The Clean Paper

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

Muša var pazaudēt smaržu un tomēr pagriezties atpakaļ. Virtuālā smaržas plūsmā palīdzēja atcerēts virziens

Piestiprinātas augļu mušas pēc iešanas tīrā gaisā atkārtoti atgriezās pie smaržas robežas. Uzvedība, modelēšana un nervu sistēmas perturbācijas atbalsta kompaktu virziena atmiņu, nevis pilnīgu karti. Rezultāts iegūts kontrolētā virtuālās realitātes testā un vēl neparāda to pašu stratēģiju brīvā dabiskā lidojumā.

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

Muša var pazaudēt smaržu un tomēr pagriezties atpakaļ tās virzienā

Muša smaržu bija atstājusi aiz sevis.

Tā turpināja iet caur tīru gaisu, dažkārt desmitiem sekunžu un simtiem virtuālu milimetru. Tad tā pagriezās robežas virzienā, kuru bija šķērsojusi, un atkal atrada smaržu. Tajā brīdī pati smarža vairs nevarēja norādīt ceļu atpakaļ.

Tas ir centrālais novērojums jaunā Nature pētījumā par augļu mušu navigāciju. Pētnieki argumentē, ka mušas izmantoja kompaktu virziena atmiņu: ne visas smaržas plūsmas karti un ne atmiņu par noieto attālumu, bet gan atcerētu virzienu uz robežu, kuru vairs nevarēja uztvert.

Rezultāts ir iespaidīgs, jo parāda, cik maz saglabātas informācijas var būt pietiekami. To ir arī viegli pārspīlēt. Šīs mušas brīvi nelidoja pa dabisku ainavu. Tās gāja, piestiprinātas pie vietas uz gaisa balstītas lodītes stingri kontrolētā virtuālā pasaulē. Pētījums atbalsta uz vektoru balstītu stratēģiju šajā iekārtā; tas neparāda, ka mušas veido mentālas kartes, neizskaidro visus veidus, kā dzīvnieki seko smaržām, un nenosaka šūnas, kurās atmiņa fiziski tiek glabāta.

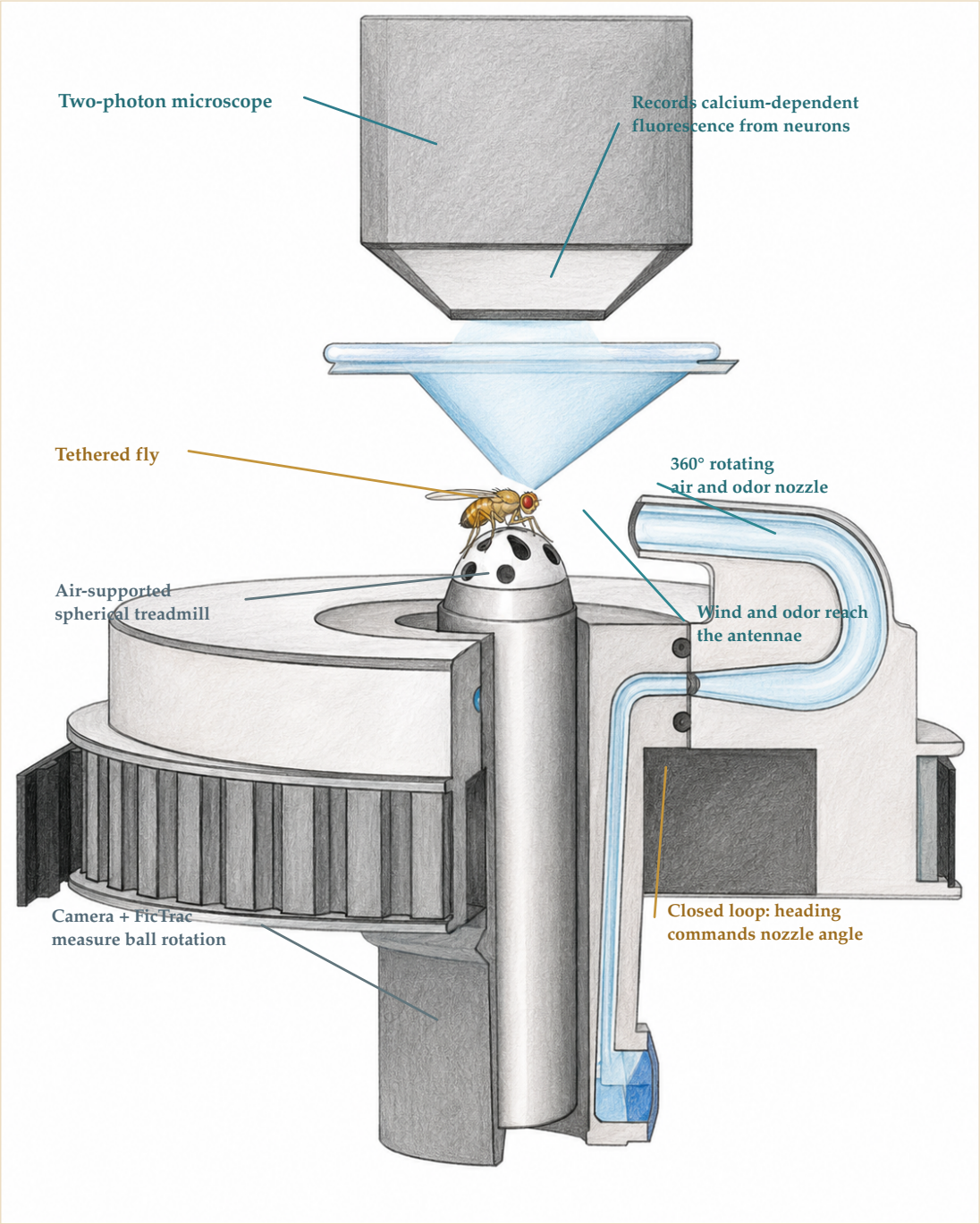
Neredzamo koridoru izveidoja programmatūra

Smaržas plūsma ir gaisa nests reģions, kurā atrodas smaržvielas. Dabā šāda plūsma vējam mainoties izliecas, sadalās un atkal savienojas. Tāpēc ir grūti precīzi zināt, ko dzīvnieks katrā brīdī sajuta.

Pētnieki problēmu padarīja kontrolējamu ar **slēgta cikla virtuālo realitāti**. Mušas ķermenis bija piestiprināts vienā vietā virs vieglas lodītes, kas peldēja uz gaisa. Mušai ejot, kamera aptuveni 60 reizes sekundē mērīja lodītes rotāciju. Programmatūra šo rotāciju pārvērta virtuālā divdimensiju pozīcijā un virzienā.

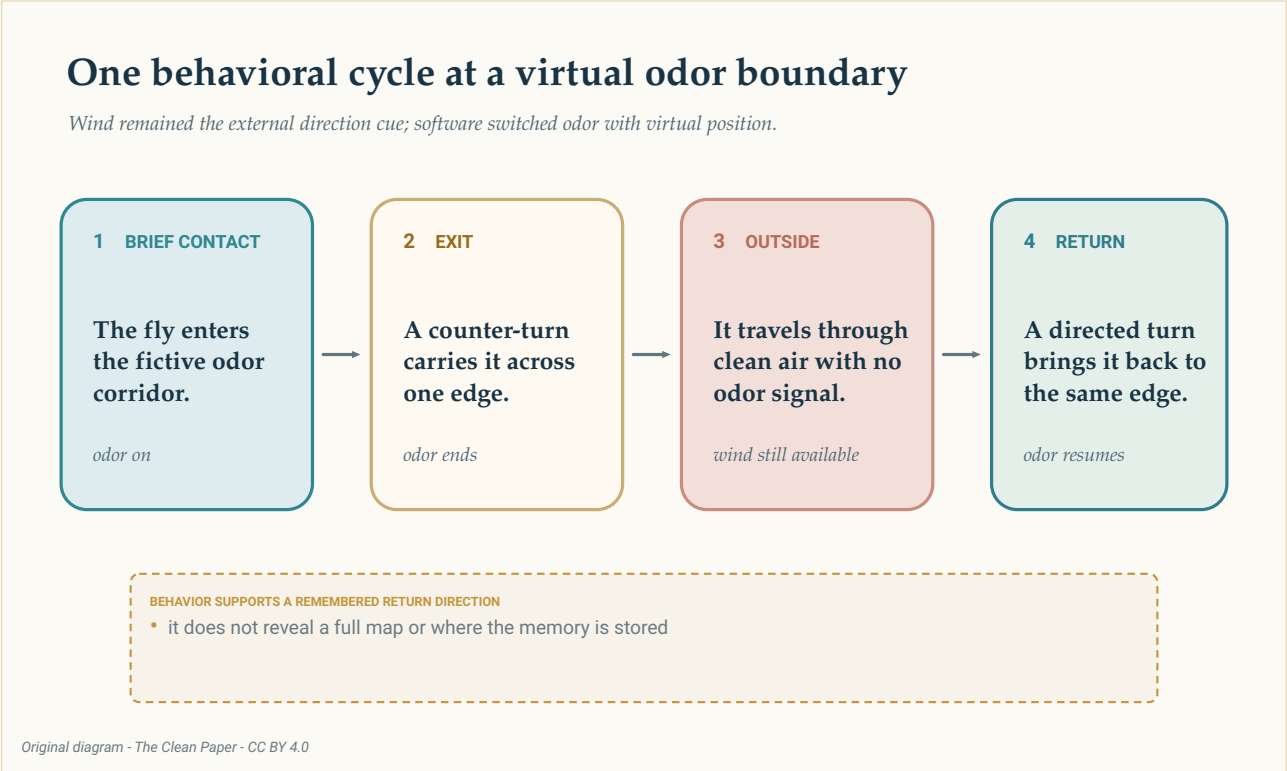
Šis virziens vadīja motorizētu sprauslu, kas varēja griezties par 360 grādiem. Mušai mainot virtuālo virzienu, sprausla pārvietojās tai apkārt, lai vējš paliktu saskaņots ar stabilu virzienu mušas virtuālajā pasaulē. Vienlaikus masas plūsmas kontrolieri atkarībā no mušas virtuālās pozīcijas mainīja, cik daudz tīra gaisa vai ābolu sidra etiķa smaržas sasniedza antenas. Tādējādi programmatūrā definētas robežas šķērsošana ieslēdza vai izslēdza smaržu, radot fiktīvu 50 milimetrus platu un vienu metru garu koridoru, lai gan muša nekad neatstāja lodīti.

Iekārta katrā laika punktā sinhroni reģistrēja mušas virtuālo pozīciju, virzienu, smaržas stāvokli un gaisa plūsmas vadību. No šī ieraksta pētnieki rekonstruēja trajektorijas, atzīmēja katru ieiešanu un iziešanu un izmērīja, cik tieši muša atgriezās. Vējš nodrošināja ārējo virziena orientieri; pašas mušas kustība noteica, kad tā sastapa vienu vai otru virtuālās smaržas robežas malu.



Muša palika piestiprināta virs gaisa balstītas lodītes. Kamera un FicTrac pārvērta lodītes rotāciju virtuālā kustībā un virzienā; programmatūra pēc tam pagrieza gaisa un smaržas sprauslu un ieslēdza vai izslēdza smaržu atkarībā no virtuālās pozīcijas. Atsevišķos nervu attēlveidošanas izmēģinājumos divfotonu mikroskops virs mušas reģistrēja no kalcija atkarīgu fluorescenci EPG vai FC2 neironos, ļaujot nervu aktivitāti piesaistīt uzvedībai. Mikroskops nebija vajadzīgs katram uzvedības izmēģinājumam.

The Clean Paper CC BY 4.0



Kontrolētajā testā muša īsi iegāja virtuālajā smaržas koridorā, iznāca no tā, pārvietojās gaisā bez smaržas un veica virzītu atgriešanos. Uzvedība atbalsta atcerētu atgriešanās virzienu; tā neatklāj, kur šī informācija tiek glabāta.

The Clean Paper CC BY 4.0

Galvenajā **vertikālā koridora** eksperimentā **40 mušas** atkārtoti iegāja smaržā, ar pretpagriezienu iznāca no tās un atgriezās pie tās pašas malas. „Vertikāls” ir darba nosaukums 0 grādu ģeometrijai: koridora garenass bija paralēla virzienam pret vēju. Tas nenozīmē, ka iekārta stāvēja vertikāli.

Autori šo rakstu sauc par **malas izsekošanu**. **Epizode** ir viens nepārtraukts periods starp robežas šķērsojumiem: iekšējā epizode ilgst no ieiešanas līdz iziešanai, ārējā — no iziešanas līdz mušas atgriešanās brīdim. 755 iekšējās epizodēs apmeklējums ilga vidēji 4,9 sekundes. Atgriešanās laikā vidējais attālums no robežas bija 10,4 milimetri. Mazāk nekā 4% no 793 epizodēm šķērsoja visu koridoru līdz pretējai malai.

Pēdējie divi skaitļi apraksta epizodes, nevis simtiem neatkarīgu mušu. Tas ir svarīgi, jo viens dzīvnieks var dot daudzas epizodes.

Atgriešanās nebija tikai fiksēts reflekss griezties pret vēju

Vairāki eksperimenti pārbaudīja vienkāršākus skaidrojumus.

Vispirms pētnieki mainīja to, kas notika **gar** koridoru, mušai ejot pret vēju. Smarža virtuālā avota virzienā varēja kļūt stiprāka, palikt nemainīga vai kļūt vājāka. Visos trīs gadījumos mušas veidoja līdzīgas trajektorijas. Tāpēc vienkāršs noteikums „turpini tur, kur smarža kļūst stiprāka” nevar izskaidrot

malas izsekošanu šajā iekārtā.

Pēc tam koridora **sānu** mala tika padarīta gludāka ar Gausa profilu, kurā koncentrācija mainījās pakāpeniski, nevis pēkšņi pārslēdzās. Mušas pulcējās pie malas, kur koncentrācija mainījās visstraujāk, nevis centrā, kur smarža bija visstiprākā. Tātad svarīgs orientieris bija sānu izmaiņa, kas apzīmēja efektīvu robežu, nevis obligāti nepieciešams koncentrācijas pieaugums avota virzienā gar koridoru.

Tas nenozīmē, ka koncentrācijas gradientiem dabā nekad nav nozīmes. Tas nozīmē, ka pārbaudītajos apstākļos šai uzvedībai pieaugums avota virzienā nebija nepieciešams.

Pētnieki mainīja arī koridora orientāciju. Atsevišķas grupas izsekoja vertikālus, 45 grādu un 90 grādu koridorus, bet vēl viena grupa sastapa koridoru, kas pēc iziešanas pārlēca sānis. Grupās bija attiecīgi 40, 21, 20 un 24 mušas. To ārējās trajektorijas mainījās līdz ar ģeometriju. Vispārīgs noteikums „vienmēr griezies pret vēju" nevar izskaidrot šo elastību.

Šajā iekārtā smarža abas antenas sasniedza aptuveni divu milisekunžu laikā. Divpusējas optoģenētiskas aktivācijas savienošana ar vēju spēja reproducēt malas izsekošanai līdzīgu rakstu. **Optoģenētika** izmanto gaismas jutīgus proteīnus, lai mainītu atlasītu šūnu darbību. Šeit rezultāts liek domāt, ka atšķirība smaržas ierašanās laikā kreisajā un labajā pusē šai uzvedībai nebija nepieciešama. Tas nepadara divpusēju salīdzināšanu nebūtisku brīvi kustīgiem dzīvniekiem citās smaržas plūsmās.

Vektors ir mazāks par karti

Vektors ir virziens kopā ar lielumu. Šeit noderīgā saglabātā informācija galvenokārt bija virziens: uz kuru pusi mušai jāpagriežas, lai sasniegtu smaržas robežu? Pētījums neatrada pierādījumus, ka muša glabātu pilnu plūsmas izkārtojumu vai savu atrašanās vietu tajā.

Autori vispirms izveidoja mākslīgas trajektorijas, samaisot īsto mušu kustību sastāvdaļas. Viņi nejauši izvēlējās novērotos skrējienu garumus un pagrieziena leņķus un salika tos kopā. Daži no šiem sintētiskajiem gājējiem galu galā atkal sasniedza smaržas robežu, bet klīda tālāk un izmantoja mazāk tiešus ceļus nekā īstās mušas. Pat mušu parastās tieksmes griezties pret vēju pievienošana neatveidoja īsās, virzītās atgriešanās. Tātad īstajā uzvedībā bija vairāk virziena informācijas nekā to pašu kustību nejaušā pārkārtojumā.

Pēc tam pētnieki izveidoja modeli ar diviem režīmiem: **atstāt robežu** un **atgriezties pie robežas**. Šie režīmi nebija etiķetes katram mirklim smaržas iekšpusē vai ārpusē. Tie bija alternatīvi stūrēšanas noteikumi, starp kuriem varēja pārslēgties mušas kustības laikā.

Katrs robežas šķērsojums modelim deva virzienu, ko atcerēties. Izejot tas atjauninājа virzienu, ko izmantoja attālinoties. Ieejot tas atjauninājа atsevišķu atgriešanās virzienu: būtībā „kad atradu robežu, es kustējos šajā virzienā". Vēlākas atgriešanās laikā šis atcerētais virziens novirzīja simulētās mušas kustību atpakaļ uz malu.

Pētnieki pielāgoja modeli trajektorijām 0, 45 un 90 grādu koridoros. Kopsavilkuma salīdzinājumā 72 īstas mušas un 75 simulācijas radīja līdzīgu trajektoriju statistiku. Kad tika izņemts pie ieiešanas

iemācītais atgriešanās virziens, izsekošana kļuva mazāk efektīva visās koridora orientācijās. Tas atbalsta ieiešanas virziena atmiņas lietderību; tas nepierāda, ka mušas smadzenes burtiski izpilda modeļa vienādojumus.

> **Ko šajā darbā nozīmē „atmiņa"?**
>
> Pētnieki nenolasīja saglabātu bultu tieši no mušas smadzenēm. „Virziena atmiņa" ir secinājums, ko atbalsta uzvedība, modelis un nervu mērījumi. Modelis saka, ka daži mainīgi virzieni spēj reproducēt svarīgu trajektoriju statistiku. Tas nepierāda, ka muša vienādojumus īsteno burtiski vai ka viena nosaukta neironu grupa ir glabāšanas vieta.

Papildu pieredze ar pretēji orientētu 45 grādu segmentu mainīja vēlāko uzvedību 10 mušām, salīdzinot arī ar 29 modeļa simulācijām. Tas padara virziena skaidrojumu konkrētāku par post hoc aprakstu, vienlaikus saglabājot to kā modelī balstītu interpretāciju.

Virziena atskaite un pašreizējais mērķis

Pēc tam pētījumā mērīja un traucēja aktivitāti mušas **centrālajā kompleksā** — smadzeņu reģionā, kas iesaistīts navigācijā.

> **Divi signāli ar atšķirīgiem uzdevumiem**
>
> EPG un FC2 ir divu neironu populāciju nosaukumi centrālajā kompleksā. EPG aktivitāte darbojas kā kompasa rādījums: tā izseko virzienu, kurā muša pašlaik skatās attiecībā pret vēju. FC2 aktivitāte ir saistīta ar virzienu, kurā muša cenšas pārvietoties. Lejupēja stūrēšanas ķēde var salīdzināt pašreizējo virzienu ar šo mērķi. Pētījums pārbauda abas populācijas, bet neparāda, ka kāda no tām viena pati glabātu visu atmiņu.

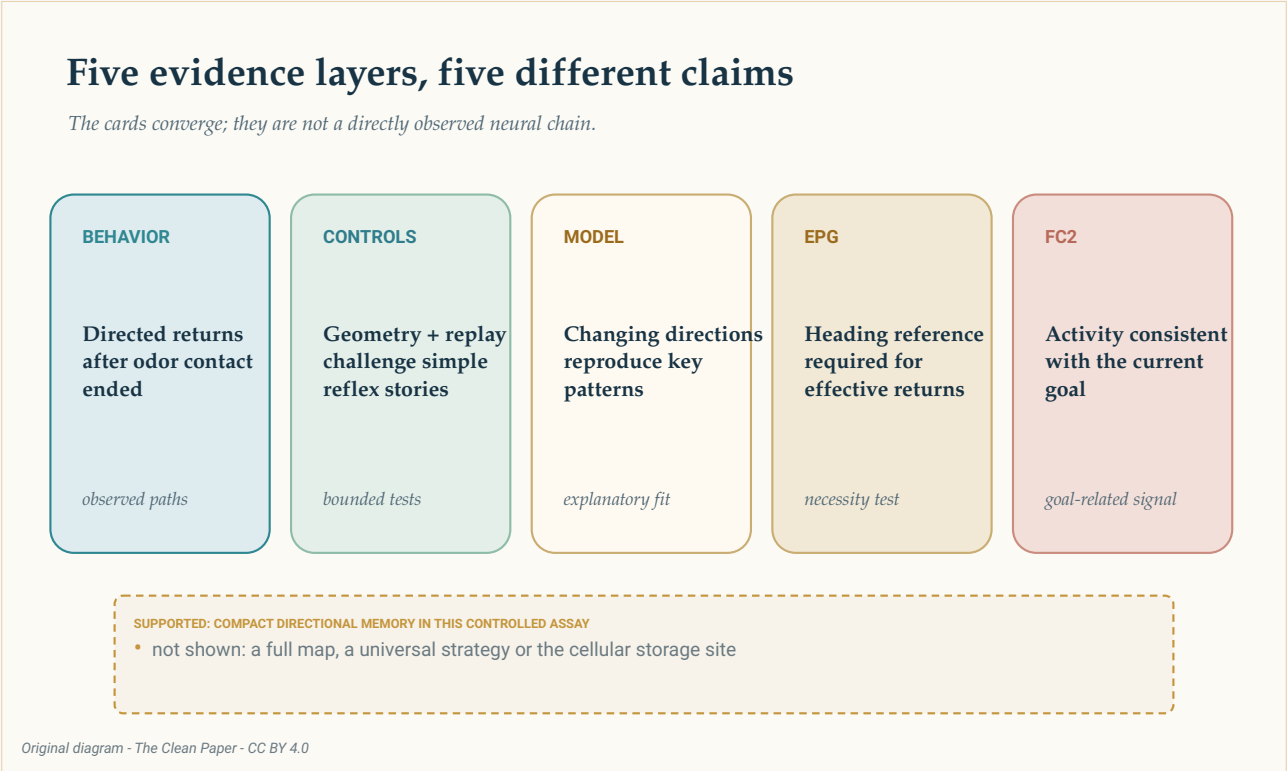
EPG neironi nes virziena signālu: to aktivitātes raksts izseko virzienu, kurā muša skatās attiecībā pret ārēju orientieri. Izmantojot kalcija attēlveidošanu — netiešu optisku nervu aktivitātes nolasījumu —, pētnieki atrada, ka EPG aktivitātes fāze malas izsekošanas laikā sekoja virzienam attiecībā pret vēju. Šajā analīzē bija 16 izmēģinājumi no 9 mušām.

Lai inhibētu EPG neironus, pētnieki tos ģenētiski modificēja, lai tie ekspresētu **GtACR1** — anjonu kanālu, ko ieslēdz zaļa gaisma. LED palika ieslēgta visa testa laikā, aktivējot kanālu un nomācot atlasītos neironus; tāds pats apgaismojums nepasliktināja ģenētiskās kontroles mušu uzvedību.

Kad EPG neironi šādi tika inhibēti, 12 eksperimentālās mušas veica mazāk efektīvas virzītas atgriešanās nekā 6 ģenētiskās kontroles mušas. Ierobežotais secinājums ir tāds, ka EPG aktivitātes nodrošinātā virziena atskaite bija vajadzīga efektīvai malas izsekošanai pārbaudītajos apstākļos. Tas nav pierādījums, ka EPG neironi vieni paši glabātu robežas virzienu.

FC2 neironiem bija cita saistība. To populācijas aktivitāte bija saistīta ar pašreizējo navigācijas mērķi

un pirms pagriezieniem testā norādīja plūsmas robežas virzienā. Attēlveidošanā piedalījās 6 mušas, bet nomākšanas salīdzinājumos atkarībā no analīzes bija 9 līdz 14 mušas. Nomākšana pasliktināja malas izsekošanu.



Uzvedība, mainīta plūsmas ģeometrija, pielāgots modelis un divas nervu perturbācijas atbalsta dažādas virziena atmiņas skaidrojuma daļas. Kopā tās atbalsta kompaktu mērķa virzienu šajā kontrolētajā testā, nevis pilnu karti vai pierādītu šūnu līmeņa glabāšanas vietu.

The Clean Paper CC BY 4.0

Tie ir savstarpēji konverģējoši pierādījumi, nevis nofotografēta cēloņsakarības ķēde. EPG aktivitāte nodrošināja nepieciešamu virziena atskaiti. FC2 aktivitāte bija saderīga ar mērķa virzienu un bija vajadzīga efektīvai uzvedībai. Eksperimenti neatrada vienu atmiņas „engrammu” un nepierādīja, ka FC2 sinapses fiziski glabā virzienu.

Kā aptuvenu cilvēka mēroga analoģiju iedomājieties, ka izkāpjat no šauras miglas joslas, bet vienmērīgs vējš joprojām norāda, kur ir ziemeļi. Kompass var pateikt, uz kuru pusi skatāties, taču, lai atgrieztos miglā, vajadzīgs arī atcerēts virziens uz tās malu. Pašreizējā virziena salīdzināšana ar vēlamo virzienu pasaka, uz kuru pusi pagriezties. Tieši šādu darba dalījumu šeit ierosina EPG un FC2 signāli. Tā ir skaidrojoša analoģija, nevis pierādījums, ka cilvēki izmanto tās pašas šūnas vai algoritmu.

Atmiņa bija atkarīga no darbības, nevis tikai smaržas laika secības

Atkārtojuma eksperimentā mušas saņēma to pašu smaržas laika secību kā iepriekš, bet tās laiks vairs nebija saistīts ar to, ko muša konkrētajā brīdī darīja. Iemācītā virziena nosliece atkārtojuma epizodēs vājinājās. Tas atbalsta **operantu**, ar darbību saistītu atjaunināšanu: svarīga nebija tikai pasīva pakļaušana smaržas secībai, bet gan attiecība starp smaržu un mušas kustību.

Šo analīžu saucēji mainās. Extended Data paneļos atkarībā no salīdzinājuma ir 8 vai 9 mušas; secīgo epizožu sērijā ir 8 mušas; trajektoriju paneļiem vajag vismaz 10 efektīvas ieiešanas; savukārt pārī salīdzinātajos modeļa paneļos ir 21 simulēta trajektorija, kas arī atbilst šim ieiešanu slieksnim. Tas nav viens kopējs astoņu mušu paraugs.

Neregulārāka plūsma bija noderīga, bet joprojām virtuāla

Pētnieki atkārtoja arī iepriekš ierakstītu, neregulārāku plūsmu. Viņi to telpā un laikā palielināja pieckārtīgi, lai piestiprinātās mušas to varētu sastapt pietiekami bieži. **Desmit no 12 mušām** nonāca 50 virtuālu milimetru attālumā no tās avota.

Tas nav desmit mušu panākums, atrodot īstu avotu atklātā gaisā. Tā ir veiktspēja kontrolētā, naturālistiskas plūsmas atkārtojumā.

Katram dinamiskās plūsmas tipam modelis ģenerēja 2 000 trajektoriju. Palielinātās plūsmas salīdzinājumā tika analizētas 1 850 no šīm 2 000 pēc prasības par efektīvu ieiešanu un trajektoriju izslēgšanas, ja tās sākās pārāk tuvu avotam. Atmiņa vairāk palīdzēja pie avota, kur secīgi sastapšanās brīži saglabāja koherentu virziena struktūru, un mazāk — turbulentākajā reģionā tālāk pa vējam.

Šī kvalifikācija ir daļa no rezultāta. Kompakts virziens var palīdzēt tikai tad, ja pasaule saglabājas pietiekami koherenta, lai iepriekšējā sastapšanās kaut ko noderīgu pateiktu par nākamo.

Ko pētījums neparāda

- Tas **neparāda**, ka muša veido pilnīgu telpisku karti.
- Tas **neparāda** brīvu lidojumu caur nemodificētu dabisku smaržas plūsmu.
- Tas **nepierāda**, ka visa uz smaržu balstītā navigācija izmanto šo stratēģiju.
- Tas **neparāda**, ka EPG vai FC2 neironi ir ekskluzīva atmiņas fiziskā glabāšanas vieta.
- Tas **nepadara** pielāgoto modeli par mušas burtisko bioloģisko algoritmu.
- Tas **nav** tieši vispārināms uz cilvēka navigāciju.

Pētījums ir visstiprākais tur, kur tas ir viskonkrētākais. Slēgta cikla kontrole deva pētniekiem precīzu piekļuvi katrai smaržas sastapšanai. Ģeometrijas maiņa, atkārtojums, modelēšana, kalcija attēlvei-

došana un neironu nomākšana pēc tam pārbaudīja dažādas viena skaidrojuma daļas. Taču uzvedības, attēlveidošanas un nomākšanas kohortas bija atsevišķas; paraugu lielumi iepriekš nebija noteikti; datu vākšana un analīze nebija randomizēta vai akla; un mazāk nekā 10% piestiprināto mušu tika izslēgtas aklimatizācijas, reakcijas vai izsekošanas problēmu dēļ.

Šie ierobežojumi fenomenu neizdzēš. Tie to definē.

Īss kopsavilkums

Piestiprinātas augļu mušas, kas gāja caur virtuālu smaržas koridoru, pēc smaržas atstāšanas atkārtoti atgriezās pie robežas. Koncentrācijas un koridora ģeometrijas izmaiņas, pielāgots pārslēgšanās modelis, nervu attēlveidošana un optoģenētiska nomākšana atbalsta skaidrojumu, kurā muša izmanto kompaktu atcerētu virzienu, nevis pilnu karti. EPG neironi nodrošināja nepieciešamu virziena atskaiti, bet FC2 aktivitāte bija saderīga ar pašreizējo mērķa virzienu. Rezultāts ir ierobežots ar kontrolētu iešanas testu; tas nenosaka atmiņas šūnu glabāšanas vietu un neparāda to pašu aprēķinu brīvā dabiskā lidojumā.

Bez pārspīlējumiem

Ko darbs parāda: Slēgta cikla testā piestiprinātas mušas veica virzītas atgriešanās pie virtuālām smaržas robežām, kuras vairs nevarēja sajust. Vairākas uzvedības kontroles, modelēšana un nervu perturbācijas atbalsta uz vektoru balstītu stratēģiju.

Kas ir secināts: Ka uzvedība izmanto kompaktu virziena atmiņu un ka FC2 populācijas aktivitāte attēlo pašreizējo navigācijas mērķi. Atmiņas saturs netika nolasīts tieši.

Ko tas neparāda: Pilnu mentālu karti, universālu ožas navigācijas stratēģiju, brīva lidojuma veiktspēju dabiskā plūsmā, vienu atmiņas glabāšanas vietu vai cilvēka analogu.

Galvenie ierobežojumi: Viena suga un kontrolēta iekārta; dažādas mušu kohortas un analīzes vienības dažādos eksperimentos; netieši kalcija signāli; nepieciešamības testi, kas nepierāda pietiekamību; naturālistiska plūsma, kas tika atkārtota un mērogota.

Cik lielai pārliecībai vajadzētu būt parastam lasītājam? Augstai, ka virzītas atgriešanās fenomens šajā iekārtā ir reāls un ka svarīga ir ar virzienu un mērķi saistīta centrālā kompleksa aktivitāte. Mērenai par modeli kā kompaktu skaidrojumu. Zemai par jebkuru apgalvojumu, kas to bez izmaiņām pārnes uz atklātu gaisu vai sauc par pilnīgu karti.

Avoti

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