The Clean Paper

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

En flue kan miste en duft og stadig vende tilbage. I en virtuel fane hjalp en husket retning

Fastspændte bananfluer vendte gentagne gange tilbage til en duftgrænse efter at være gået ud i ren luft. Adfærd, modellering og neurale forstyrrelser støtter en kompakt hukommelse om retning, ikke et fuldstændigt kort. Resultatet stammer fra et kontrolleret virtual-reality-forsøg og viser endnu ikke den samme strategi under fri naturlig flyvning.

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

En flue kan miste duften og stadig vende tilbage mod den

Fluen havde lagt duften bag sig.

Den fortsatte gennem ren luft, nogle gange i snesevis af sekunder og flere hundrede virtuelle millimeter. Så vendte den mod den grænse, den havde krydset, og fandt duften igen. På det tidspunkt kunne selve duften ikke vise vej tilbage.

Det er den centrale observation i et nyt Nature-studie af navigation hos bananfluer. Forskerne argumenterer for, at fluerne brugte en kompakt hukommelse om retning: ikke et kort over hele duftfanen og ikke et minde om den tilbagelagte afstand, men en husket kurs mod en grænse, som ikke længere kunne sanses.

Resultatet er slående, fordi det viser, hvor lidt lagret information der kan være nok. Det er også let at overdrive. Disse fluer fløj ikke frit gennem et naturligt landskab. De gik fastspændt på en luftbåret kugle i en strengt kontrolleret virtuel verden. Studiet støtter en vektorbaseret strategi i dette apparat; det viser ikke, at fluer opbygger mentale kort, forklarer ikke alle måder, dyr følger dufte på, og identificerer ikke de celler, hvor en hukommelse fysisk lagres.

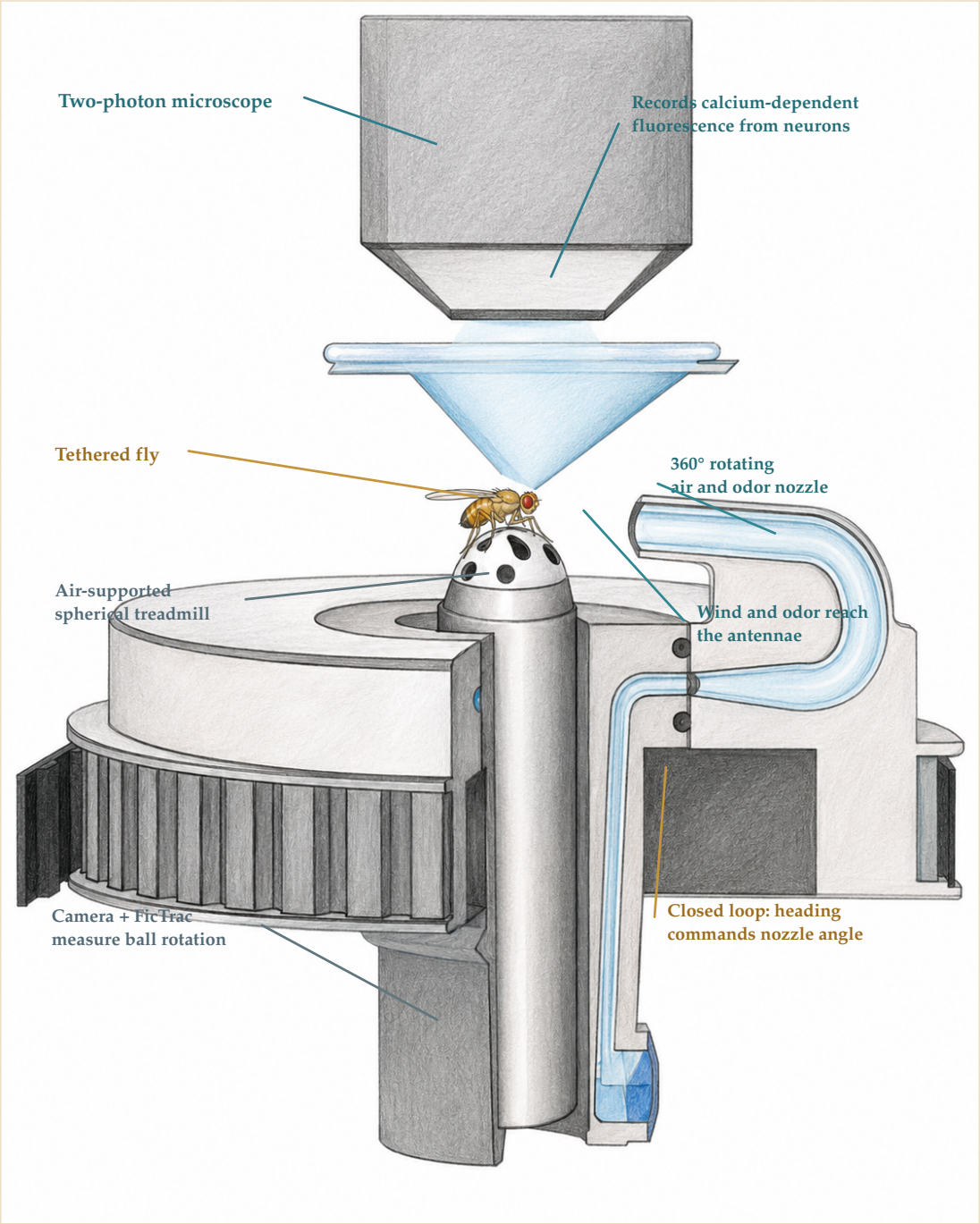
Den usynlige korridor blev skabt af software

En duftfane er det område med duft, som bæres med luften. Udendørs bøjer, brydes og samles en fane igen, når vinden skifter. Det gør det svært at vide præcist, hvad et dyr lugtede i hvert øjeblik.

Forskerne gjorde problemet kontrollerbart med **virtual reality i lukket kredsløb**. Fluens krop var fastspændt over en let kugle, der svævede på luft. Mens fluen gik, målte et kamera kuglens rotation omtrent 60 gange i sekundet. Softwaren oversatte rotationen til en virtuel todimensional position og kurs.

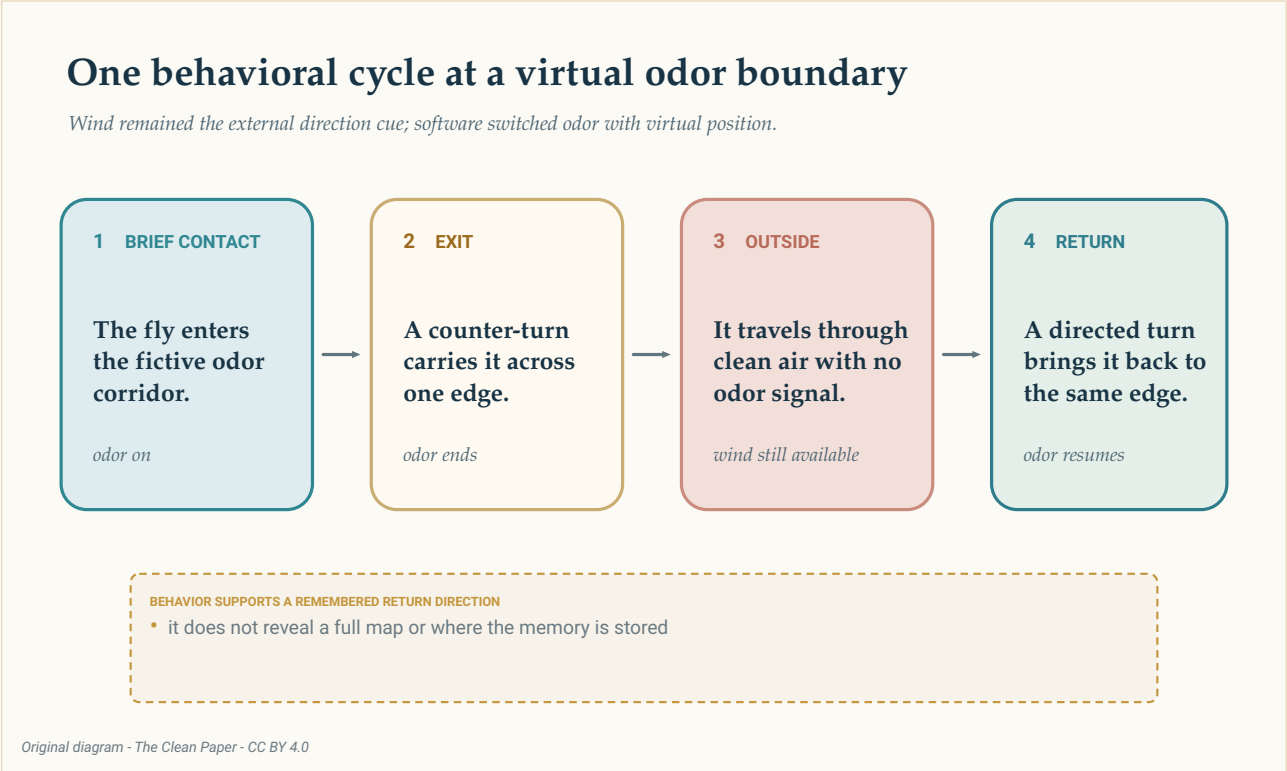
Denne kurs styrede en motoriseret dyse, der kunne rotere 360 grader. Når fluen ændrede sin virtuelle retning, bevægede dysen sig rundt om den, så vinden forblev justeret med en stabil retning i fluens virtuelle verden. Samtidig ændrede massestrømningsregulatorer, hvor meget ren luft eller duft af æblecidereddike der nåede antennerne, ud fra fluens virtuelle position. Når den krydsede en softwaredefineret grænse, blev duften dermed slået til eller fra og skabte en tænkt korridor, der var 50 millimeter bred og én meter lang, selv om fluen aldrig forlod kuglen.

Apparatet frembragte en synkroniseret registrering af fluens virtuelle position, kurs, dufttilstand og luftstrømskontroller ved hvert tidspunkt. Ud fra denne registrering rekonstruerede forskerne banerne, mærkede hver ind- og udgang og målte, hvor direkte fluen vendte tilbage. Vinden gav det ydre retningssignal; fluens egne bevægelser afgjorde, hvornår den mødte hver side af den virtuelle duftgrænse.



Fluen var fastspændt over en luftbåret kugle. Et kamera og FicTrac omdannede kuglens rotation til virtuel bevægelse og kurs; softwaren roterede derefter luft- og duftdysen og slog duften til eller fra efter den virtuelle position. Under separate forsøg med neural afbildning registrerede to-foton-mikroskopet over fluen calciumafhængig fluorescens fra EPG- eller FC2-neuroner, så neural aktivitet kunne sammenholdes med adfærden. Mikroskopet var ikke nødvendigt i hvert adfærdsforsøg.

The Clean Paper CC BY 4.0



I den kontrollerede analyse gik en flue kort ind i den virtuelle duftkorridor, forlod den, bevægede sig gennem duftfri luft og vendte målrettet tilbage. Adfærden støtter et husket retursignal, men afslører ikke, hvor informationen lagres.

The Clean Paper CC BY 4.0

I hovedforsøget med **lodret korridor** gik **40 fluer** gentagne gange ind i duften, vendte om ud af den og kom tilbage til den samme kant. »Lodret« er artiklens navn for 0-gradersgeometrien: Korridorens længdeakse lå parallelt med retningen mod vinden. Det betyder ikke, at apparatet stod på højkant.

Forfatterne kalder mønstret **kantsporing**. En **sekvens** er én sammenhængende episode mellem grænsekrydsninger: En indvendig sekvens går fra indgang til udgang, og en udvendig sekvens fra udgang, til fluen vender tilbage. I 755 indvendige sekvenser varede et besøg i gennemsnit 4,9 sekunder. Under returen var gennemsnitsafstanden fra grænsen 10,4 millimeter. Færre end 4 procent af 793 sekvenser krydsede helt over til korridorens modsatte kant.

De to sidste tal beskriver sekvenser, ikke hundredvis af uafhængige fluer. Skellet er vigtigt, fordi ét dyr kan bidrage med mange sekvenser.

Returerne var ikke blot en fast refleks mod vinden

Flere forsøg testede enklere forklaringer.

Forskerne ændrede først det, der skete **langs** korridoren, mens en flue gik mod vinden. Duften kunne blive stærkere mod den virtuelle kilde, forblive konstant eller blive svagere. Fluerne fulgte lignende baner i alle tre tilfælde. En enkel regel som »fortsæt derhen, hvor duften bliver stærkere« kan derfor

ikke forklare kantsporing i dette apparat.

Derefter gjorde de korridorens **sidekant** blødere med en Gauss-profil, hvor koncentrationen ændrede sig gradvist i stedet for brat. Fluerne samlede sig nær flanken, hvor koncentrationen ændrede sig hurtigst, ikke i midten, hvor duften var stærkest. Det relevante signal var derfor den tværgående ændring, som markerede en effektiv grænse, ikke en nødvendig stigning mod kilden langs korridoren.

Det betyder ikke, at koncentrationsgradienter aldrig har betydning i naturen. Det betyder, at en stigning mod kilden ikke var nødvendig for denne adfærd under de afprøvede forhold.

Forskerne ændrede også korridorens orientering. Separate grupper fulgte korridorer på 0, 45 og 90 grader, og en anden gruppe mødte en korridor, der sprang sidelæns efter udgange. Grupperne bestod af henholdsvis 40, 21, 20 og 24 fluer. Banerne uden for korridoren ændrede sig med geometrien. En generel regel som »vend altid mod vinden« kan ikke forklare denne fleksibilitet.

I dette setup nåede duften de to antenner med omtrent to millisekunders mellemrum. Bilateral optogenetisk aktivering kombineret med vind kunne frembringe et kantsporingslignende mønster. **Optogenetik** bruger lysfølsomme proteiner til at ændre udvalgte celler. Her antyder resultatet, at en forskel i duftens ankomst mellem venstre og højre side ikke var nødvendig for denne adfærd. Det gør ikke bilateral sammenligning irrelevant for frit bevægende dyr i andre duftfaner.

En vektor er mindre end et kort

En **vektor** er en retning sammen med en størrelse. Den nyttige lagrede størrelse her var hovedsagelig retningsbestemt: Hvilken vej bør fluen dreje for at nå kanten af duftfanen? Studiet fandt ikke evidens for, at fluen lagrede en fuldstændig udformning af fanen eller sin egen position i den.

Forfatterne lavede først kunstige baner ved at blande bestanddelene af virkelige fluebevægelser. De trak observerede løbelængder og drejevinkler tilfældigt og syede dem sammen. Nogle af disse syntetiske vandrere ramte til sidst duftgrænsen igen, men de vandrede længere og fulgte mindre direkte ruter end virkelige fluer. Selv da fluens sædvanlige tendens til at dreje mod vinden blev tilføjet, gengav modellen ikke de korte, målrettede returer. Den virkelige adfærd indeholdt derfor mere retningsinformation end en tilfældig blanding af de samme bevægelser.

Derefter byggede forskerne en model med to tilstande: **forlad grænsen** og **vend tilbage til grænsen**. Tilstandene var ikke etiketter for hvert øjeblik inde i eller uden for duften. De var alternative styringsregler, som kunne skifte, mens fluen bevægede sig.

Hver grænsekrydsning gav modellen en retning at huske. Ved udgang opdaterede den en retning, der blev brugt, mens grænsen blev forladt. Ved indgang opdaterede den en særskilt returretning: i praksis »da jeg fandt grænsen, bevægede jeg mig denne vej«. Under en senere retur påvirkede den huskede retning den simulerede flue tilbage mod kanten.

Forskerne tilpassede modellen til baner fra korridorerne på 0, 45 og 90 grader. I hovedsammenligningen gav 72 virkelige fluer og 75 simuleringer lignende banestatistik. Da den returretning, der blev lært

ved indgang, blev fjernet, blev sporingen mindre effektiv i alle korridororienteringer. Det støtter nytten af en hukommelse om indgangsretningen; det beviser ikke, at fluehjernen bogstaveligt talt kører modellens ligninger.

> **Hvad betyder »hukommelse« i denne artikel?**
>
> Forskerne aflæste ikke en lagret pil direkte i fluens hjerne. »Retningshukommelse« er en slutning, som støttes af adfærd, en model og neurale målinger. Modellen viser, at nogle få skiftende retninger kan gengive vigtige banestatistikker. Den beviser ikke, at fluen bogstaveligt implementerer ligningerne, eller at én navngiven neurongruppe er lagringsstedet.

En ekstra eksponering for et 45-graderssegment orienteret i modsat retning forskød senere adfærd hos 10 fluer, sammenlignet med 29 modelsimuleringer. Det gør retningsforklaringen mere specifik end en efterfølgende tilpasset beskrivelse, men den forbliver en modelbaseret fortolkning.

En kursreference og et aktuelt mål

Studiet målte og forstyrrede derefter aktivitet i fluens **centralkompleks**, et hjerneområde, der er involveret i navigation.

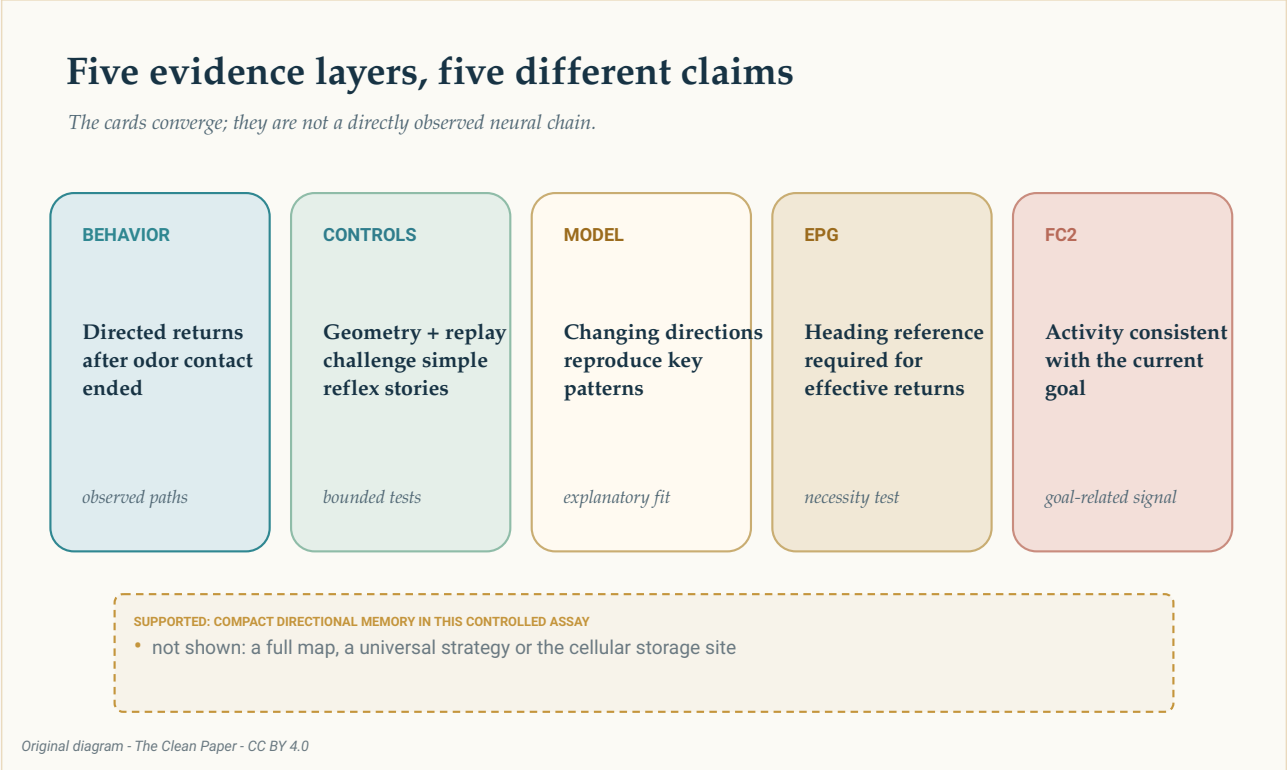
> **To signaler med forskellige opgaver**
>
> EPG og FC2 er navnene på to neuronpopulationer i centralkomplekset. EPG-aktivitet fungerer som en kompasaflæsning: Den følger den retning, fluen vender i forhold til vinden. FC2-aktivitet er knyttet til den retning, fluen forsøger at bevæge sig i. Et nedstrøms styrekredsløb kan sammenligne den aktuelle kurs med målet. Studiet tester begge populationer, men viser ikke, at én af dem alene lagrer hele hukommelsen.

EPG-neuroner bærer et kurssignal: Aktivitetsmønstret følger den retning, fluen vender i forhold til et ydre signal. Med calciumafbildning, en indirekte optisk aflæsning af neural aktivitet, fandt forskerne, at fasen i EPG-aktiviteten fulgte kursen i forhold til vinden under kantsporing. Analysen brugte 16 forsøg fra 9 fluer.

For at hæmme EPG-neuronerne genmodificerede forskerne dem til at udtrykke **GtACR1**, en anionkanal, der aktiveres af grønt lys. En LED var tændt gennem hele testforsøget, aktiverede kanalen og undertrykte de udvalgte neuroner; den samme belysning svækkede ikke genetiske kontrolfluer.

Da EPG-neuronerne blev hæmmet på denne måde, gennemførte 12 forsøgsfluer mindre effektive målrettede returer end 6 genetiske kontrolfluer. Den afgrænsede konklusion er, at kursreferencen i EPG-aktiviteten var nødvendig for effektiv kantsporing under de afprøvede forhold. Det er ikke bevis for, at EPG-neuroner alene lagrede retningen mod grænsen.

FC2-neuroner viste et andet forhold. Populationsaktiviteten var knyttet til det aktuelle navigationsmål og pegede mod kanten af duftfanen før sving i forsøget. Afbildningen brugte 6 fluer, og sammenligningerne med hæmning brugte grupper på 9 til 14 fluer afhængigt af analysen. Hæmning svækkede kantsporingen.



Adfærd, ændret duftgeometri, en tilpasset model og to neurale forstyrrelser støtter forskellige dele af forklaringen med retningshukommelse. Tilsammen støtter de en kompakt målretning i dette kontrollerede forsøg, ikke et fuldstændigt kort eller et bevist lagringssted på celleniveau.

The Clean Paper CC BY 4.0

Dette er konvergerende evidens, ikke en fotograferet årsagskæde. EPG-aktiviteten gav en nødvendig kursreference. FC2-aktiviteten var forenelig med en målretning og var nødvendig for effektiv adfærd. Forsøgene lokaliserede ikke ét enkelt »engram« for hukommelsen og beviste ikke, at FC2-synapser fysisk lagrede retningen.

Som en grov analogi i menneskelig skala: Forestil dig, at du går ud af en smal tågebanke, mens en stabil vind stadig fortæller dig, hvor nord er. Et kompas kan vise, hvilken vej du vender, men for at vende tilbage til tågen har du også brug for en husket kurs mod kanten. Ved at sammenligne den aktuelle kurs med den ønskede kurs ved du, hvilken vej du skal dreje. Det er denne arbejdsdeling, der antydes mellem EPG- og FC2-signalerne. Det er en forklarende analogi, ikke bevis for, at mennesker bruger de samme celler eller den samme algoritme.

Hukommelsen afhang af handling, ikke kun tidspunktet for duften

I et afspilningsforsøg fik fluerne den samme sekvens af dufttidspunkter som før, men tidspunktet var koblet fra det, de gjorde netop da. Den indlærte retningsskævhed blev svagere gennem afspilningssekvenserne. Det støtter en **operant**, handlingskoblet opdatering: Det vigtige var ikke blot passiv eksponering for en duftsekvens, men forholdet mellem duften og fluens bevægelser.

Nævneren ændrer sig mellem disse analyser. Paneler i de udvidede data omfatter 8 eller 9 fluer afhængigt af sammenligningen; serien med successive sekvenser bruger 8 fluer; banepanelerne kræver mindst 10 effektive indgange; og de parrede modelpaneler bruger 21 simulerede baner, som også opfylder denne indgangstærskel. Det er ikke én samlet stikprøve på otte.

En mere uregelmæssig duftfane var nyttig, men stadig virtuel

Forskerne afspillede også en tidligere registreret, mere uregelmæssig duftfane. De skalerede den fem gange i rum og tid, så fastspændte fluer kunne møde den ofte nok. **Ti ud af 12 fluer** kom inden for 50 virtuelle millimeter fra kilden.

Det er ikke ti fluer, der fandt en virkelig kilde i fri luft. Det er præstation i en kontrolleret afspilning af en naturalistisk duftfane.

For hver dynamisk fanetype genererede modellen 2.000 baner. Sammenligningen med den skalerede fane analyserede 1.850 af de 2.000 efter krav om en effektiv indgang og udelukkelse af baner, der begyndte for tæt på kilden. Hukommelsen hjalp mere nær kilden, hvor successive møder bevarede en sammenhængende retningsstruktur, og mindre i det mere turbulente område længere nede ad vinden.

Forbeholdet er en del af resultatet. En kompakt retning kan kun hjælpe, når verden forbliver sammenhængende nok til, at et tidligere møde fortæller noget nyttigt om det næste.

Hvad studiet ikke viser

- Det viser **ikke**, at en flue bygger et fuldstændigt rumligt kort.
- Det viser **ikke** fri flyvning gennem en uændret naturlig duftfane.
- Det fastslår **ikke**, at al duftstyret navigation bruger denne strategi.
- Det viser **ikke**, at EPG- eller FC2-neuroner er det eneste fysiske lagringssted for hukommelsen.
- Det gør **ikke** den tilpassede model til fluens bogstavelige biologiske algoritme.
- Det kan **ikke** overføres direkte til menneskelig navigation.

Studiet er stærkest dér, hvor det er mest specifikt. Kontrol i lukket kredsløb gav forskerne præcis adgang til hvert duftmøde. Ændret geometri, afspilning, modellering, calciumafbildning og hæmning testede derefter forskellige dele af én forklaring. Men adfærds-, afbildnings- og hæmningskohorterne var adskilte; stikprøvestørrelserne var ikke fastlagt på forhånd; dataindsamling og analyse var hverken randomiseret eller blindet; og færre end 10 procent af de fastspændte fluer blev udelukket på grund af tilvænnings-, respons- eller sporingsproblemer.

Disse begrænsninger fjerner ikke fænomenet. De definerer det.

Kort fortalt

Fastspændte bananfluer, der gik gennem en virtuel duftkorridor, vendte gentagne gange tilbage til en grænse, efter at de havde forladt duften. Ændringer i koncentration og korridorgeometri, en tilpasset skiftemodel, neural afbildning og optogenetisk hæmning støtter en forklaring, hvor fluen bruger en kompakt husket retning frem for et fuldstændigt kort. EPG-neuroner gav en nødvendig kursreference, mens FC2-aktivitet var forenelig med den aktuelle målretning. Resultatet er begrænset til et kontrolleret gangforsøg; det identificerer ikke hukommelsens lagringssted på celleniveau og viser ikke den samme beregning under fri naturlig flyvning.

Nøgtern vurdering

Hvad artiklen viser: I et fastspændt forsøg med lukket kredsløb gennemførte fluer målrettede returer til virtuelle duftgrænser, som de ikke længere kunne sanse. Flere adfærdskontroller, modellering og neurale forstyrrelser støtter en vektorbaseret strategi.

Hvad der er udledt: At adfærden bruger en kompakt retningshukommelse, og at FC2-populationsaktivitet repræsenterer et aktuelt navigationsmål. Hukommelsesindholdet blev ikke aflæst direkte.

Hvad den ikke viser: Et fuldstændigt mentalt kort, en universel duftstrategi, fri flyvning i en naturlig duftfane, ét enkelt lagringssted for hukommelsen eller en menneskelig analog.

Vigtigste begrænsninger: Én art og ét kontrolleret apparat; forskellige fluekohorter og analyseenheder mellem forsøgene; indirekte calciumsignaler; nødvendighedstest, der ikke beviser tilstrækkelighed; og en naturalistisk duftfane, som blev afspillet og skaleret.

Hvor stor tillid bør en almindelig læser have? Høj tillid til, at det målrettede returfænomen er reelt i dette apparat, og at kurs- og målrelateret aktivitet i centralkomplekset har betydning. Moderat tillid til modellen som en kompakt forklaring. Lav tillid til enhver påstand, der overfører den uændret til det fri eller kalder den et fuldstændigt kort.

Kilder

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