The Clean Paper

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

# Një mizë mund ta humbasë aromën dhe përsëri të kthehet drejt saj. Në një re virtuale, e ndihmoi një drejtim i mbajtur mend

*Mizat e frutave të fiksuara u kthyen vazhdimisht te kufiri i një arome pasi ecën në ajër të pastër. Sjellja, modelimi dhe ndërhyrjet nervore mbështesin një kujtesë kompakte të drejtimit, jo një hartë të plotë. Rezultati vjen nga një provë e kontrolluar e realitetit virtual dhe ende nuk tregon të njëjtën strategji në fluturim të lirë natyror.*

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

# Një mizë mund ta humbasë aromën dhe përsëri të kthehet drejt saj

Miza e kishte lënë aromën pas.

Ajo vazhdoi të ecte nëpër ajër të pastër, ndonjëherë për dhjetëra sekonda dhe qindra milimetra virtualë. Pastaj u kthye drejt kufirit që kishte kaluar dhe e gjeti përsëri aromën. Në atë çast, vetë aroma nuk mund t'i tregonte rrugën e kthimit.

Ky është vëzhgimi qendror i një studimi të ri në Nature mbi navigimin e mizave të frutave. Studiuesit argumentojnë se mizat përdorën një kujtesë kompakte të drejtimit: jo një hartë të gjithë resë së aromës dhe jo një kujtesë të largësisë së përshkuar, por një drejtim të mbajtur mend drejt një kufiri që nuk mund të zbulohej më.

Rezultati është mbresëlënës sepse tregon sa pak informacion i ruajtur mund të mjaftojë. Por është gjithashtu e lehtë të teprohet me të. Këto miza nuk fluturuan lirshëm nëpër një peizazh natyror. Ato ecën të fiksuara mbi një sferë të mbështetur nga ajri, brenda një bote virtuale të kontrolluar rreptësisht. Studimi mbështet një strategji të bazuar në vektor në atë aparaturë; ai nuk tregon se mizat ndërtojnë harta mendore, nuk shpjegon çdo mënyrë me të cilën kafshët ndjekin aromat dhe nuk identifikon qelizat ku ruhet fizikisht një kujtesë.

# Korridori i padukshëm u krijua nga programi

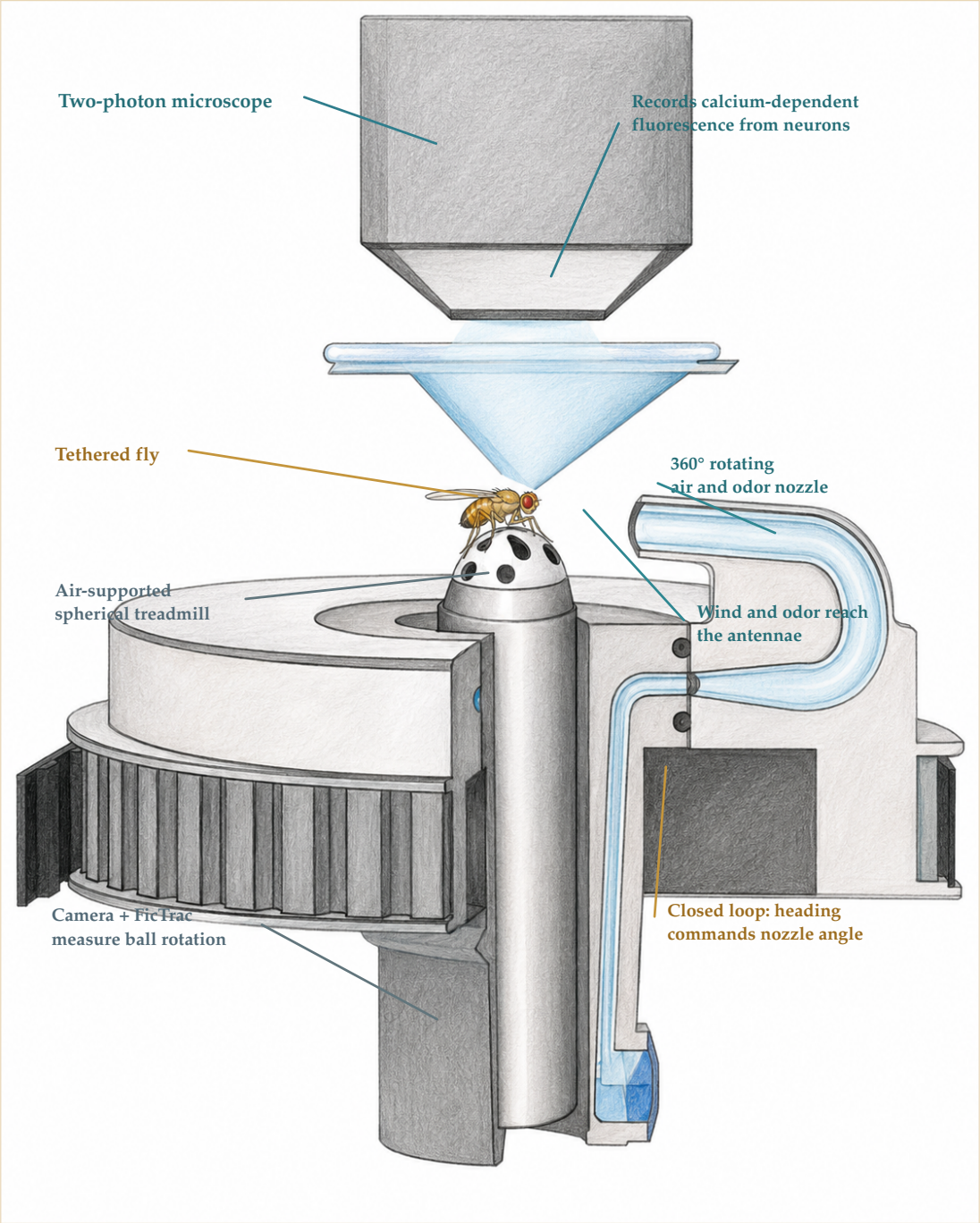
Një re arome është rajoni lëvizës i aromës që transportohet nga ajri. Jashtë, një re përkulet, shpërbëhet dhe ribashkohet ndërsa ndryshon era. Kjo e bën të vështirë të dihet saktësisht çfarë ka nuhatur një kafshë në çdo çast.

Studiuesit e bënë problemin të kontrollueshëm me **realitet virtual me lak të mbyllur**. Trupi i mizës ishte i fiksuar në vend mbi një sferë të lehtë që pluskonte mbi ajër. Ndërsa miza ecte, një kamerë mati rrotullimin e sferës rreth 60 herë në sekondë. Programi e përktheu atë rrotullim në një pozicion dhe orientim virtual dydimensional.

Ky orientim kontrollonte një grykë të motorizuar që mund të rrotullohej 360 gradë. Ndërsa miza ndryshonte orientimin e saj virtual, gryka lëvizte rreth saj për ta mbajtur erën të përputhur me një drejtim të qëndrueshëm në botën virtuale të mizës. Në të njëjtën kohë, kontrolluesit e rrjedhës së masës ndryshonin sasinë e ajrit të pastër ose të aromës së uthullës së mollës që arrinte te antenat, sipas pozicionit virtual të mizës. Kalimi i një kufiri të përcaktuar nga programi ndizte ose fikte aromën, duke krijuar kështu një korridor imagjinar 50 milimetra të gjerë dhe një metër të gjatë, edhe pse miza nuk largohej kurrë nga sfera.

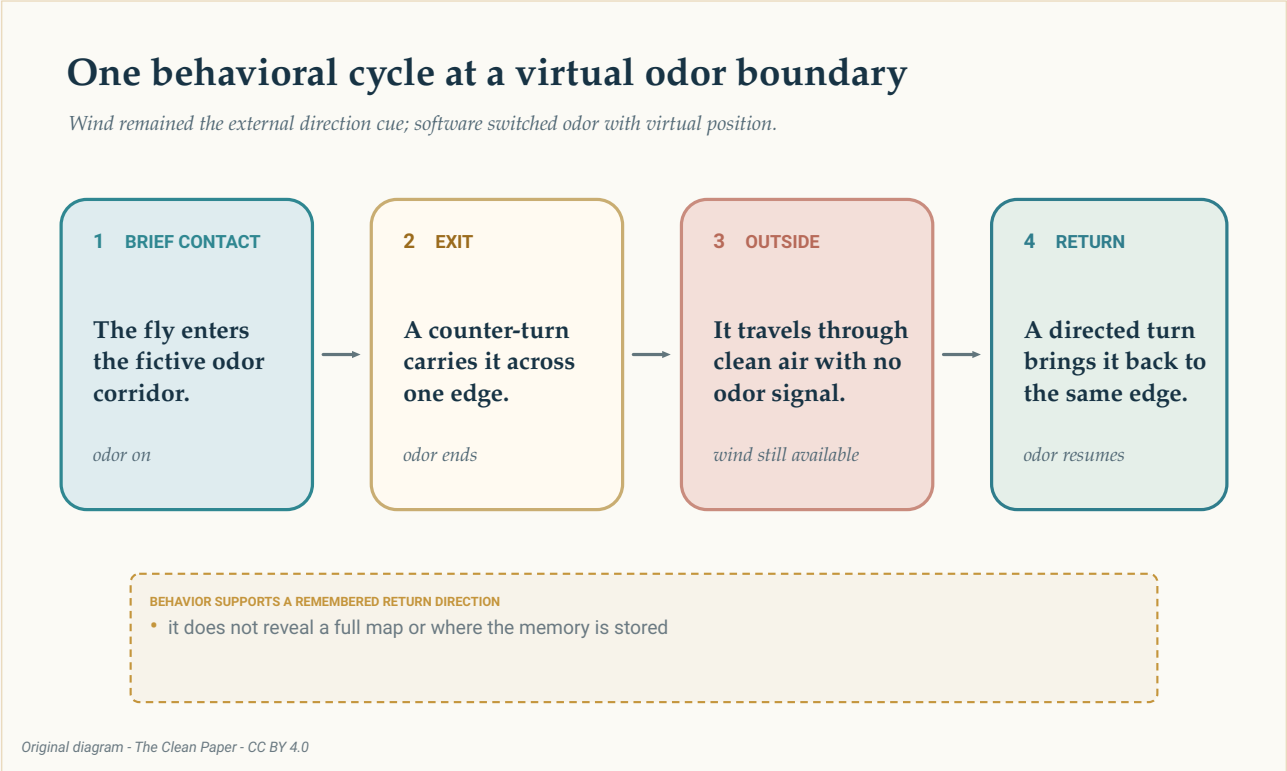
Aparatura prodhoi një regjistrim të sinkronizuar të pozicionit virtual të mizës, orientimit, gjendjes së aromës dhe kontrolleve të rrjedhës së ajrit në çdo çast. Nga ky regjistrim, studiuesit rindërtuan trajektoret, shënuan çdo hyrje dhe dalje dhe matën sa drejtpërdrejt kthehej miza. Era jepte sinjalin e jashtëm të drejtimit; lëvizja e vetë mizës përcaktonte kur ajo ndeshte njërën apo tjetrën anë të kufirit

virtual të aromës.




Miza qëndroi e fiksuar mbi një sferë të mbështetur nga ajri. Një kamerë dhe FicTrac e kthyen rrotullimin e sferës në lëvizje dhe orientim virtual; më pas programi rrotulloi grykën e ajrit dhe aromës dhe e ndizte ose fikte aromën sipas pozicionit virtual. Gjatë provave të veçanta të imazherisë nervore, mikroskopi dy-fotonësh sipër mizës regjistroi fluorescencën e varur nga kalciumi nga neuronet EPG ose FC2, duke lejuar përputhjen e aktivitetit nervor me sjelljen. Mikroskopi nuk ishte i nevojshëm për çdo provë sjellore.

The Clean Paper CC BY 4.0




Në provën e kontrolluar, një mizë hyri shkurtimisht në korridorin virtual të aromës, doli prej tij, udhëtoi nëpër ajër pa aromë dhe bëri një kthim të drejtuar. Sjellja mbështet një drejtim kthimi të mbajtur mend; ajo nuk tregon se ku ruhet ky informacion.

The Clean Paper CC BY 4.0

Në eksperimentin kryesor me **korridor vertikal**, **40 miza** hynë vazhdimisht në aromë, bënë një kundërkthesë për të dalë prej saj dhe u kthyen te i njëjti skaj. “Vertikal” është emri që punimi i jep gjeometrisë 0-gradëshe: boshti i gjatë i korridorit ishte paralel me drejtimin kundër erës. Nuk do të thotë se aparatura qëndronte vertikalisht.

Autorët e quajnë këtë model **ndjekje të skajit**. Një **bout** është një episod i vazhdueshëm midis dy kalimeve të kufirit: një bout brenda zgjat nga hyrja deri në dalje, ndërsa një bout jashtë nga dalja deri kur miza kthehet. Në 755 bout-e brenda, një vizitë zgjati mesatarisht 4,9 sekonda. Gjatë kthimeve, largësia mesatare nga kufiri ishte 10,4 milimetra. Më pak se 4% e 793 bout-eve kaluan deri në skajin e kundërt të korridorit.

Këto dy shifra të fundit përshkruajnë bout-e, jo qindra miza të pavarura. Dallimi ka rëndësi sepse një kafshë e vetme mund të kontribuojë shumë bout-e.

## Kthimet nuk ishin thjesht një refleks i pandryshueshëm kundër erës

Disa eksperimente testuan shpjegime më të thjeshta.

Studiuesit së pari ndryshuan çfarë ndodhte **përgjatë** korridorit ndërsa një mizë ecte kundër erës. Aroma mund të bëhej më e fortë drejt burimit virtual, të mbetej konstante ose të dobësohej. Mizat prodhuan trajektore të ngjashme në të tria rastet. Prandaj, një rregull i thjeshtë si "vazhdo kudo që aroma bëhet më e fortë" nuk mund ta shpjegojë ndjekjen e skajit në këtë aparaturë.

Më pas ata e zbutën skajin **anësor** të korridorit në një profil Gaussian, ku përqendrimi ndryshonte gradualisht në vend që të kalonte menjëherë nga një gjendje në tjetrën. Mizat u grumbulluan pranë anës ku përqendrimi ndryshonte më shpejt, jo në qendër ku aroma ishte më e fortë. Pra, sinjali përkatës ishte ndryshimi anësor që shënonte një kufi efektiv, jo një rritje e domosdoshme drejt burimit përgjatë korridorit.

Kjo nuk do të thotë se gradientët e përqendrimit nuk kanë kurrë rëndësi në natyrë. Do të thotë se, në kushtet e testuara, një rritje drejt burimit nuk ishte e nevojshme për këtë sjellje.

Studiuesit ndryshuan edhe orientimin e korridorit. Grupe të veçanta ndoqën korridore vertikale, 45-gradëshe dhe 90-gradëshe, ndërsa një grup tjetër hasi një korridor që zhvendosej anash pas daljeve. Madhësitë e grupeve ishin përkatësisht 40, 21, 20 dhe 24 miza. Trajektoret e tyre jashtë ndryshuan sipas gjeometrisë. Një rregull i përgjithshëm si "kthehu gjithmonë kundër erës" nuk mund ta shpjegojë këtë fleksibilitet.

Në këtë konfigurim, aroma arrinte te dy antenat brenda rreth dy milisekondash. Çiftimi i aktivizimit optogjenetik bilateral me erën mund të riprodhonte një model të ngjashëm me ndjekjen e skajit. **Optogjenetika** përdor proteina të ndjeshme ndaj dritës për të ndryshuar aktivitetin e qelizave të përzgjedhura. Këtu rezultati sugjeron se një diferencë majtas-djathtas në kohën e mbërritjes së aromës nuk ishte e nevojshme për këtë sjellje. Ai nuk e bën krahasimin bilateral të parëndësishëm për kafshët që lëvizin lirshëm në re të tjera arome.

# Një vektor është më i vogël se një hartë

Një **vektor** është një drejtim së bashku me një madhësi. Sasia e dobishme e ruajtur këtu ishte kryesisht drejtimore: nga duhet të kthehet miza për të arritur kufirin e resë së aromës? Studimi nuk gjeti prova se miza ruante një plan të plotë të resë ose pozicionin e vet brenda saj.

Autorët fillimisht krijuan trajektore artificiale duke përzier përbërësit e lëvizjes së vërtetë të mizave. Ata zgjodhën në mënyrë të rastësishme gjatësitë e vëzhguara të ecjeve dhe këndet e kthesave dhe i bashkuan. Disa prej këtyre ecësve sintetikë përfundimisht e prekën përsëri kufirin e aromës, por u endën më larg dhe morën rrugë më pak të drejtpërdrejta se mizat reale. Edhe shtimi i prirjes së zakonshme të mizave për t'u kthyer kundër erës nuk i riprodhoi kthimet e shkurtra dhe të drejtuara. Pra, sjellja reale përmbante më shumë informacion drejtimor sesa një përzierje e rastësishme e të njëjtave lëvizje.

Më pas studiuesit ndërtuan një model me dy mënyra: **largohu nga kufiri** dhe **kthehu te kufiri**. Këto mënyra nuk ishin etiketa për çdo çast brenda ose jashtë aromës. Ato ishin rregulla alternative drejtimi që mund të ndërroheshin ndërsa miza lëvizte.

Çdo kalim i kufirit i jepte modelit një drejtim për ta mbajtur mend. Në dalje, ai përditësonte një

drejtim të përdorur gjatë largimit. Në hyrje, përditësonte një drejtim të veçantë kthimi: në thelb, "kur e gjeta kufirin, po lëvizja në këtë drejtim". Gjatë një kthimi të mëvonshëm, ky drejtim i mbajtur mend e anonte lëvizjen e mizës së simuluar përsëri drejt skajit.

Studiuesit e përshtatën modelin me trajektoret në korridoret 0-, 45- dhe 90-gradëshe. Në krahasimin përmbledhës, 72 miza reale dhe 75 simulime prodhuan statistika të ngjashme të trajektores. Kur u hoq drejtimi i kthimit i mësuar në hyrje, ndjekja u bë më pak efikase në të gjitha orientimet e korridorit. Kjo mbështet dobinë e një kujtese të drejtimit të hyrjes; nuk provon se truri i një mize i zbaton fjalë për fjalë ekuacionet e modelit.

> **Çfarë do të thotë "kujtesë" në këtë punim?**
>
> Studiuesit nuk lexuan drejtpërdrejt një shigjetë të ruajtur në trurin e mizës. "Kujtesa drejtuese" është një inferencë e mbështetur nga sjellja, një model dhe matje nervore. Modeli thotë se disa drejtime që ndryshojnë mund të riprodhojnë statistika të rëndësishme të trajektores. Ai nuk provon se miza i zbaton ekuacionet fjalë për fjalë, ose se një grup i caktuar neuronesh është vendi i ruajtjes.

Një përvojë shtesë me një segment 45-gradësh të orientuar në drejtim të kundërt e zhvendosi sjelljen e mëvonshme në 10 miza, krahas 29 simulimeve të modelit. Kjo e bën shpjegimin drejtimor më specifik sesa një përshkrim post hoc, duke mbetur një interpretim i bazuar në model.

## Një referencë orientimi dhe një objektiv aktual

Më pas studimi mati dhe ndërhyri në aktivitetin e **kompleksit qendror** të mizës, një rajon i trurit i përfshirë në navigim.

> **Dy sinjale me role të ndryshme**
>
> EPG dhe FC2 janë emra të dy popullatave të neuroneve në kompleksin qendror. Aktiviteti EPG vepron si një lexim busulle: ndjek drejtimin në të cilin është kthyer miza në raport me erën. Aktiviteti FC2 lidhet me drejtimin në të cilin miza po përpiqet të udhëtojë. Një qark drejtues më poshtë në rrjet mund të krahasojë orientimin aktual me këtë objektiv. Studimi i teston të dyja popullatat, por nuk tregon se secila prej tyre, e vetme, ruan të gjithë kujtesën.

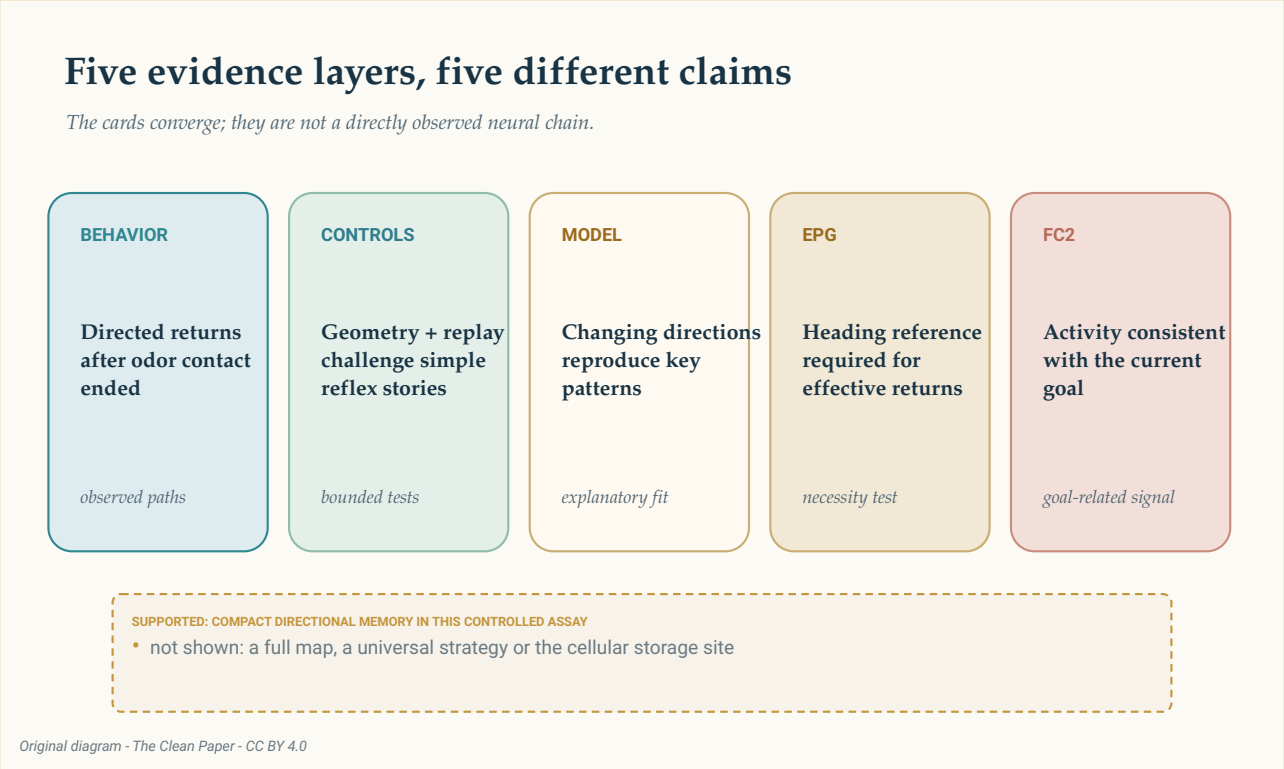
**Neuronet EPG** mbartin një sinjal orientimi: modeli i aktivitetit të tyre ndjek drejtimin në të cilin është kthyer miza në raport me një sinjal të jashtëm. Duke përdorur imazheri të kalciumit, një tregues optik indirekt të aktivitetit nervor, studiuesit gjetën se faza e aktivitetit EPG ndiqte orientimin në raport me erën gjatë ndjekjes së skajit. Kjo analizë përdori 16 prova nga 9 miza.

Për të frenuar neuronet EPG, studiuesit i modifikuan që të shprehnin **GtACR1**, një kanal anionesh që aktivizohet nga drita jeshile. Një LED mbeti i ndezur gjatë gjithë provës së testit, duke aktivizuar atë kanal dhe duke shtypur neuronet e përzgjedhura; e njëjta ndriçim nuk dëmtoi mizat e kontrollit

gjenetik.

Kur neuronet EPG u frenuan në këtë mënyrë, 12 miza eksperimentale bënë kthime të drejtuara më pak efektive se 6 mizat e kontrollit gjenetik. Përfundimi i kufizuar është se referenca e orientimit e mbartur nga aktiviteti EPG ishte e nevojshme për ndjekje efektive të skajit në kushtet e testuara. Kjo nuk është provë se neuronet EPG, të vetme, ruanin drejtimin e kufirit.

**Neuronet FC2** treguan një marrëdhënie tjetër. Aktiviteti i popullatës së tyre lidhej me objektivin aktual të navigimit dhe drejtohej nga kufiri i resë së aromës para kthesave në provë. Imazheria përdori 6 miza, ndërsa krahasimet me heshtje neuronale përdorën grupe prej 9 deri në 14 mizash, sipas analizës. Heshtja e tyre e dëmtoi ndjekjen e skajit.




Sjellja, ndryshimi i gjeometrisë së resë, një model i përshtatur dhe dy ndërhyrje nervore mbështesin pjesë të ndryshme të shpjegimit me kujtesë drejtimi. Së bashku ato mbështesin një drejtim kompakt të objektivit në këtë provë të kontrolluar, jo një hartë të plotë ose një vend të provuar qelizor të ruajtjes.

The Clean Paper CC BY 4.0

Kjo është provë konvergjente, jo një zinxhir shkakësor i fotografuar. Aktiviteti EPG dha një referencë të nevojshme orientimi. Aktiviteti FC2 ishte në përputhje me një drejtim objektivi dhe ishte i nevojshëm për sjellje efektive. Eksperimentet nuk lokalizuan një “engram” të vetëm të kujtesës dhe nuk provuan se sinapset FC2 ruanin fizikisht drejtimin.

Si analogji e përafërt në shkallë njerëzore, imagjinoni se dilni nga një brez i ngushtë mjegulle ndërsa një erë e qëndrueshme vazhdon t’ju tregojë se nga është veriu. Një busull mund t’ju tregojë nga jeni kthyer, por kthimi te mjegulla kërkon edhe një drejtim të mbajtur mend drejt skajit të saj. Krahasimi i orientimit aktual me atë drejtim të dëshiruar ju tregon nga të ktheheni. Kjo është ndarja e roleve që sugjerohet këtu për sinjalet EPG dhe FC2. Është një analogji shpjeguese, jo provë se njerëzit përdorin

të njëjtat qeliza ose algoritëm.

## Kujtesa varej nga veprimi, jo vetëm nga koha e aromës

Në një eksperiment replay, mizat morën të njëjtën sekuencë kohore të aromës si më parë, por koha ishte shkëputur nga ajo që po bënin në atë çast. Prirja drejtuese e mësuar u dobësua përgjatë bout-eve të replay-it. Kjo mbështet një përditësim **operant**, të lidhur me veprimin: rëndësi kishte jo vetëm ekspozimi pasiv ndaj një sekuence aromash, por marrëdhënia midis aromës dhe lëvizjes së mizës.

Emëruesi ndryshon midis këtyre analizave. Panelet e Extended Data përfshijnë 8 ose 9 miza në varësi të krahasimit; seria e bout-eve të njëpasnjëshme përdor 8 miza; panelet e trajektoreve kërkojnë të paktën 10 hyrje efektive; dhe panelet e çiftuara të modelit përdorin 21 trajektore të simuluara që përmbushin po atë prag hyrjeje. Këto nuk janë një kampion i vetëm i bashkuar prej tetë mizash.

## Një re më e parregullt ishte e dobishme, por përsëri virtuale

Studiuesit riprodhuan gjithashtu një re të regjistruar më parë, më të parregullt. E shkallëzuan pesë-fish në hapësirë dhe kohë që mizat e fiksuara ta ndeshnin mjaftueshëm shpesh. **Dhjetë nga 12 miza** arritën brenda 50 milimetrave virtualë nga burimi i saj.

Kjo nuk do të thotë se dhjetë miza gjetën një burim real në ajër të hapur. Është performancë në një replay të kontrolluar të një reje natyraliste.

Për çdo lloj reje dinamike, modeli gjeneroi 2.000 trajektore. Krahasimi i resë së shkallëzuar analizoi 1.850 nga ato 2.000 pasi kërkoi një hyrje efektive dhe përjashtoi trajektoret që nisnin tepër afër burimit. Kujtesa ndihmoi më shumë pranë burimit, ku takimet e njëpasnjëshme ruanin një strukturë të qëndrueshme drejtimore, dhe më pak në rajonin më turbulent më tej në drejtim të erës.

Ky kufizim është pjesë e rezultatit. Një drejtim kompakt mund të ndihmojë vetëm kur bota mbetet mjaftueshëm koherente që një takim i mëparshëm të thotë diçka të dobishme për tjetrin.

## Çfarë nuk tregon studimi

- Ai **nuk** tregon një mizë që ndërton një hartë të plotë hapësinore.
- Ai **nuk** tregon fluturim të lirë nëpër një re natyrore të pandryshuar.
- Ai **nuk** vendos se i gjithë navigimi i udhëhequr nga aroma përdor këtë strategji.
- Ai **nuk** tregon se neuronet EPG ose FC2 janë vendi i vetëm fizik ku ruhet kujtesa.
- Ai **nuk** e shndërron modelin e përshtatur në algoritmin biologjik fjalë për fjalë të mizës.
- Ai **nuk** përgjithësohet drejtpërdrejt në navigimin njerëzor.

Studimi është më i fortë aty ku është më specifik. Kontrolli me lak të mbyllur u dha studiuesve qasje të saktë në çdo takim me aromën. Ndryshimet e gjeometrisë, replay-i, modelimi, imazheria e kalciumit dhe heshtja neuronale testuan më pas pjesë të ndryshme të një shpjegimi të vetëm. Por grupet e sjelljes, imazherisë dhe heshtjes ishin të ndara; madhësitë e kampionëve nuk ishin përcaktuar para-prakisht; mbledhja dhe analiza e të dhënave nuk ishin të randomizuara ose të verbuara; dhe më pak se 10% e mizave të fiksuara u përjashtuan për probleme me aklimatizimin, reagimin ose gjurmimin.

Këto kufizime nuk e fshijnë fenomenin. Ato e përcaktojnë atë.

# Përmbledhje e shkurtër

Mizat e frutave të fiksuara që ecnin nëpër një korridor virtual arome u kthyen vazhdimisht te një kufi pasi e kishin lënë aromën pas. Ndryshimet e përqendrimit dhe gjeometrisë së korridorit, një model i përshtatur me dy mënyra, imazheria nervore dhe heshtja optogjenetike mbështesin një shpjegim ku miza përdor një drejtim kompakt të mbajtur mend, jo një hartë të plotë. Neuronet EPG dhanë një referencë të nevojshme orientimi, ndërsa aktiviteti FC2 ishte në përputhje me drejtimin aktual të objektivit. Rezultati kufizohet në një provë të kontrolluar ecjeje; ai nuk identifikon vendin qelizor ku ruhet kujtesa dhe nuk tregon të njëjtën llogaritje në fluturim të lirë natyror.

# Kontroll pa teprime

**Çfarë tregon punimi:** Në një provë të fiksuar me lak të mbyllur, mizat bënë kthime të drejtuara te kufij virtualë të aromës që nuk mund t'i ndienin më. Kontrolle të shumta sjellore, modelimi dhe ndërhyrjet nervore mbështesin një strategji të bazuar në vektor.

**Çfarë inferohet:** Se sjellja përdor një kujtesë kompakte të drejtimit dhe se aktiviteti i popullatës FC2 përfaqëson një objektiv aktual të navigimit. Përmbajtja e kujtesës nuk u lexua drejtpërdrejt.

**Çfarë nuk tregon:** Një hartë të plotë mendore, një strategji universale nuhatjeje, performancë në fluturim të lirë në një re natyrore, një vend të vetëm të ruajtjes së kujtesës ose një analog njerëzor.

**Kufizimet kryesore:** Një specie dhe një aparaturë e kontrolluar; grupe të ndryshme mizash dhe njësi analize në eksperimente të ndryshme; sinjale indirekte të kalciumit; teste të domosdoshmërisë që nuk provojnë mjaftueshmërinë; dhe një re natyraliste që u riprodhua dhe u shkallëzua.

**Sa besim duhet të ketë një lexues i përgjithshëm?** Besim i lartë se fenomeni i kthimit të drejtuar është real në këtë aparaturë dhe se aktiviteti i kompleksit qendror i lidhur me orientimin dhe objektivin ka rëndësi. Besim mesatar te modeli si shpjegim kompakt. Besim i ulët në çdo pretendim që e shtrin atë të pandryshuar në ajër të hapur ose e quan një hartë të plotë.

# Burimet

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