The Clean Paper

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

Kärbes võib lõhna kaotada ja ikkagi tagasi pöörduda. Virtuaalses lõhnapilves aitas meeles hoitud suund

Kinnitatud äädikakärbsed naasid korduvalt lõhnapiirile pärast puhtasse õhku kõndimist. Käitumine, modelleerimine ja närvisüsteemi häirimised toetavad kompaktset suunamälu, mitte täielikku kaarti. Tulemus pärineb kontrollitud virtuaalreaalsuse katsest ega näita veel sama strateegiat vabas looduslikus lennus.

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

Kärbes võib lõhna kaotada ja ikkagi selle poole tagasi pöörduda

Kärbes oli lõhna selja taha jätnud.

Ta kõndis edasi läbi puhta õhu, mõnikord kümneid sekundeid ja sadu virtuaalseid millimeetreid. Siis pöördus ta ületatud piiri poole ja leidis lõhna uuesti. Sel hetkel ei saanud lõhn ise enam tagasiteed näidata.

See on uue Nature'i uuringu keskne vaatlus äädikakärbeste navigeerimisest. Teadlased väidavad, et kärbsed kasutasid kompaktset suunamälu: mitte kogu lõhnapilve kaarti ega läbitud vahemaa mälu, vaid meeles hoitud suunda piiri poole, mida enam tajuda ei saanud.

Tulemus on silmatorkav, sest näitab, kui väikesest salvestatud infost võib piisata. Selle tähendust on aga lihtne üle hinnata. Need kärbsed ei lennanud vabalt läbi loodusliku maastiku. Nad kõndisid kinnitatuna õhkpadjal hõljuval kuul rangelt kontrollitud virtuaalmaailmas. Uuring toetab selles aparatuuris vektoripõhist strateegiat; see ei näita, et kärbsed ehitavad mentaalseid kaarte, ei selgita kõiki viise, kuidas loomad lõhna järgivad, ega tuvasta rakke, milles mälu füüsiliselt talletub.

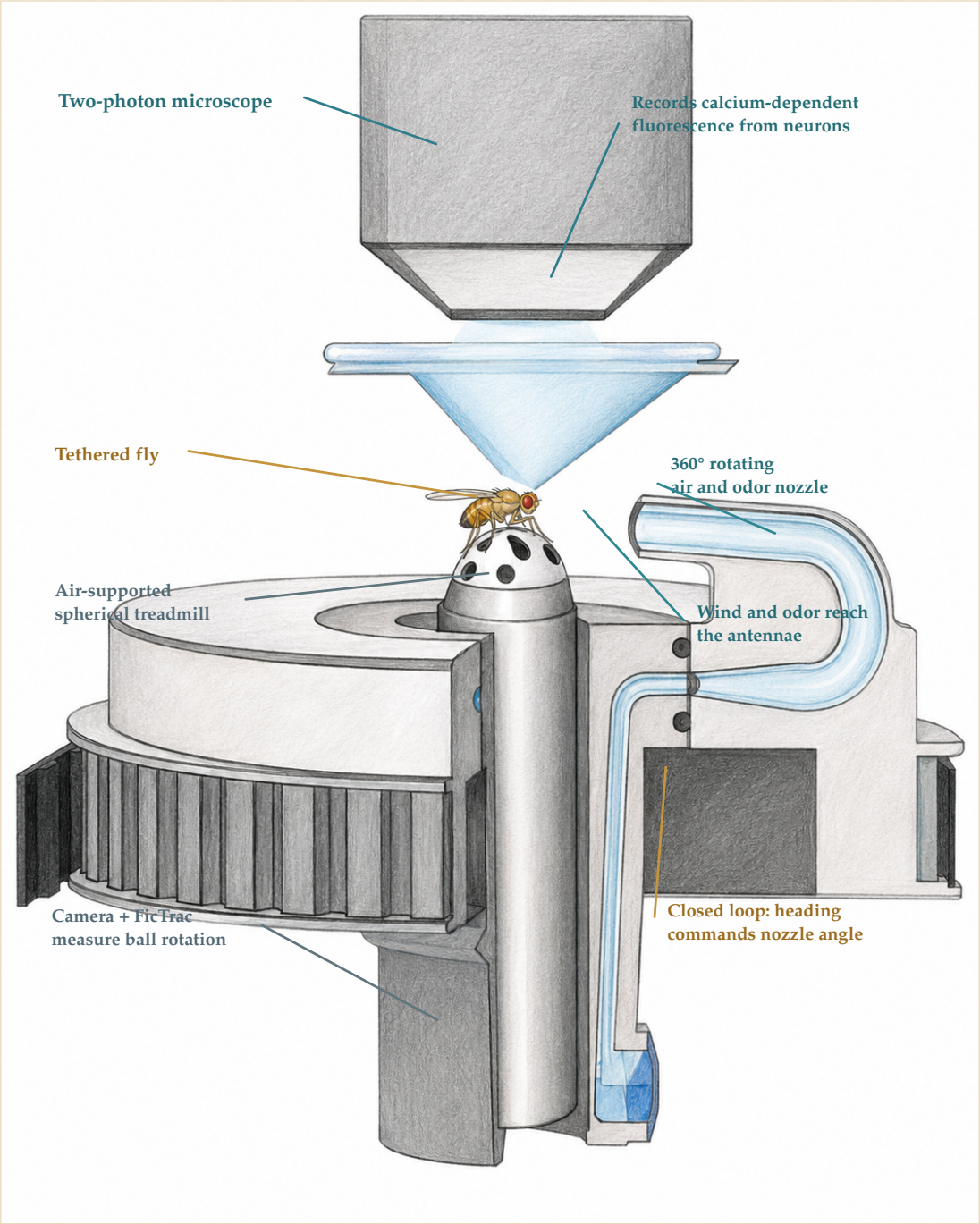
Nähtamatu koridor loodi tarkvaraga

Lõhnapilv on õhu poolt kantav liikuv lõhnapiirkond. Õues paindub, laguneb ja ühineb pilv tuule muutudes uuesti. Seetõttu on raske teada täpselt, mida loom igal hetkel haistis.

Teadlased muutsid probleemi kontrollitavaks **suletud ahelaga virtuaalreaalsuse** abil. Kärbse keha kinnitati paigale kerge õhkpadjal hõljuva kuuli kohale. Kärbse kõndides mõõtis kaamera kuuli pöörlemist umbes 60 korda sekundis. Tarkvara teisendas pöörlemise virtuaalseks kahemõõtmeliseks asukohaks ja suunaks.

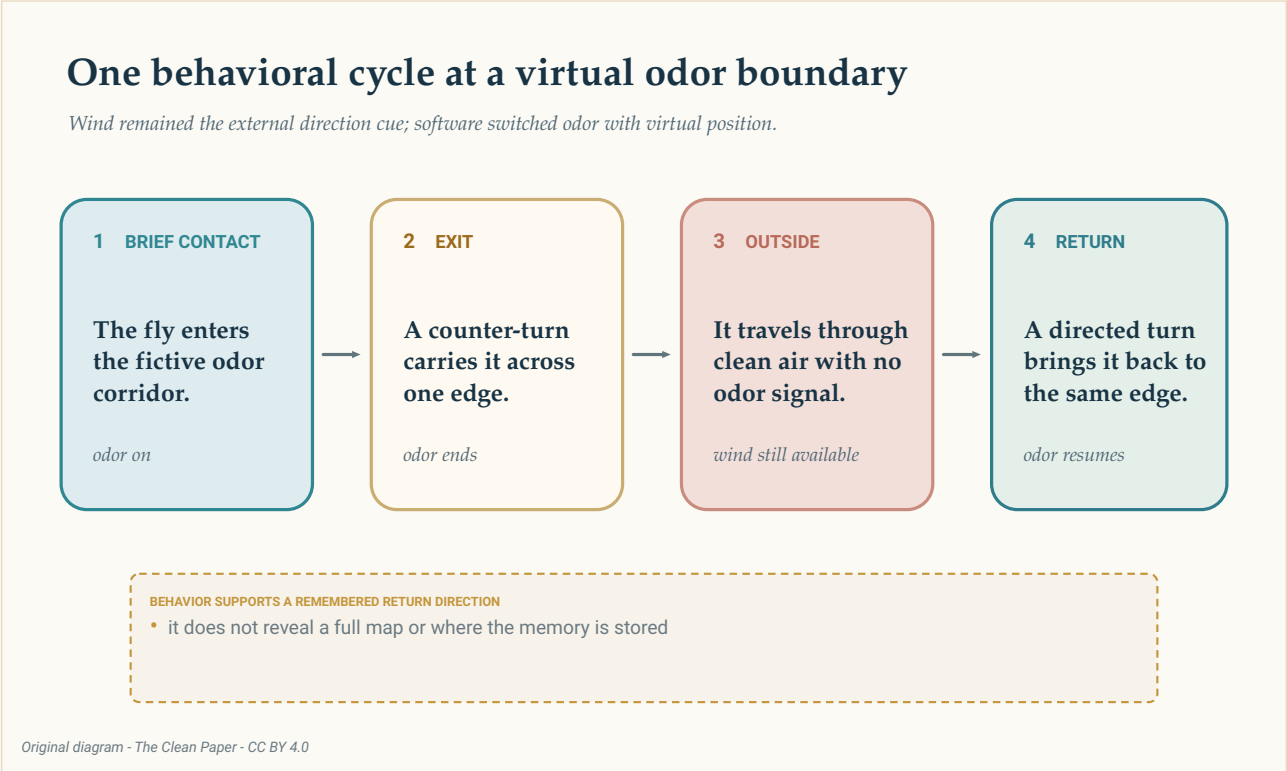
See suund juhtis motoriseeritud düüsi, mis sai pöörduda 360 kraadi. Kui kärbes muutis oma virtuaalset suunda, liikus düüs tema ümber, et hoida tuul kärbse virtuaalmaailmas stabiilse suunaga joondatuna. Samal ajal muutsid massivooluregulaatorid kärbse virtuaalse asukoha järgi seda, kui palju puhast õhku või õunaäädika lõhna tundlatele jõudis. Tarkvaras määratud piiri ületamine lülitas seega lõhna sisse või välja, luues 50 millimeetri laiuse ja ühe meetri pikkuse kujuteldava koridori, kuigi kärbes ei lahkunud kunagi kuulilt.

Aparatuur andis igal ajahetkel sünkroniseeritud kirje kärbse virtuaalsest asukohast, suunast, lõhna olekust ja õhuvoolu juhtimisest. Sellest rekonstrueerisid teadlased trajektoorid, märkisid iga sisenemise ja väljumise ning mõõtsid, kui otse kärbes tagasi tuli. Tuul andis välise suunaviite; kärbse enda liikumine määras, millal ta kohtas virtuaalse lõhnapiiri üht või teist külge.



Kärbes jäi kinnitatuna õhkpadjal hõljuva kuuli kohale. Kaamera ja FicTrac teisendasid kuuli pöörlemise virtuaalseks liikumiseks ja suunaks; tarkvara pööras seejärel õhu- ja lõhnadüüsi ning lülitas lõhna virtuaalse asukoha järgi. Eraldi närvipildistamise katsetes salvestas kärbse kohal olev kahefootonmikroskoop EPG- või FC2-neuronite kaltsiumisõltuvat fluorestsentsi, võimaldades närvitegevuse käitumisega joondada. Mikroskoopi ei vajatud igas käitumiskatses.

The Clean Paper CC BY 4.0



Kontrollitud katses sisenes kärbes lühidalt virtuaalsesse lõhnakoridori, lahkus sellest, liikus lõhnavabas õhus ja tegi suunatud tagasipöörde. Käitumine toetab meeles hoitud tagasipöördumissuunda; see ei paljasta, kus seda infot talletatakse.

The Clean Paper CC BY 4.0

Põhilises **vertikaalse koridori** katses sisenesid **40 kärbest** korduvalt lõhna sisse, tegid vastupöörde lõhnast välja ja naasid samale servale. „Vertikaalne” on artikli nimetus 0-kraadisele geomeetriale: koridori pikk telg jooksis paralleelselt vastutuule suunaga. See ei tähenda, et aparaat seisis püsti.

Autorid nimetavad seda mustrit **serva jälgimiseks**. **Episood** on üks katkematu periood kahe piiriületuse vahel: seesmine episood kestab sisenemisest väljumiseni ja välimine episood väljumisest kärbse naasmiseni. 755 seesmise episoodi jooksul kestis külastus keskmiselt 4,9 sekundit. Tagasipöördumiste ajal oli keskmine kaugus piirist 10,4 millimeetrit. Vähem kui 4% 793 episoodist ületas kogu koridori kuni vastasservani.

Need kaks viimast arvu kirjeldavad episoode, mitte sadu sõltumatuid kärbseid. Eristus on oluline, sest üks loom võib anda palju episoode.

Tagasipöörded polnud lihtsalt fikseeritud vastutuulerefleks

Mitmed katsed testisid lihtsamaid seletusi.

Kõigepealt muudeti seda, mis juhtus **piki** koridori, kui kärbes kõndis vastutuult. Lõhn võis virtuaalse allika poole tugevneda, jääda konstantseks või nõrgeneda. Kärbsed tegid kõigil kolmel juhul sarnaseid radu. Lihtne reegel nagu „mine sinna, kus lõhn tugevneb” ei saa seega selles aparatuuris

servajälgimist seletada.

Seejärel muudeti koridori **külgmine** serv Gaussi profiiliga pehmemaks, nii et kontsentratsioon muutus järk-järgult, mitte ei lülitunud järsult. Kärbsed koondusid küljele, kus kontsentratsioon muutus kõige kiiremini, mitte keskossa, kus lõhn oli kõige tugevam. Seega oli oluline külgmine muutus, mis tähistas efektiivset piiri, mitte kohustuslik suurenemine koridori piki allika suunas.

See ei tähenda, et kontsentratsioonigradiendid looduses kunagi ei loe. See tähendab, et testitud tingimustes ei olnud allika poole tugevnev lõhn selle käitumise jaoks vajalik.

Teadlased muutsid ka koridori orientatsiooni. Eraldi rühmad jälgisid vertikaalset, 45-kraadist ja 90-kraadist koridori ning veel üks rühm kohtas koridori, mis hüppas pärast väljumist külgsuunas. Rühmade suurused olid vastavalt 40, 21, 20 ja 24 kärbest. Nende lõhnavälised rajad muutusid geomeetria järgi. Üldine reegel „pööra alati vastutuult" ei saa seda paindlikkust seletada.

Selles seadistuses jõudis lõhn mõlema tundlani umbes kahe millisekundi jooksul. Kahepoolse optogeneetilise aktivatsiooni sidumine tuulega suutis taastoota servajälgimise laadse mustri. **Optogeneetika** kasutab valgusele tundlikke valke valitud rakkude aktiivsuse muutmiseks. Siin viitab tulemus, et vasaku ja parema tundla lõhna saabumise erinevus polnud selle käitumise jaoks vajalik. See ei tee kahepoolset võrdlust ebaoluliseks vabalt liikuvatele loomadele teistes lõhnapilvedes.

Vektor on väiksem kui kaart

Vektor on suund koos suurusega. Kasulik salvestatud suurus oli siin peamiselt suunaline: kuhu peaks kärbes pöörduma, et jõuda lõhnapilve piirini? Uuring ei leidnud tõendeid, et kärbes talletas kogu pilve paigutuse või oma positsiooni selles.

Autorid tegid esmalt kunstlikke radu, segades päris kärbeste liikumise koostisosi. Nad võtsid juhuslikult vaadeldud jooksupikkusi ja pöördenurki ning õmblesid need kokku. Mõned sünteetilised kõndijad tabasid lõpuks lõhnapiiri uuesti, kuid ekslesid kaugemale ja valisid vähem otseseid teid kui päris kärbsed. Isegi kärbeste tavapärase vastutuult pöördumise kalduvuse lisamine ei taastanud lühikesi suunatud tagasipöördeid. Päris käitumises oli seega rohkem suunainfot kui samade liigutuste juhuslikus remiksis.

Seejärel ehitasid teadlased kahe režiimiga mudeli: **lahku piirist** ja **naase piirile**. Need režiimid ei olnud sildid igale hetkele lõhna sees või väljas. Need olid alternatiivsed roolimisreeglid, mis võisid kärbse liikumise ajal vahetuda.

Iga piiriületus andis mudelile meeldejätmiseks suuna. Väljumisel uuendas see lahkumisel kasutatavat suunda. Sisenemisel uuendas eraldi naasmissuunda: sisuliselt „kui ma piiri leidsin, liikusin selles suunas". Hilisema tagasipöörde ajal kallutas see meeles hoitud suund simuleeritud kärbse liikumist tagasi serva poole.

Teadlased sobitasid mudeli 0-, 45- ja 90-kraadiste koridoride trajektooridele. Kokkuvõtvas võrdluses andsid 72 päris kärbest ja 75 simulatsiooni sarnaseid rajaomadusi. Kui sisenemisel õpitud naasmissuund eemaldati, muutus jälgimine kõigi koridori orientatsioonide puhul vähem tõhusaks. See toetab

sisenemissuuna mälu kasulikkust; see ei tõesta, et kärbse aju sõna otseses mõttes mudeli võrrandeid käivitab.

> **Mida „mälu" selles artiklis tähendab?**
>
> Teadlased ei lugenud talletatud noolt otse kärbse ajust. „Suunamälu" on järeldus, mida toetavad käitumine, mudel ja närvimõõtmised. Mudel näitab, et paar muutuvat suunda võivad taastoota olulisi rajastatistikaid. See ei tõesta, et kärbes rakendab võrrandeid sõna-sõnalt või et üks nimetatud neuronirühm on mälu säilituskoht.

Täiendav kogemus vastassuunalise 45-kraadise lõiguga nihutas hilisemat käitumist 10 kärbsel, koos 29 mudelisimulatsiooniga. See teeb suunalise seletuse spetsiifilisemaks kui tagantjärele kirjeldus, kuid jätab selle endiselt mudelipõhiseks tõlgenduseks.

Suunareferents ja praegune eesmärk

Seejärel mõõtis ja häiris uuring aktiivsust kärbse **keskkompleksis**, navigeerimisega seotud ajupiirkonnas.

> **Kaks eri tööga signaali**
>
> EPG ja FC2 on keskkompleksi kahe neuronipopulatsiooni nimed. EPG aktiivsus käitub nagu kompassinäit: see jälgib suunda, kuhu kärbes parajasti tuule suhtes vaatab. FC2 aktiivsus on seotud suunaga, kuhu kärbes püüab liikuda. Allavoolu juhtimisahel saab võrrelda praegust suunda eesmärgiga. Uuring testib mõlemat populatsiooni, kuid ei näita, et üks neist üksi talletaks kogu mälu.

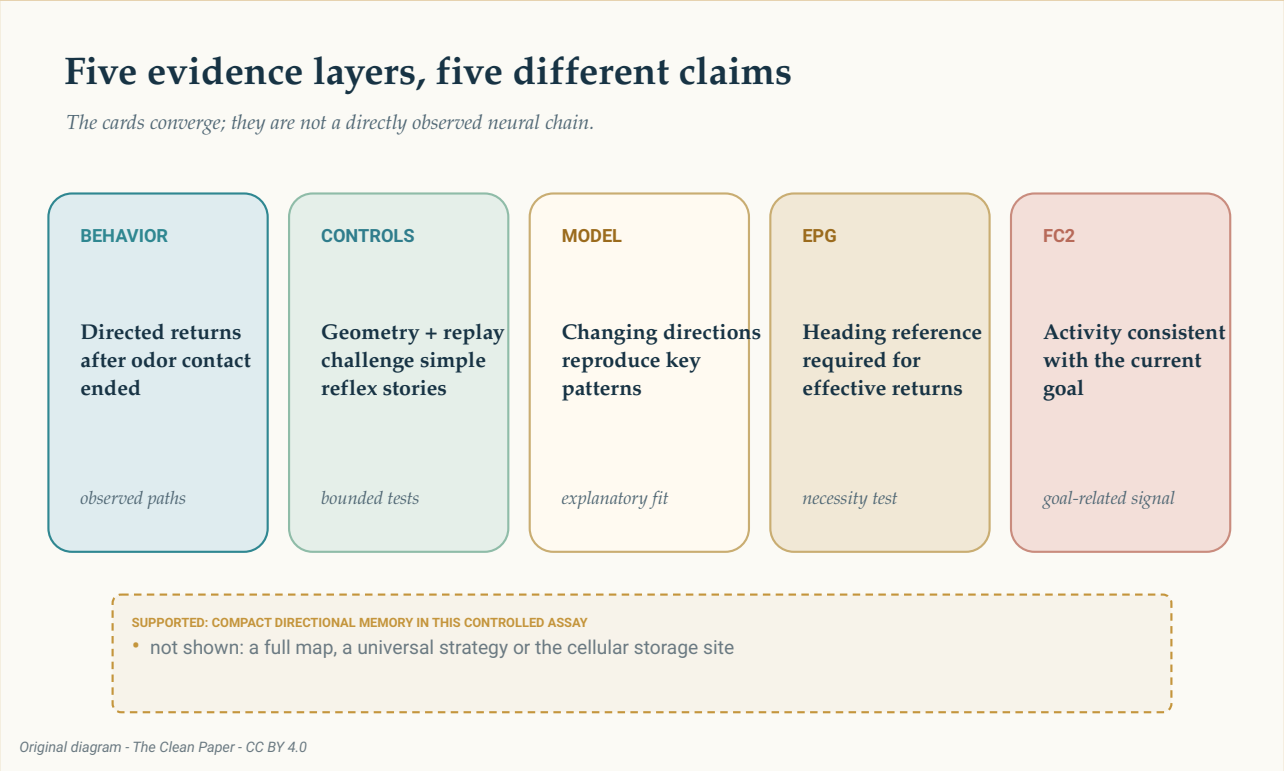
EPG-neuronid kannavad suunasignaali: nende aktiivsusmuster jälgib kärbse suunda välise viite suhtes. Kaltsiumpildistamise, närvitegevuse kaudse optilise näidu abil leidsid teadlased, et EPG aktiivsuse faas järgis servajälgimise ajal suunda tuule suhtes. See analüüs kasutas 16 katset 9 kärbselt.

EPG-neuronite pärssimiseks muutsid teadlased need geneetiliselt ekspresseerima **GtACR1**-i, anioonkanalit, mis lülitub rohelise valgusega sisse. LED jäi kogu testkatse jooksul põlema, aktiveerides kanali ja surudes valitud neuroneid maha; sama valgustus ei kahjustanud geneetilise kontrollrühma kärbeste käitumist.

Kui EPG-neuronid sel viisil pärsiti, tegid 12 katselist kärbest vähem tõhusaid suunatud tagasipöördeid kui 6 geneetilise kontrollrühma kärbest. Piiratud järeldus on, et EPG aktiivsuse kantud suunareferents oli testitud tingimustes tõhusaks servajälgimiseks vajalik. See pole tõend, et EPG-neuronid üksi talletasid piirisuuna.

FC2-neuronid näitasid teistsugust seost. Nende populatsiooniaktiivsus oli seotud praeguse navigeerimiseesmärgiga ja osutas katses enne pöördeid lõhnapilve piiri poole. Pildistamisel kasutati 6 kärbest

ning vaigistamise võrdlustes olenevalt analüüsist 9 kuni 14 kärbse suuruseid rühmi. Vaigistamine kahjustas servajälgimist.



Käitumine, muudetud lõhnapilve geomeetria, sobitatud mudel ja kaks närvisüsteemi häirimiskatset toetavad suunamälu seletuse eri osi. Koos toetavad need selles kontrollitud katses kompaktset eesmärgisuunda, mitte täielikku kaarti või tõestatud rakulist mälukohta.

The Clean Paper CC BY 4.0

See on koonduv tõendus, mitte pildistatud põhjuslik ahel. EPG aktiivsus pakkus vajalikku suunareferentsi. FC2 aktiivsus sobis eesmärgisuunaga ja oli tõhusaks käitumiseks vajalik. Katsed ei lokaliseerinud ühtainsat mälu „engrammi” ega tõestanud, et FC2 sünapsid füüsiliselt suunda talletasid.

Ligikaudse inimliku analoogiana kujutage ette, et astute kitsast udupangast välja, samal ajal kui püsiv tuul ütleb endiselt, kus on põhi. Kompass võib öelda, kuhu te vaatate, kuid udu juurde naasmine nõuab ka meeles hoitud suunda selle servale. Praeguse suuna võrdlemine soovitud suunaga ütleb, kuhu pöörata. Sellist tööjaotust viitavad siin EPG- ja FC2-signaalid. See on selgitav analoogia, mitte tõend, et inimesed kasutavad samu rakke või algoritmi.

Mälu sõltus tegevusest, mitte ainult lõhna ajastusest

Taasesituskatses said kärbsed sama lõhnaajastuste jada nagu varem, kuid ajastus ei olnud enam seotud sellega, mida nad parasjagu tegid. Õpitud suunanihe nõrgenes järjestikuste taasesitusepisoodide jooksul. See toetab **operantset**, tegevusega seotud uuendust: tähtis polnud ainult passiivne kokkupuude lõhnajadaga, vaid lõhna ja kärbse liikumise suhe.

Nimetaja muutub nende analüüside vahel. Extended Data paneelides on sõltuvalt võrdlusest 8 või 9 kärbest; järjestikuste episoodide seeria kasutab 8 kärbest; trajektooripaneelid nõuavad vähemalt 10 efektiivset sisenemist; ning paarismudeli paneelid kasutavad 21 simuleeritud trajektoori, mis samuti täidavad sisenemislävendi. Need pole üks ühendatud kaheksa kärbse valim.

Ebakorrapärasem lõhnapilv oli kasulik, kuid endiselt virtuaalne

Teadlased taasesitasid ka varem salvestatud ebakorrapärasemat lõhnapilve. Nad suurendasid seda ruumis ja ajas viis korda, et kinnitatud kärbsed kohtaksid seda piisavalt sageli. **Kümme kärbest 12-st** jõudis allikale 50 virtuaalse millimeetri kaugusele.

See pole kümme kärbest, kes leidsid päris allika vabas õhus. See on jõudlus looduslähedase lõhnapilve kontrollitud taasesituses.

Iga dünaamilise lõhnapilve tüübi jaoks genereeris mudel 2 000 trajektoori. Suurendatud pilve võrdlus analüüsis neist 2 000-st 1 850, pärast efektiivse sisenemise nõuet ja allikale liiga lähedalt alanud trajektooride väljajätmist. Mälu aitas rohkem allika lähedal, kus järjestikused kohtumised säilitasid koherentse suunastruktuuri, ja vähem turbulentsemas piirkonnas kaugemal allatuult.

See kvalifikatsioon on osa tulemusest. Kompaktne suund saab aidata ainult siis, kui maailm jääb piisavalt koherentseks, et eelmine kohtumine ütleks järgmise kohta midagi kasulikku.

Mida uuring ei näita

- See **ei näita**, et kärbes ehitab täieliku ruumilise kaardi.
- See **ei näita** vaba lendu muutmata looduslikus lõhnapilves.
- See **ei tõesta**, et kogu lõhnajuhitud navigeerimine kasutab seda strateegiat.
- See **ei näita**, et EPG- või FC2-neuronid on mälu ainus füüsiline säilituskoht.
- See **ei muuda** sobitatud mudelit kärbse sõnasõnaliseks bioloogiliseks algoritmiks.
- See **ei üldistu** otse inimese navigeerimisele.

Uuring on tugevaim seal, kus see on kõige spetsiifilisem. Suletud ahelaga juhtimine andis teadlastele täpse ligipääsu igale lõhnakohtumisele. Geomeetria muutused, taasesitus, modelleerimine, kaltsiumpildistamine ja vaigistamine testisid seejärel ühe seletuse eri osi. Kuid käitumis-, pildistus- ja vaigistamiskohordid olid eraldi; valimisuurusi ei määratud ette; andmekogumist ja analüüsi ei randomiseeritud ega pimendatud; ning vähem kui 10% kinnitatud kärbestest jäeti välja kohanemise, reageerimise või jälgimisprobleemide tõttu.

Need piirangud ei kustuta nähtust. Need määratlevad selle.

Lühidalt

Virtuaalses lõhnakoridoris kõndivad kinnitatud äädikakärbsed naasid korduvalt piirile pärast lõhna selja taha jätmist. Kontsentratsiooni ja koridori geomeetria muutused, sobitatud vahetuva režiimiga mudel, närvipildistamine ja optogeneetiline vaigistamine toetavad seletust, mille kohaselt kasutab kärbes täieliku kaardi asemel kompaktset meeles hoitud suunda. EPG-neuronid andsid vajaliku suunareferentsi, samal ajal kui FC2 aktiivsus sobis praeguse eesmärgisuunaga. Tulemus piirdub kontrollitud kõndimiskatsega; see ei tuvasta mälu rakulist säilituskohta ega näita sama arvutust vabas looduslikus lennus.

Ilustamata kontroll

Mida artikkel näitab: Suletud ahelaga kinnitatud kärbse katses tegid kärbsed suunatud tagasipöördeid virtuaalsetele lõhnapiiridele, mida nad enam tajuda ei saanud. Mitmed käitumiskontrollid, modelleerimine ja närvisüsteemi häirimised toetavad vektoripõhist strateegiat.

Mida järeldatakse: Et käitumine kasutab kompaktset suunamälu ja et FC2-populatsiooni aktiivsus esindab praegust navigeerimiseesmärki. Mälu sisu ei loetud otse.

Mida see ei näita: Täielikku mentaalset kaarti, universaalset lõhnanavigeerimise strateegiat, vaba lennu jõudlust looduslikus lõhnapilves, ühtainust mälu säilituskohta ega inimese analoogi.

Peamised piirangud: Üks liik ja kontrollitud aparatuur; eri kärbsekohordid ja analüüsiühikud katsete vahel; kaudsed kaltsiumisignaalid; vajalikkuse testid, mis ei tõesta piisavust; ning looduslähedane lõhnapilv, mida taasesitati ja skaleeriti.

Kui palju peaks tavalugeja seda usaldama? Kõrge kindlus, et suunatud tagasipöördumise nähtus on selles aparatuuris reaalne ning et suuna- ja eesmärgiga seotud keskkompleksi aktiivsus loeb. Mõõdukas kindlus mudeli kui kompaktse seletuse suhtes. Madal kindlus mistahes väite suhtes, mis laiendab selle muutmata kujul avatud õhku või nimetab seda täielikuks kaardiks.

Allikad

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