The Clean Paper

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

En flue kan miste en lukt og likevel snu tilbake. I en virtuell luktstripe hjalp en husket retning

Fastspente bananfluer vendte gjentatte ganger tilbake til en luktgrense etter å ha gått ut i ren luft. Atferd, modellering og nevrale forstyrrelser støtter et kompakt retningsminne, ikke et fullstendig kart. Resultatet kommer fra en kontrollert virtuell virkelighetstest og viser ennå ikke den samme strategien under fri, naturlig flyging.

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 lukten og likevel snu tilbake mot den

Fluen hadde lagt lukten bak seg.

Den fortsatte å gå gjennom ren luft, noen ganger i titalls sekunder og flere hundre virtuelle millimeter. Så snudde den mot grensen den hadde krysset og fant lukten igjen. På det tidspunktet kunne ikke selve lukten vise veien tilbake.

Dette er den sentrale observasjonen i en ny Nature-studie av navigasjon hos bananfluer. Forskerne argumenterer for at fluene brukte et kompakt minne om retning: ikke et kart over hele luktfanen og ikke et minne om tilbakelagt avstand, men en husket kurs mot en grense som ikke lenger kunne sanses.

Resultatet er slående fordi det viser hvor lite lagret informasjon som kan være nok. Det er også lett å overdrive. Disse fluene fløy ikke fritt gjennom et naturlig landskap. De gikk fastspent på en luftbåret kule inne i en strengt kontrollert virtuell verden. Studien støtter en vektorbasert strategi i dette apparatet; den viser ikke at fluer bygger mentale kart, forklarer ikke alle måter dyr følger lukter på, og identifiserer ikke cellene der et minne fysisk lagres.

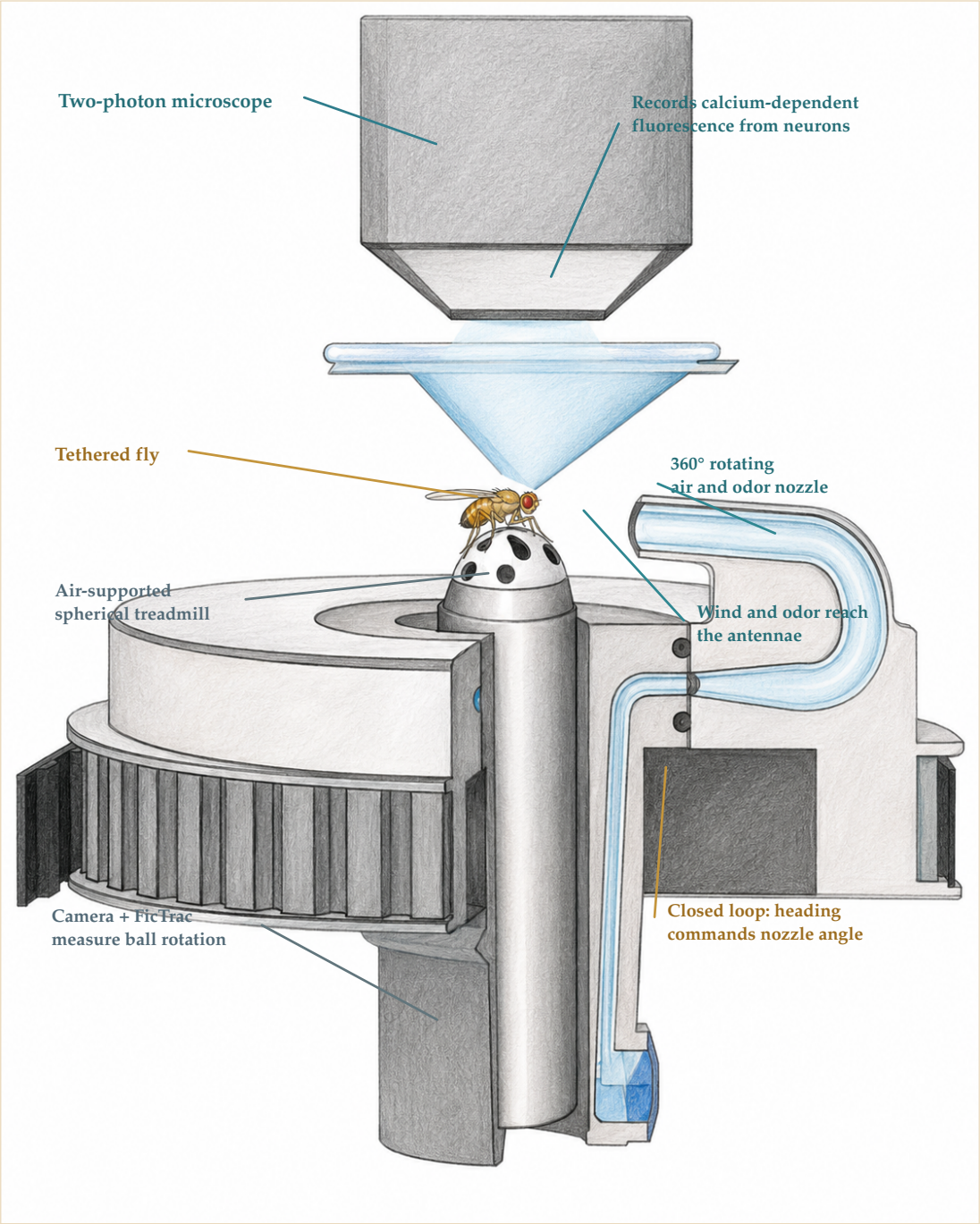
Den usynlige korridoren ble laget av programvare

En luktfane er området med lukt som bæres av luft. Utendørs bøyer, brytes og kobles en fane sammen igjen når vinden endrer seg. Det gjør det vanskelig å vite nøyaktig hva et dyr luktet i hvert øyeblikk.

Forskerne gjorde problemet kontrollerbart med **virtuell virkelighet i lukket sløyfe**. Fluens kropp var fastspent over en lett kule som fløt på luft. Mens fluen gikk, målte et kamera kulens rotasjon omtrent 60 ganger per sekund. Programvaren oversatte rotasjonen til en virtuell todimensjonal posisjon og kurs.

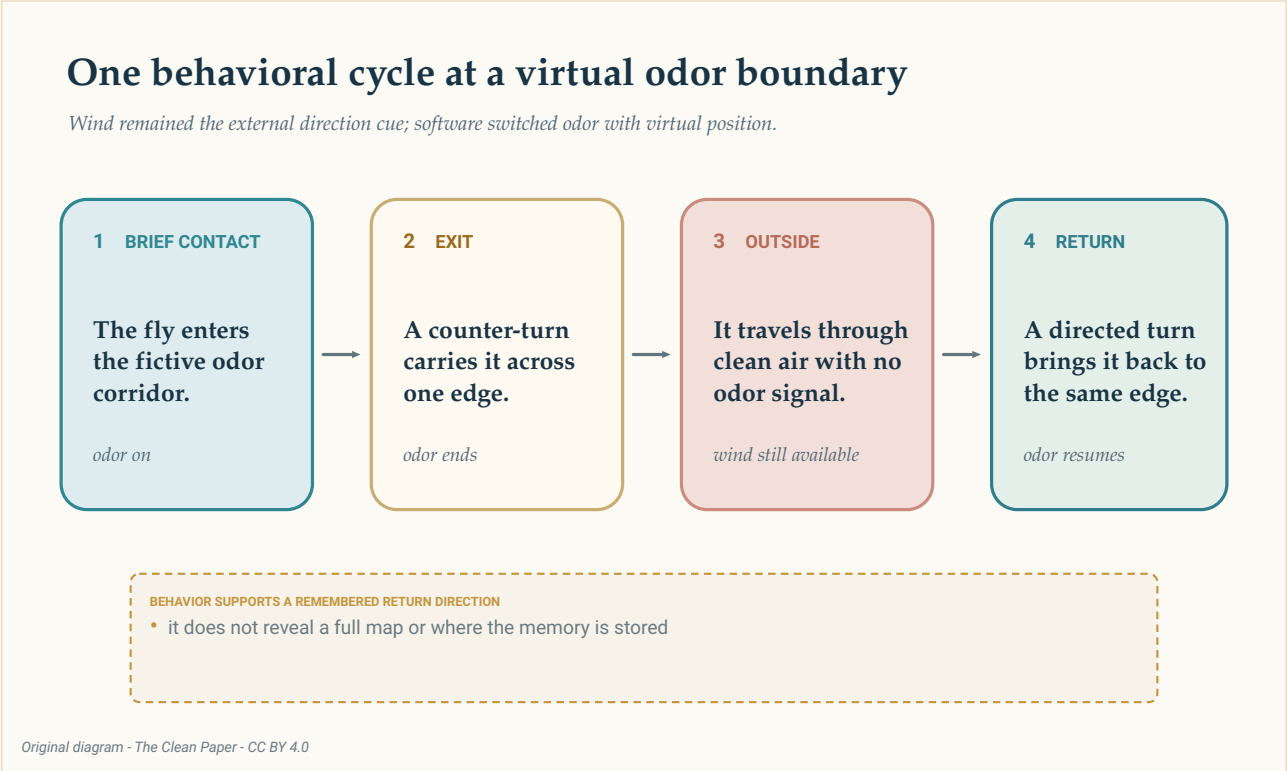
Denne kursen styrte en motorisert dyse som kunne rotere 360 grader. Når fluen endret sin virtuelle retning, flyttet dysen seg rundt den slik at vinden forble justert mot en stabil retning i fluens virtuelle verden. Samtidig endret massestrømningskontrollere hvor mye ren luft eller lukt av eplecidereddik som nådde antennene, ut fra fluens virtuelle posisjon. Kryssing av en programvaredefinert grense slo dermed lukten av eller på og skapte en tenkt korridor som var 50 millimeter bred og én meter lang, selv om fluen aldri forlot kulen.

Apparatet produserte en synkronisert registrering av fluens virtuelle posisjon, kurs, lukttilstand og luftstrømkontroller ved hvert tidspunkt. Fra denne registreringen rekonstruerte forskerne banene, merket hver inn- og utgang og målte hvor direkte fluen vendte tilbake. Vinden ga det ytre retningssignalet; fluens egne bevegelser avgjorde når den møtte hver side av den virtuelle luktgrensen.



Fluen var fastspent over en luftbåret kule. Et kamera og FicTrac omgjorde kulens rotasjon til virtuell bevegelse og kurs; programvaren roterte deretter luft- og luktdysen og slo lukten av eller på etter den virtuelle posisjonen. Under separate forsøk med nevral avbildning registrerte tofotonmikroskopet over fluen kalsiumavhengig fluorescens fra EPG- eller FC2-nevroner, slik at nevral aktivitet kunne justeres mot atferden. Mikroskopet var ikke nødvendig i hvert atferdsforsøk.

The Clean Paper CC BY 4.0



I den kontrollerte analysen gikk en flue kort inn i den virtuelle luktkorridoren, forlot den, beveget seg gjennom luktfri luft og vendte målrettet tilbake. Atferden støtter et husket retursignal, men avslører ikke hvor informasjonen lagres.

The Clean Paper CC BY 4.0

I hovedforsøket med **vertikal korridor** gikk **40 fluer** gjentatte ganger inn i lukten, motsnudde seg ut av den og vendte tilbake til samme kant. «Vertikal» er artikkelens navn på 0-gradersgeometrien: Korridorens lengdeakse lå parallelt med retningen mot vinden. Det betyr ikke at apparatet sto på høykant.

Forfatterne kaller mønsteret **kantsporing**. En **sekvens** er én sammenhengende episode mellom grensekryssinger: En innvendig sekvens går fra innpassering til utgang, og en utvendig sekvens fra utgang til fluen vender tilbake. I 755 innvendige sekvenser varte et besøk i gjennomsnitt 4,9 sekunder. Under returen var gjennomsnittlig avstand fra grensen 10,4 millimeter. Færre enn 4 prosent av 793 sekvenser krysset helt over til korridorens motsatte kant.

De to siste tallene beskriver sekvenser, ikke hundrevis av uavhengige fluer. Skillet er viktig fordi ett dyr kan bidra med mange sekvenser.

Returene var ikke bare en fast refleks mot vinden

Flere forsøk testet enklere forklaringer.

Forskerne endret først det som skjedde **langs** korridoren mens en flue gikk mot vinden. Lukten kunne bli sterkere mot den virtuelle kilden, forbli konstant eller bli svakere. Fluene fulgte lignende baner

i alle tre tilfellene. En enkel regel som «fortsett dit lukten blir sterkere» kan derfor ikke forklare kantsporing i dette apparatet.

Deretter gjorde de korridorens **sidekant** mykere med en Gauss-profil, der konsentrasjonen endret seg gradvis i stedet for å skifte brått. Fluene samlet seg nær flanken der konsentrasjonen endret seg raskest, ikke i sentrum der lukten var sterkest. Det relevante signalet var derfor den sideveis endringen som markerte en effektiv grense, ikke en nødvendig økning mot kilden langs korridoren.

Dette betyr ikke at konsentrasjonsgradienter aldri har betydning i naturen. Det betyr at en økning mot kilden ikke var nødvendig for denne atferden under de testede forholdene.

Forskerne endret også korridorens orientering. Separate grupper fulgte korridorer på 0, 45 og 90 grader, og en annen gruppe møtte en korridor som hoppet sidelengs etter utganger. Gruppene besto av henholdsvis 40, 21, 20 og 24 fluer. Banene utenfor korridoren endret seg med geometrien. En generell regel som «snu alltid mot vinden» kan ikke forklare denne fleksibiliteten.

I dette oppsettet nådde lukten de to antennene med omtrent to millisekunders mellomrom. Bilateral optogenetisk aktivering kombinert med vind kunne frembringe et kantsporingslignende mønster. **Optogenetikk** bruker lysfølsomme proteiner til å endre utvalgte celler. Her antyder resultatet at en forskjell i luktankomst mellom venstre og høyre side ikke var nødvendig for denne atferden. Det gjør ikke bilateral sammenligning irrelevant for fritt bevegelige dyr i andre luktfaner.

En vektor er mindre enn et kart

En **vektor** er en retning sammen med en størrelse. Den nyttige lagrede størrelsen her var hovedsakelig retningsbestemt: Hvilken vei bør fluen snu for å nå kanten av luktfanen? Studien fant ikke bevis på at fluen lagret en fullstendig utforming av fanen eller sin egen posisjon i den.

Forfatterne laget først kunstige baner ved å stokke om på bestanddelene i virkelige fluebevegelser. De trakk observerte løpelengder og svingvinkler tilfeldig og sydde dem sammen. Noen av disse syntetiske vandrerne traff til slutt luktgrensen igjen, men de vandret lenger og fulgte mindre direkte ruter enn virkelige fluer. Selv når fluens vanlige tendens til å snu mot vinden ble lagt til, gjenga modellen ikke de korte, målrettede returene. Den virkelige atferden inneholdt derfor mer retningsinformasjon enn en tilfeldig blanding av de samme bevegelsene.

Deretter bygde forskerne en modell med to moduser: **forlat grensen** og **vend tilbake til grensen**. Modusene var ikke merkelapper for hvert øyeblikk innenfor eller utenfor lukten. De var alternative styringsregler som kunne bytte mens fluen beveget seg.

Hver grensekryssing ga modellen en retning å huske. Ved utgang oppdaterte den en retning som ble brukt mens grensen ble forlatt. Ved inngang oppdaterte den en separat returretning: i praksis «da jeg fant grensen, beveget jeg meg denne veien». Under en senere retur påvirket den huskede retningen den simulerte fluen tilbake mot kanten.

Forskerne tilpasset modellen til baner fra korridorene på 0, 45 og 90 grader. I hovedsammenligningen ga 72 virkelige fluer og 75 simuleringer lignende banestatistikk. Da returretningen som ble lært ved

inngang, ble fjernet, ble sporingen mindre effektiv i alle korridororienteringer. Dette støtter nytten av et minne om inngangsretningen; det beviser ikke at fluehjernen bokstavelig talt kjører modellens ligninger.

> **Hva betyr «minne» i denne artikkelen?**
>
> Forskerne leste ikke en lagret pil direkte ut av fluens hjerne. «Retningsminne» er en slutning støttet av atferd, en modell og nevralmålinger. Modellen viser at noen få skiftende retninger kan gjengi viktige banestatistikker. Den beviser ikke at fluen bokstavelig implementerer ligningene, eller at én navngitt nevrongruppe er lagringsstedet.

En ekstra erfaring med et 45-graderssegment orientert motsatt vei forskjøv senere atferd hos 10 fluer, sammenlignet med 29 modellsimuleringer. Dette gjør retningsforklaringen mer spesifikk enn en etterpåtilpasset beskrivelse, men den forblir en modellbasert tolkning.

En kursreferanse og et gjeldende mål

Studien målte og forstyrret deretter aktivitet i fluens **sentralkompleks**, et hjerneområde som er involvert i navigasjon.

> **To signaler med ulike oppgaver**
>
> EPG og FC2 er navn på to nevronpopulasjoner i sentralkomplekset. EPG-aktivitet virker som en kompassavlesning: Den følger retningen fluen vender i forhold til vinden. FC2-aktivitet er knyttet til retningen fluen forsøker å bevege seg i. En nedstrøms styrekrets kan sammenligne gjeldende kurs med målet. Studien tester begge populasjonene, men viser ikke at én av dem alene lagrer hele minnet.

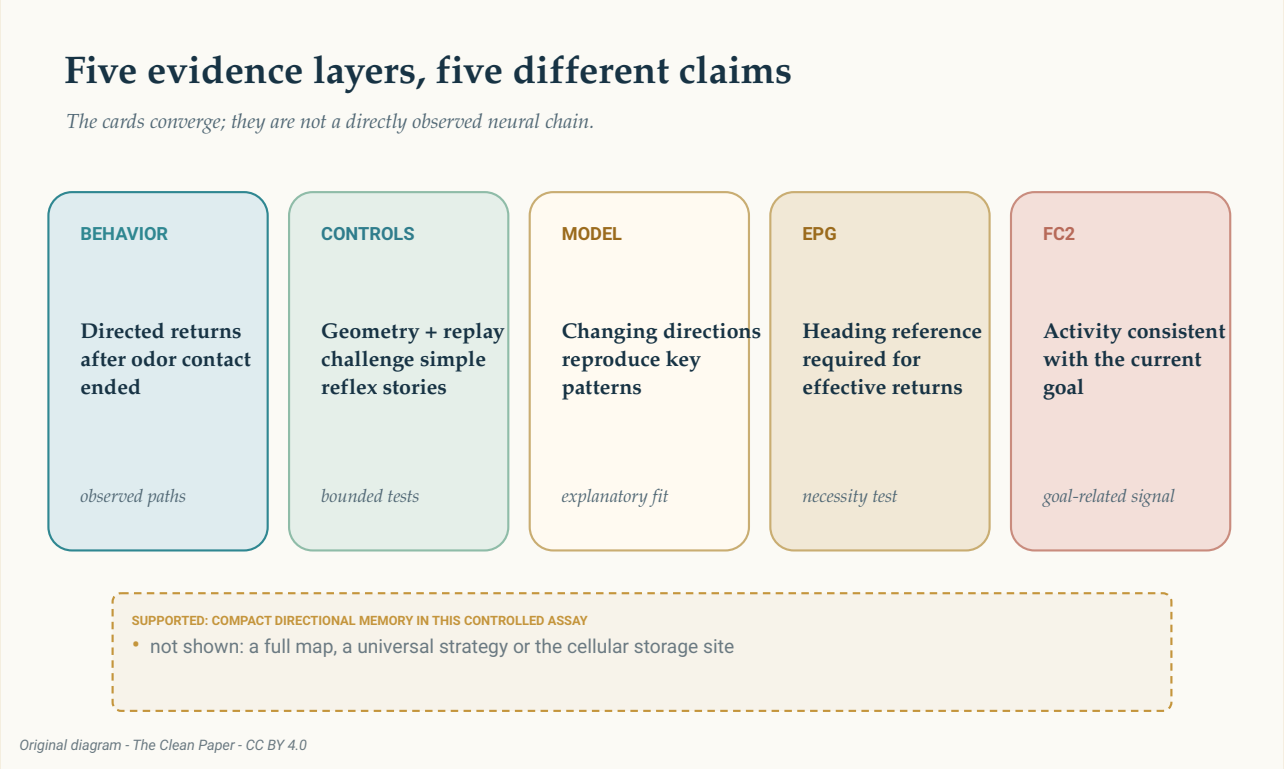
EPG-nevroner bærer et kurssignal: Aktivitetsmønsteret følger retningen fluen vender i forhold til et ytre signal. Med kalsiumavbildning, en indirekte optisk avlesning av nevral aktivitet, fant forskerne at fasen i EPG-aktiviteten fulgte kursen i forhold til vinden under kantsporing. Analysen brukte 16 forsøk fra 9 fluer.

For å hemme EPG-nevronene genmodifiserte forskerne dem til å uttrykke **GtACR1**, en anionkanal som slås på av grønt lys. En LED var på gjennom hele testforsøket, aktiverte kanalen og undertrykte de utvalgte nevronene; samme belysning svekket ikke genetiske kontrollfluer.

Da EPG-nevronene ble hemmet på denne måten, gjennomførte 12 forsøksfluer mindre effektive målrettede returer enn 6 genetiske kontrollfluer. Den avgrensede konklusjonen er at kursreferansen i EPG-aktiviteten var nødvendig for effektiv kantsporing under de testede forholdene. Det er ikke bevis på at EPG-nevroner alene lagret retningen mot grensen.

FC2-nevroner viste et annet forhold. Populasjonsaktiviteten var knyttet til det aktuelle navigasjon-

smålet og pekte mot kanten av luktfanen før svinger i forsøket. Avbildningen brukte 6 fluer, og sammenligningene med hemming brukte grupper på 9 til 14 fluer avhengig av analysen. Hemming svekket kantsporingen.



Atferd, endret luktgeometri, en tilpasset modell og to nevrale forstyrrelser støtter ulike deler av forklaringen med retningsminne. Samlet støtter de en kompakt målretning i dette kontrollerte forsøket, ikke et fullstendig kart eller et bevist lagringssted på cellenivå.

The Clean Paper CC BY 4.0

Dette er konvergerende bevis, ikke en fotografert årsakskjede. EPG-aktiviteten ga en nødvendig kursreferanse. FC2-aktiviteten var forenlig med en målretning og var nødvendig for effektiv atferd. Forsøkene lokaliserte ikke ett enkelt «engram» for minnet og beviste ikke at FC2-synapser fysisk lagret retningen.

Som en grov analogi på menneskelig skala: Tenk deg at du går ut av en smal tåkebanke mens en jevn vind fortsatt forteller deg hvor nord er. Et kompass kan vise hvilken vei du vender, men for å vende tilbake til tåken trenger du også en husket kurs mot kanten. Ved å sammenligne gjeldende kurs med ønsket kurs vet du hvilken vei du skal snu. Det er denne arbeidsdelingen som antydes mellom EPG- og FC2-signalene. Det er en forklarende analogi, ikke bevis på at mennesker bruker de samme cellene eller den samme algoritmen.

Minnet var avhengig av handling, ikke bare tidspunktet for lukten

I et avspillingsforsøk fikk fluene den samme sekvensen av lukttidspunkter som før, men tidspunktet var koblet fra det de gjorde akkurat da. Den innlærte retningsskjevheten ble svakere gjennom avspillingssekvensene. Dette støtter en **operant**, handlingskoblet oppdatering: Det viktige var ikke bare passiv eksponering for en luktsekvens, men forholdet mellom lukten og fluens bevegelser.

Nevneren endrer seg mellom disse analysene. Paneler i utvidede data omfatter 8 eller 9 fluer avhengig av sammenligningen; serien med påfølgende sekvenser bruker 8 fluer; banepanelene krever minst 10 effektive innganger; og de parede modellpanelene bruker 21 simulerte baner som også oppfyller denne inngangsterskelen. Dette er ikke ett samlet utvalg på åtte.

En mer uregelmessig luktfane var nyttig, men fortsatt virtuell

Forskerne spilte også av en tidligere registrert, mer uregelmessig luktfane. De skalerte den fem ganger i rom og tid slik at fastspente fluer kunne møte den ofte nok. **Ti av 12 fluer** kom innenfor 50 virtuelle millimeter fra kilden.

Dette er ikke ti fluer som fant en virkelig kilde i fri luft. Det er ytelse i en kontrollert avspilling av en naturalistisk luktfane.

For hver dynamiske fanetype genererte modellen 2 000 baner. Sammenligningen med den skalerte fanen analyserte 1 850 av de 2 000 etter krav om en effektiv inngang og utelukkelse av baner som begynte for nær kilden. Minnet hjalp mer nær kilden, der påfølgende møter beholdt en sammenhengende retningsstruktur, og mindre i det mer turbulente området lenger med vinden.

Forbeholdet er en del av resultatet. En kompakt retning kan bare hjelpe når verden forblir sammenhengende nok til at et tidligere møte sier noe nyttig om det neste.

Hva studien ikke viser

- Den viser **ikke** at en flue bygger et fullstendig romlig kart.
- Den viser **ikke** fri flyging gjennom en uendret naturlig luktfane.
- Den fastslår **ikke** at all luktstyrt navigasjon bruker denne strategien.
- Den viser **ikke** at EPG- eller FC2-nevroner er det eneste fysiske lagringsstedet for minnet.
- Den gjør **ikke** den tilpassede modellen til fluens bokstavelige biologiske algoritme.
- Den kan **ikke** overføres direkte til menneskelig navigasjon.

Studien er sterkest der den er mest spesifikk. Kontroll i lukket sløyfe ga forskerne presis tilgang til hvert luktmøte. Endret geometri, avspilling, modellering, kalsiumavbildning og hemming testet deretter ulike deler av én forklaring. Men atferds-, avbildnings- og hemmingskohortene var separate; utvalgsstørrelsene var ikke forhåndsbestemt; datainnsamling og analyse var verken randomisert eller blindet; og færre enn 10 prosent av de fastspente fluene ble ekskludert på grunn av tilvennings-, respons- eller sporingsproblemer.

Disse begrensningene fjerner ikke fenomenet. De definerer det.

Kort oppsummert

Fastspente bananfluer som gikk gjennom en virtuell luktkorridor, vendte gjentatte ganger tilbake til en grense etter å ha forlatt lukten. Endringer i konsentrasjon og korridorgeometri, en tilpasset vekslemodell, nevral avbildning og optogenetisk hemming støtter en forklaring der fluen bruker en kompakt husket retning fremfor et fullstendig kart. EPG-nevroner ga en nødvendig kursreferanse, mens FC2-aktivitet var forenlig med den aktuelle målretningen. Resultatet er begrenset til et kontrollert gåforsøk; det identifiserer ikke minnets lagringssted på cellenivå og viser ikke den samme beregningen i fri naturlig flyging.

Nøktern vurdering

Hva artikkelen viser: I et fastspent forsøk med lukket sløyfe gjennomførte fluer målrettede returer til virtuelle luktgrenser de ikke lenger kunne sanse. Flere atferdskontroller, modellering og nevrale forstyrrelser støtter en vektorbasert strategi.

Hva som er utledet: At atferden bruker et kompakt retningsminne, og at FC2-populasjonsaktivitet representerer et aktuelt navigasjonsmål. Minneinnholdet ble ikke lest direkte.

Hva den ikke viser: Et fullstendig mentalt kart, en universell luktstrategi, fri flyging i en naturlig luktfane, ett enkelt lagringssted for minnet eller en menneskelig analog.

Viktigste begrensninger: Én art og ett kontrollert apparat; ulike fluekohorter og analyseenheter mellom forsøkene; indirekte kalsiumsignaler; nødvendighetstester som ikke beviser tilstrekkelighet; og en naturalistisk luktfane som ble avspilt og skalert.

Hvor stor tillit bør en vanlig leser ha? Høy tillit til at det målrettede returfenomenet er reelt i dette apparatet, og at kurs- og målrelatert aktivitet i sentralkomplekset betyr noe. Moderat tillit til modellen som en kompakt forklaring. Lav tillit til enhver påstand som overfører den uendret til friluft eller kaller den et fullstendig kart.

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