse, nie ’n gefotografeerde ketting van oorsaaklikheid nie. EPG-aktiwiteit het ’n vereiste koersverwysing verskaf. FC2-aktiwiteit was versoenbaar met ’n doelrigting en was nodig vir doeltreffende gedrag. Die eksperimente het nie ’n enkele geheue-“engram” opgespoor of bewys dat FC2-sinapse die rigting fisies gestoor het nie.

As ’n ruwe analogie op menslike skaal: stel jou voor jy stap uit ’n smal misbank terwyl ’n bestendige wind steeds vir jou sê waar noord is. ’n Kompas kan sê watter kant toe jy kyk, maar om na die mis terug te keer verg ook ’n onthoude koers na sy rand. Deur die huidige koers met daardie verlangde koers te vergelyk, kan jy weet watter kant toe om te draai. Dit is die taakverdeling wat hier vir EPG- en FC2-seine voorgestel word. Dit is ’n verklarende analogie, nie bewys dat mense dieselfde selle of algoritme gebruik nie.

Die geheue het van handeling afgehang, nie net van reuktydsberekening nie

In ’n herhalingseksperiment het vlieë dieselfde volgorde van reuktye as voorheen ontvang, maar die tydsberekening was losgemaak van wat hulle op daardie oomblik gedoen het. Die aangeleerde rigtingvooroordeel het oor herhalingsepisodes verswak. Dit ondersteun ’n **operante**, handelinggekoppelde opdatering: wat saak gemaak het, was nie bloot passiewe blootstelling aan ’n reukvolgorde nie, maar die verhouding tussen reuk en die vlieg se beweging.

Die noemer verander oor daardie ontledings. Uitgebreide Data-panele sluit 8 of 9 vlieë in, afhangend van die vergelyking; die reeks van opeenvolgende episodes gebruik 8 vlieë; trajekpanele vereis minstens 10 effektiewe ingange; en die gepaarde modelpanele gebruik 21 gesimuleerde trajekte wat ook aan daardie ingangsvereiste voldoen. Dit is nie een saamgevoegde steekproef van agt nie.

’n Meer onreëlmatige pluim was nuttig, maar steeds virtueel

Die navorsers het ook ’n voorheen opgeneemde, meer onreëlmatige pluim herhaal. Hulle het dit vyfvoudig in ruimte en tyd geskaal sodat vasgemaakte vlieë dit dikwels genoeg kon teëkom. **Tien van 12 vlieë** het binne 50 virtuele millimeter van die bron gekom.

Dit is nie tien vlieë wat ’n werklike bron in oop lug gevind het nie. Dit is prestasie in ’n beheerde herhaling van ’n natuurgetroue pluim.

Vir elke dinamiese pluimtipe het die model 2 000 trajekte gegenereer. Die vergelyking met die geskaalde pluim het 1 850 van daardie 2 000 ontleed nadat ’n effektiewe ingang vereis en trajekte wat te naby aan die bron begin het uitgesluit is. Geheue het meer naby die bron gehelp, waar opeenvolgende ontmoetings samehangende rigtingstruktuur behou het, en minder in die meer turbulente streek verder afwind.

Die kwalifikasie is deel van die resultaat. ’n Kompakte rigting kan slegs help wanneer die wêreld samehangend genoeg bly dat ’n vorige ontmoeting iets nuttigs oor die volgende een sê.

Wat die studie nie toon nie

- Dit toon **nie** dat ’n vlieg ’n volledige ruimtelike kaart bou nie.
- Dit toon **nie** vrye vlug deur ’n onveranderde natuurlike pluim nie.
- Dit stel **nie** vas dat alle reukgeleide navigasie hierdie strategie gebruik nie.
- Dit toon **nie** dat EPG- of FC2-neurone die uitsluitlike fisiese stoorplek van die geheue is nie.
- Dit verander die gepaste model **nie** in die vlieg se letterlike biologiese algoritme nie.
- Dit veralgemeen **nie** direk na menslike navigasie nie.

Die studie is die sterkste waar dit die spesifiekste is. Geslotelusbeheer het die navorsers presiese toegang tot elke reukontmoeting gegee. Geometrieveranderinge, herhaling, modellering, kalsiumbeeldvorming en stilmaak het daarna verskillende dele van een verklaring getoets. Maar gedrags-, beeldvormings- en stilmaakkohorte was afsonderlik; steekproefgroottes is nie vooraf bepaal nie; data-insameling en -ontleding is nie gerandomiseer of geblindeer nie; en minder as 10% van vasgemaakte vlieë is weens akklimatisasie-, reaksie- of volgprobleme uitgesluit.

Daardie beperkings wis nie die verskynsel uit nie. Hulle definieer dit.

Kortliks

Vasgemaakte vrugtevlieë wat deur ’n virtuele reukgang geloop het, het herhaaldelik na ’n grens teruggekeer nadat hulle die reuk agtergelaat het. Veranderinge aan konsentrasie en ganggeometrie, ’n gepaste skakelmodel, neurale beeldvorming en optogenetiese stilmaak ondersteun ’n verklaring waarin die vlieg ’n kompakte onthoude rigting eerder as ’n volledige kaart gebruik. EPG-neurone het ’n vereiste koersverwysing verskaf, terwyl FC2-aktiwiteit met die huidige doelrigting versoenbaar was. Die resultaat is beperk tot ’n beheerde looptoets; dit identifiseer nie die geheue se sellulêre stoorplek of toon dieselfde berekening in vrye natuurlike vlug nie.

Nugtere beoordeling

Wat die artikel toon: In ’n geslotelus-toets met vasgemaakte vlieë het die vlieë gerigte terugkeer na virtuele reukgrense gemaak wat hulle nie meer kon waarneem nie. Verskeie gedragskontroles, modellering en neurale versteurings ondersteun ’n vektorgebaseerde strategie.

Wat afgelei word: Dat die gedrag ’n kompakte rigtinggeheue gebruik, en dat FC2-bevolkingsaktiwiteit ’n huidige navigasiedoelwit voorstel. Die geheue-inhoud is nie direk gelees nie.

Wat dit nie toon nie: ’n Volledige verstandelike kaart, ’n universele reukstrategie, vryvlugprestasie in ’n natuurlike pluim, ’n enkele geheuestoorplek of ’n menslike analoog.

Belangrikste beperkings: Een spesie en ’n beheerde apparaat; verskillende vliegkohorte en ontledingseenhede oor eksperimente; indirekte kalsiumseine; noodsaaklikheidstoetse wat nie voldoendeheid bewys nie; en ’n natuurgetroue pluim wat herhaal en geskaal is.

Hoeveel vertroue behoort ’n algemene leser te hê? Hoë vertroue dat die verskynsel van gerigte terugkeer in hierdie apparaat werklik is en dat koers- en doelverwante aktiwiteit in die sentrale kompleks saak maak. Matige vertroue in die model as ’n kompakte verklaring. Lae vertroue in enige bewering wat dit onveranderd na oop lug uitbrei of dit ’n volledige kaart noem.

Bronne

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