The Clean Paper

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

Egy légy elveszítheti a szagot, mégis vissza tud fordulni. Egy virtuális szagfelhőben egy megjegyzett irány segített

Rögzített muslicák ismételten visszatértek egy szaghatárhoz, miután tiszta levegőbe gyalogoltak. A viselkedés, a modellezés és az idegi beavatkozások egy tömör iránymemóriát támogatnak, nem teljes térképet. Az eredmény kontrollált virtuálisvalóság-vizsgálatból származik, és még nem mutatja ugyanazt a stratégiát szabad, természetes repülésben.

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

Egy légy elveszítheti a szagot, mégis vissza tud fordulni felé

A légy maga mögött hagyta a szagot.

Tovább gyalogolt tiszta levegőben, néha több tíz másodpercen át és több száz virtuális millimétert. Aztán visszafordult az átlépett határ felé, és újra megtalálta a szagot. Abban a pillanatban maga a szag nem mutathatta meg neki a visszautat.

Ez a központi megfigyelése egy új, a muslicák navigációját vizsgáló Nature-tanulmánynak. A kutatók szerint a legyek egy tömör iránymemóriát használtak: nem a teljes szagfelhő térképét, és nem a megtett távolság emlékét, hanem egy már nem érzékelhető határ felé mutató, megjegyzett irányt.

Az eredmény azért figyelemre méltó, mert megmutatja, milyen kevés tárolt információ is elegendő lehet. Ugyanakkor könnyű túlértelmezni. Ezek a legyek nem repültek szabadon természetes tájban. Rögzítve gyalogoltak egy légpárnán lebegő golyón, szigorúan ellenőrzött virtuális világban. A tanulmány ebben a berendezésben egy vektoralapú stratégiát támogat; nem mutatja, hogy a legyek mentális térképeket építenek, nem magyarázza meg az állatok szagkövetésének minden módját, és nem azonosítja azokat a sejteket, amelyekben az emlék fizikailag tárolódik.

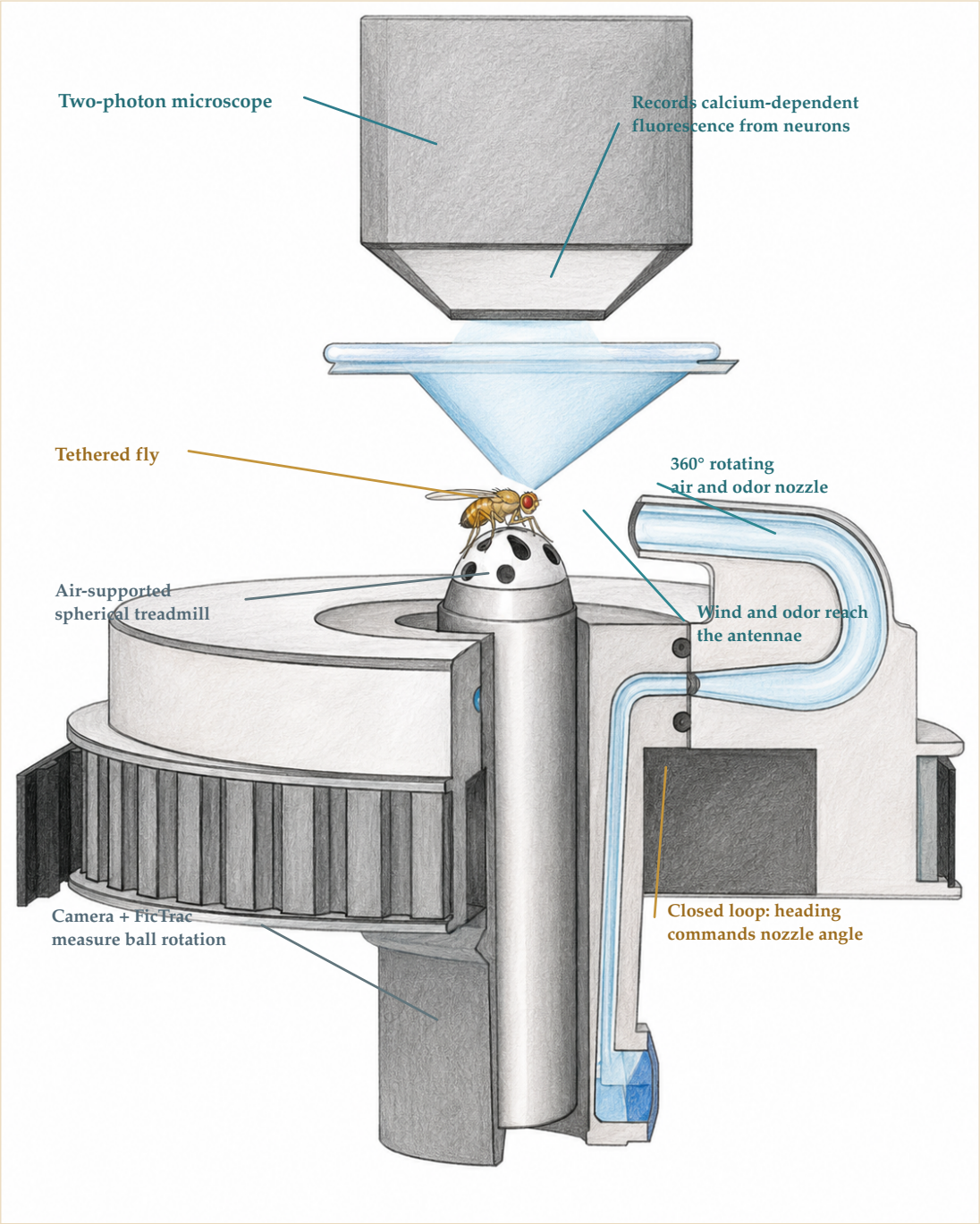
A láthatatlan folyosót szoftver hozta létre

A szagfelhő a levegő által szállított szag mozgó tartománya. A szabadban a felhő a szél változásával meghajlik, szétszakad és újra összeáll. Emiatt nehéz pontosan tudni, mit érzett az állat minden egyes pillanatban.

A kutatók **zárt hurkú virtuális valósággal** tették szabályozhatóvá a problémát. A légy testét egy könnyű, levegőn lebegő golyó fölé rögzítették. Ahogy a légy gyalogolt, egy kamera másodpercenként körülbelül 60-szor mérte a golyó forgását. A szoftver ezt a forgást virtuális kétdimenziós pozícióvá és haladási iránnyá alakította.

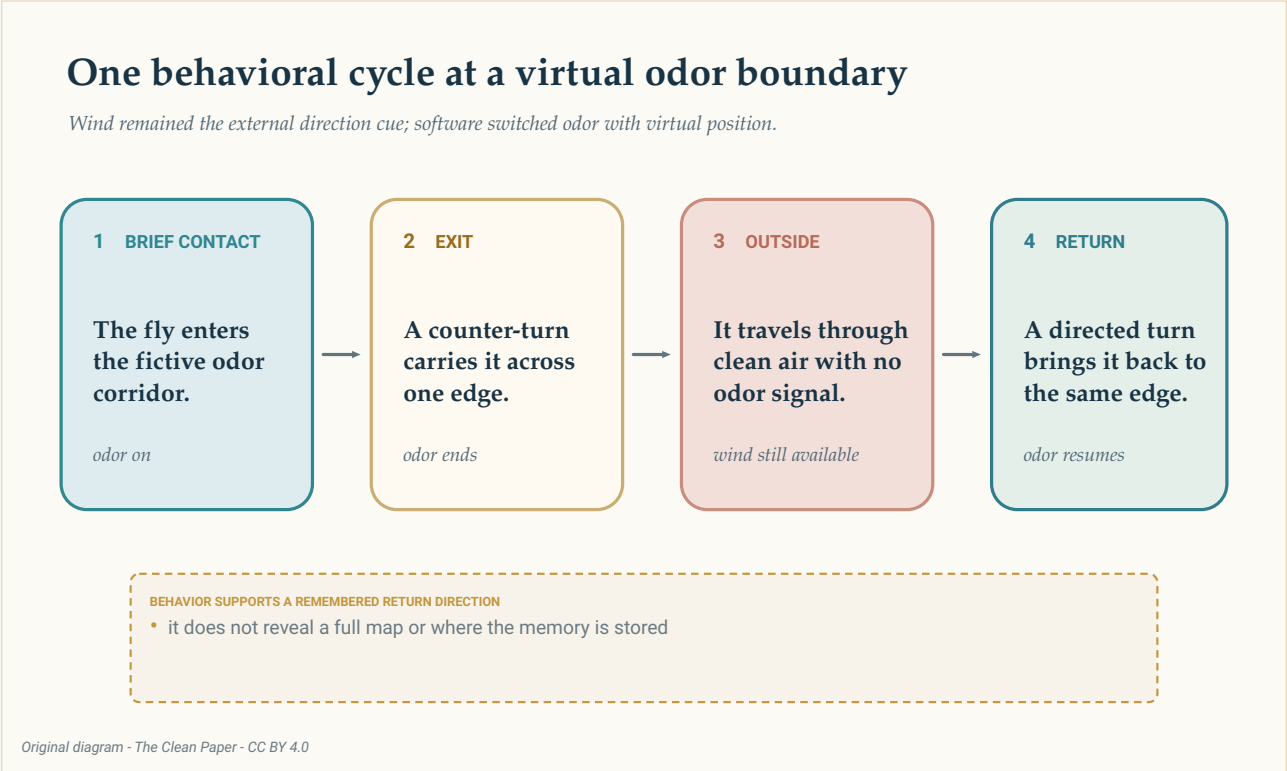
Ez az irány vezérelt egy motoros fúvókát, amely 360 fokban elfordulhatott. Amikor a légy virtuális iránya változott, a fúvóka körülötte mozgott, hogy a szelet a légy virtuális világában egy stabil irányhoz igazítsa. Eközben tömegáram-szabályozók a légy virtuális helyzete alapján változtatták, mennyi tiszta levegő vagy almaecet-szag érje a csápokat. Egy szoftverben meghatározott határ átlépése így be- vagy kikapcsolta a szagot, és egy 50 milliméter széles, egy méter hosszú képzeletbeli folyosót hozott létre, miközben a légy valójában soha nem hagyta el a golyót.

A berendezés minden időpontban szinkronizált feljegyzést készített a légy virtuális helyzetéről, irányáról, a szag állapotáról és a légáramlás vezérléséről. Ebből a kutatók rekonstruálták a pályákat, megjelölték az egyes be- és kilépéseket, és mérték, mennyire közvetlenül tért vissza a légy. A szél adta a külső irányjelet; a légy saját mozgása határozta meg, mikor találkozott a virtuális szaghatár egyik vagy másik oldalával.



A légy egy levegőn lebegő golyó fölött maradt rögzítve. Egy kamera és a FicTrac a golyó forgását virtuális mozgássá és iránnyá alakította; a szoftver ezután elforgatta a levegő- és szagfúvókát, és a virtuális pozíció alapján kapcsolta a szagot. Külön idegi képalkotási kísérletekben a légy fölötti kétfotonos mikroszkóp az EPG- vagy FC2-neuronok kalciumfüggő fluoreszcenciáját rögzítette, így az idegi aktivitást össze lehetett igazítani a viselkedéssel. A mikroszkóp nem volt szükséges minden viselkedési kísérlethez.

The Clean Paper CC BY 4.0



A kontrollált vizsgálatban a légy röviden belépett a virtuális szagfolyosóba, elhagyta azt, szagmentes levegőn haladt át, majd irányítottan visszatért. A viselkedés egy megjegyzett visszatérési irányt támogat; nem mutatja meg, hol tárolódik ez az információ.

The Clean Paper CC BY 4.0

A fő **függőleges folyosós** kísérletben **40 légy** ismételten belépett a szagba, ellenirányú fordulással kilépett belőle, majd ugyanahhoz a szélhez tért vissza. A „függőleges” a tanulmány neve a 0 fokos geometriára: a folyosó hosszú tengelye a széllel szembeni iránnyal párhuzamosan futott. Nem azt jelenti, hogy a berendezés függőlegesen állt.

A szerzők ezt a mintát **határkövetésnek** nevezik. Egy **bout** két határátlépés közötti egybefüggő epizód: a belső bout a belépéstől a kilépésig, a külső bout pedig a kilépéstől a légy visszatéréséig tart. 755 belső bout során egy látogatás átlagosan 4,9 másodpercig tartott. Visszatérés közben a határtól mért átlagos távolság 10,4 milliméter volt. A 793 bout kevesebb mint 4%-a jutott el egészen a folyosó túlsó széléig.

Az utóbbi két szám boutokat ír le, nem több száz egymástól független legyet. Ez azért fontos, mert egyetlen állat sok bouttal járulhat hozzá az adatokhoz.

A visszatérések nem egyszerűen rögzített, széllel szembeni reflexek voltak

Több kísérlet egyszerűbb magyarázatokat tesztelt.

A kutatók először azt változtatták, mi történt **a folyosó mentén**, amikor a légy széllel szemben haladt.

A szag a virtuális forrás felé erősödhetett, állandó maradhatott vagy gyengülhetett. A legyek mindhárom esetben hasonló pályákat jártak be. Ezért egy olyan egyszerű szabály, mint „menj tovább arra, amerre erősödik a szag”, nem magyarázhatja meg a határkövetést ebben a berendezésben.

Ezután a folyosó **oldalsó** szélét Gauss-profillal lágyították, így a koncentráció nem hirtelen kapcsolt, hanem fokozatosan változott. A legyek annál az oldalsávnál gyűltek össze, ahol a koncentráció a leggyorsabban változott, nem a középen, ahol a szag a legerősebb volt. A releváns jel tehát az effektív határt kijelölő oldalsó változás volt, nem pedig a folyosó mentén kötelezően növekvő, forrás felé mutató koncentráció.

Ez nem jelenti azt, hogy a koncentrációgrádiensek a természetben soha nem számítanak. Azt jelenti, hogy a tesztelt körülmények között ehhez a viselkedéshez nem volt szükség forrás felé növekvő koncentrációra.

A kutatók a folyosó tájolását is megváltoztatták. Külön csoportok függőleges, 45 fokos és 90 fokos folyosókat követtek, egy másik csoport pedig olyan folyosóval találkozott, amely kilépés után oldalra ugrott. A csoportok létszáma rendre 40, 21, 20 és 24 légy volt. Külső pályáik a geometriával együtt változtak. Egy általános szabály, például „mindig fordulj széllel szembe”, nem magyarázza ezt a rugalmasságot.

Ebben a berendezésben a szag körülbelül két ezredmásodpercen belül érte el mindkét csápot. A kétoldali optogenetikai aktiválás széllel való párosítása határkövetésszerű mintát tudott előidézni. Az **optogenetika** fényérzékeny fehérjékkel változtatja meg kiválasztott sejtek működését. Az eredmény itt arra utal, hogy ehhez a viselkedéshez nem volt szükség arra, hogy a szag eltérő időben érkezzen a bal és jobb csáphoz. Ez nem teszi lényegtelenné a kétoldali összehasonlítást szabadon mozgó állatok más szagfelhőiben.

Egy vektor kisebb, mint egy térkép

A **vektor** irányból és nagyságból áll. Az itt hasznos tárolt mennyiség főként irányjellegű volt: merre kell a légynek fordulnia, hogy elérje a szagfelhő határát? A tanulmány nem talált bizonyítékot arra, hogy a légy a szagfelhő teljes elrendezését vagy azon belüli saját helyzetét tárolná.

A szerzők először mesterséges pályákat készítettek valódi légymozgások összetevőinek összekeverésével. Véletlenszerűen választottak megfigyelt futáshosszakat és fordulási szögeket, majd ezeket egymáshoz fűzték. Néhány ilyen szintetikus „járó” végül ismét elérte a szaghatárt, de messzebbre kóborolt és kevésbé közvetlen útvonalon tért vissza, mint a valódi legyek. Még a legyek szokásos, széllel szembeni fordulási hajlamának hozzáadása sem reprodukálta a rövid, irányított visszatéréseket. A valódi viselkedés tehát több irányinformációt tartalmazott, mint ugyanazon mozgások véletlenszerű újrakeverése.

A kutatók ezután két üzemmódú modellt építettek: **elhagyni a határt** és **visszatérni a határhoz**. Ezek az üzemmódok nem a szagon belül vagy kívül töltött minden pillanat címkéi voltak. Alternatív kormányzási szabályok voltak, amelyek a légy mozgása közben válthattak egymás között.

Minden határátlépés adott a modellnek egy megjegyzendő irányt. Kilépéskor frissített egy, az

eltávolodás közben használt irányt. Belépéskor egy külön visszatérési irányt frissített: lényegében azt, hogy „amikor megtaláltam a határt, ebbe az irányba haladtam”. Egy későbbi visszatéréskor ez a megjegyzett irány a szimulált légy mozgását vissza a szélhez torzította.

A kutatók a modellt a 0, 45 és 90 fokos folyosók pályáihoz illesztették. Az összesítő összehasonlításban 72 valódi légy és 75 szimuláció hasonló pályastatisztikákat adott. Amikor a belépéskor megtanult visszatérési irányt eltávolították, a követés minden folyosótájolásnál kevésbé hatékony lett. Ez támogatja a belépési irány emlékének hasznosságát; nem bizonyítja, hogy a légy agya szó szerint a modell egyenleteit futtatja.

> **Mit jelent a „memória” ebben a tanulmányban?**
>
> A kutatók nem olvastak ki közvetlenül egy eltárolt nyilat a légy agyából. Az „iránymemória” viselkedés, modell és idegi mérések által támogatott következtetés. A modell szerint néhány változó irány képes reprodukálni fontos pályastatisztikákat. Nem bizonyítja, hogy a légy szó szerint megvalósítja az egyenleteket, vagy hogy egy megnevezett neuroncsoport a tárolás helye.

Egy további, ellenkező irányú 45 fokos szegmenssel szerzett tapasztalat 10 légy későbbi viselkedését tolta el, 29 modellszimulációval párhuzamosan. Ez az irányalapú magyarázatot konkrétabbá teszi egy utólagos leírásnál, miközben továbbra is modellalapú értelmezés marad.

Egy irányreferencia és egy aktuális cél

A tanulmány ezután a légy **központi komplexumában**, a navigációban részt vevő agyi régióban mérte és zavarta meg az aktivitást.

> **Két jel, eltérő feladatokkal**
>
> Az EPG és az FC2 a központi komplexum két neuronpopulációjának neve. Az EPG-aktivitás iránytű-leolvasáshoz hasonlóan működik: követi, hogy a légy a szélhez képest éppen merre néz. Az FC2-aktivitás azzal az iránnyal társul, amerre a légy haladni próbál. Egy későbbi kormányzási áramkör összehasonlíthatja az aktuális irányt ezzel a céllal. A tanulmány mindkét populációt teszteli, de nem mutatja ki, hogy bármelyik egyedül tárolná a teljes emléket.

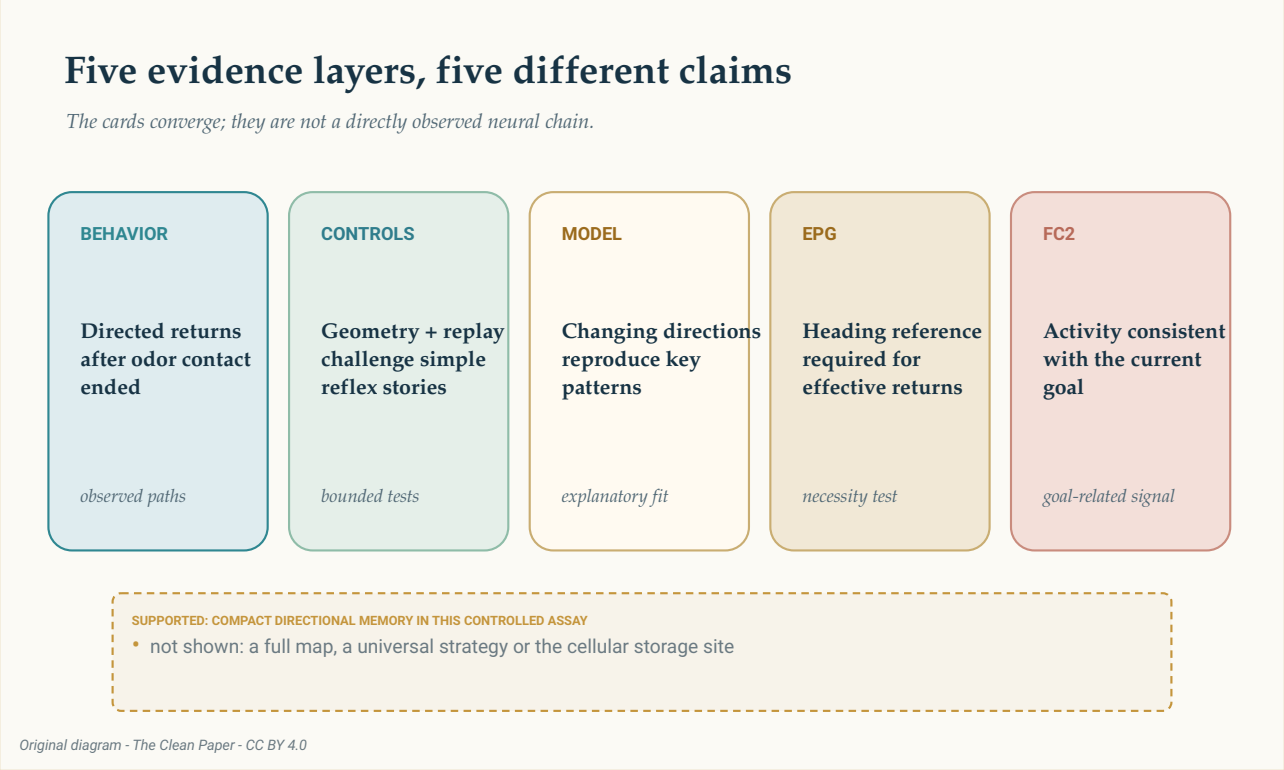
Az **EPG-neuronok** irányjelet hordoznak: aktivitási mintázatuk követi, hogy a légy egy külső jelhez képest merre néz. Kalciumképalkotással, vagyis az idegi aktivitás közvetett optikai leolvasásával a kutatók azt találták, hogy határkövetés közben az EPG-aktivitás fázisa követte a szélhez viszonyított irányt. Ez az elemzés 9 légy 16 kísérletét használta.

Az EPG-neuronok gátlásához a kutatók úgy módosították őket, hogy **GtACR1**-et, zöld fénnyel bekapcsolható anioncsatornát fejezzenek ki. Egy LED a teljes tesztkísérlet alatt bekapcsolva maradt, aktiválta ezt a csatornát és elnyomta a kiválasztott neuronokat; ugyanez a megvilágítás nem rontotta

a genetikai kontrolllegyek teljesítményét.

Amikor így gátolták az EPG-neuronokat, 12 kísérleti légy kevésbé hatékonyan tért vissza irányítottan, mint 6 genetikai kontrolllégy. A szűk következtetés az, hogy az EPG-aktivitás által hordozott irányreferencia szükséges volt a hatékony határkövetéshez a tesztelt körülmények között. Ez nem bizonyíték arra, hogy az EPG-neuronok egyedül tárolták a határ irányát.

Az **FC2-neuronok** más kapcsolatot mutattak. Populációs aktivitásuk az aktuális navigációs céllal társult, és a kísérletben a fordulások előtt a szagfelhő határa felé mutatott. A képalkotás 6 legyet használt, a gátlási összehasonlítások pedig az elemzéstől függően 9–14 legyes csoportokat. A gátlás rontotta a határkövetést.



A viselkedés, a megváltoztatott szagfelhő-geometria, egy illesztett modell és két idegi beavatkozás az iránymemória-magyarázat különböző részeit támogatja. Együtt egy tömör célirányt támasztanak alá ebben a kontrollált vizsgálatban, nem teljes térképet vagy bizonyított sejtszintű tárolási helyet.

The Clean Paper CC BY 4.0

Ez egymásba futó bizonyíték, nem lefényképezett oksági lánc. Az EPG-aktivitás egy szükséges irányreferenciát szolgáltatott. Az FC2-aktivitás összhangban állt egy célirránnyal, és szükséges volt a hatékony viselkedéshez. A kísérletek nem azonosítottak egyetlen memória-„engramot”, és nem bizonyították, hogy az FC2-szinapszisok fizikailag tárolták az irányt.

Durva emberi léptékű hasonlatként képzeljük el, hogy kilépünk egy keskeny ködpadból, miközben az állandó szél továbbra is megmutatja, merre van észak. Egy iránytű megmondhatja, merre nézünk, de a ködhöz való visszatéréshez a széléhez vezető megjegyzett irányra is szükség van. Az aktuális irány összehasonlítása a kívánt iránnyal megmondja, merre kell fordulni. Ilyen munkamegosztást sugallnak itt az EPG- és FC2-jelek. Ez magyarázó hasonlat, nem bizonyíték arra, hogy az emberek

ugyanazokat a sejteket vagy algoritmust használják.

A memória a cselekvéstől függött, nem pusztán a szag időzítésétől

Egy visszajátszási kísérletben a legyek ugyanazt a szag-időzítési sorozatot kapták, mint korábban, de az időzítés független volt attól, amit éppen csináltak. A megtanult iránytorzítás a visszajátszási boutok során gyengült. Ez egy **operáns**, cselekvéshez kötött frissítést támogat: nem önmagában egy szagsorozat passzív átélése számított, hanem a szag és a légy mozgása közötti kapcsolat.

Az elemzések nevezője változik. Az Extended Data panelek az összehasonlítástól függően 8 vagy 9 legyet tartalmaznak; az egymást követő boutok sorozata 8 legyet használ; a pályapanelek legalább 10 hatékony belépést követelnek meg; a párosított modellpanelek pedig 21 szimulált pályát használnak, amelyek szintén teljesítik ezt a belépési küszöböt. Ezek nem egyetlen, nyolc egyedből álló összevont minta.

Egy szabálytalanabb szagfelhő hasznos volt, de továbbra is virtuális

A kutatók egy korábban rögzített, szabálytalanabb szagfelhőt is visszajátszottak. Térben és időben ötszörösére skálázták, hogy a rögzített legyek elég gyakran találkozhassanak vele. **12 légyből tíz** a forrás 50 virtuális milliméteres környezetébe jutott.

Ez nem tíz légy, amely nyílt levegőn valódi forrást talált meg. Ez egy természetesebb jellegű szagfelhő kontrollált visszajátszásában nyújtott teljesítmény.

A modell minden dinamikus szagfelhőtípushoz 2 000 pályát generált. A skálázott felhő összehasonlítása ebből 1 850-et elemzett, miután megkövetelte a hatékony belépést, és kizárta azokat a pályákat, amelyek túl közel kezdődtek a forráshoz. A memória többet segített a forrás közelében, ahol az egymást követő találkozások megőrizték a koherens iránystruktúrát, és kevesebbet a távolabbi, turbulensebb szél alatti régióban.

A megszorítás maga is az eredmény része. Egy tömör irány csak akkor segíthet, ha a világ elég koherens marad ahhoz, hogy egy korábbi találkozás mondjon valami hasznosat a következőről.

Mit nem mutat a tanulmány

- **Nem** mutatja, hogy a légy teljes térbeli térképet épít.
- **Nem** mutat szabad repülést egy módosítatlan természetes szagfelhőben.

- **Nem** állapítja meg, hogy minden szagvezérelt navigáció ezt a stratégiát használja.
- **Nem** mutatja, hogy az EPG- vagy FC2-neuronok lennének a memória kizárólagos fizikai tárolási helyei.
- **Nem** változtatja az illesztett modellt a légy szó szerinti biológiai algoritmusává.
- **Nem** általánosítható közvetlenül emberi navigációra.

A tanulmány ott a legerősebb, ahol a legpontosabb. A zárt hurkú vezérlés pontos hozzáférést adott a kutatóknak minden egyes szagtalálkozáshoz. A geometria megváltoztatása, a visszajátszás, a modellezés, a kalciumképalkotás és a gátlás ezután ugyanazon magyarázat különböző részeit tesztelte. A viselkedési, képalkotási és gátlási kohorszok azonban különállók voltak; a mintaméreteket nem határozták meg előre; az adatgyűjtés és -elemzés nem volt randomizált vagy vak; és a rögzített legyek kevesebb mint 10%-át zárták ki akklimatizációs, válasz- vagy követési problémák miatt.

Ezek a korlátok nem törlik el a jelenséget. Meghatározzák azt.

Röviden

Virtuális szagfolyosóban gyalogló, rögzített muslicák ismételten visszatértek egy határhoz, miután maguk mögött hagyták a szagot. A koncentráció és a folyosó geometriájának megváltoztatása, egy illesztett kapcsolómodell, idegi képalkotás és optogenetikai gátlás olyan magyarázatot támogat, amelyben a légy teljes térkép helyett tömör, megjegyzett irányt használ. Az EPG-neuronok szükséges irányreferenciát adtak, míg az FC2-aktivitás összhangban állt az aktuális céliránnyal. Az eredmény egy kontrollált gyaloglási vizsgálatra korlátozódik; nem azonosítja a memória sejtszintű tárolási helyét, és nem mutatja ugyanazt a számítást szabad, természetes repülésben.

Tárgyilagos mérleg

Mit mutat a tanulmány: Egy zárt hurkú, rögzített kísérletben a legyek irányítottan tértek vissza olyan virtuális szaghatárokhoz, amelyeket már nem érzékeltek. Több viselkedési kontroll, modellezés és idegi beavatkozás támogat egy vektoralapú stratégiát.

Mi következtetés: Hogy a viselkedés tömör iránymemóriát használ, és az FC2-populáció aktivitása egy aktuális navigációs célt képvisel. A memória tartalmát nem olvasták ki közvetlenül.

Mit nem mutat: Teljes mentális térképet, univerzális szaglási stratégiát, szabad repülési teljesítményt természetes szagfelhőben, egyetlen memóriatárolási helyet vagy emberi megfelelőt.

Fő korlátok: Egy faj és kontrollált berendezés; eltérő légykohorszok és elemzési egységek a kísérletek között; közvetett kalciumjelek; szükségességi tesztek, amelyek nem bizonyítják az elégségességet; valamint egy visszajátszott és átskálázott, természetesebb jellegű szagfelhő.

Mennyi bizalma legyen egy általános olvasónak? Nagy bizalommal mondható, hogy az irányított visszatérési jelenség valós ebben a berendezésben, és hogy az irány- és célkapcsolt központikomplexum-

aktivitás számít. Közepes bizalom indokolt a modellben mint tömör magyarázatban. Alacsony bizalom indokolt minden olyan állításban, amely változatlanul kiterjeszti ezt a nyílt levegőre, vagy teljes térképnek nevezi.

Források

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