The Clean Paper

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

Муха можа страціць пах і ўсё роўна павярнуць назад. У віртуальным шлейфе ёй дапамог запомнены кірунак

Замацаваныя пладовыя мушкі неаднаразова вярталіся да мяжы паху пасля выхаду ў чыстае паветра. Паводзіны, мадэляванне і нервовыя ўмяшанні падтрымліваюць кампактную памяць пра кірунак, а не поўную карту. Вынік атрыманы ў кантраляваным доследзе з віртуальнай рэальнасцю і пакуль не паказвае тую ж стратэгію ў свабодным натуральным палёце.

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

Муха можа страціць пах і ўсё роўна павярнуць назад да яго

Муха ўжо пакінула пах ззаду.

Яна працягвала ісці праз чыстае паветра, часам дзясяткі секунд і сотні віртуальных міліметраў. Потым паварочвала да мяжы, якую перасекла, і зноў знаходзіла пах. У гэты момант сам пах ужо не мог паказаць ёй шлях назад.

Гэта галоўнае назіранне новага даследавання ў Nature, прысвечанага навігацыі пладовых мушак. Даследчыкі сцвярджаюць, што мушкі выкарыстоўвалі кампактную памяць пра кірунак: не карту ўсяго пахавага шлейфа і не памяць пра пройдзеную адлегласць, а захаваны напрамак да мяжы, якую ўжо нельга было адчуць.

Вынік уражвае, бо паказвае, наколькі малой колькасці захаванай інфармацыі можа быць дастаткова. Але яго лёгка перабольшыць. Гэтыя мушкі не лёталі свабодна ў натуральным ландшафце. Яны ішлі, замацаваныя над шарам на паветранай падушцы, у строга кантраляваным віртуальным свеце. Даследаванне падтрымлівае вектарную стратэгію ў гэтай устаноўцы; яно не паказвае, што мухі будуюць ментальныя карты, не тлумачыць усе спосабы, якімі жывёлы ідуць за пахам, і не вызначае клеткі, у якіх фізічна захоўваецца памяць.

Нябачны калідор быў створаны праграмай

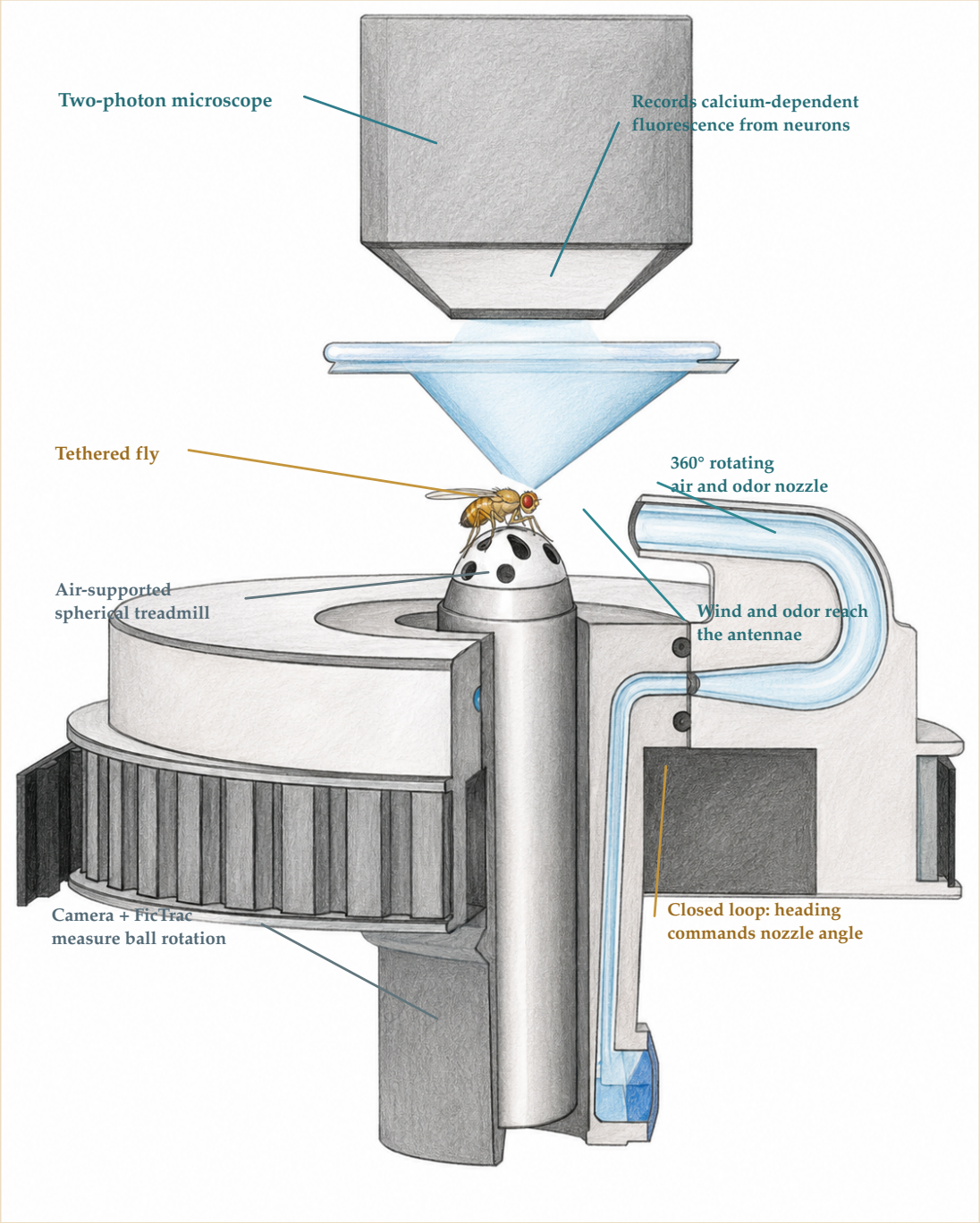
Пахавы шлейф — гэта вобласць паху, якую пераносіць паветра. На адкрытай мясцовасці шлейф выгінаецца, распадаецца і зноў злучаецца па меры змены ветру. Таму цяжка дакладна ведаць, што жывёла адчувала ў кожны момант.

Даследчыкі зрабілі задачу кіраванай з дапамогай **віртуальнай рэальнасці з замкнёнай зваротнай сувяззю**. Цела мушкі было замацавана на месцы над лёгкім шарам, які плаваў на паветранай падушцы. Калі мушка ішла, камера вымярала кручэнне шара прыкладна 60 разоў за секунду. Праграма ператварала гэтае кручэнне ў віртуальнае двухмернае становішча і кірунак.

Гэты кірунак кіраваў матарызаваным соплам, якое магло паварочвацца на 360 градусаў. Калі мушка змяняла віртуальны напрамак, сопла рухалася вакол яе, каб вецер заставаўся выраўнаваны са стабільным кірункам у яе віртуальным свеце. Адначасова рэгулятары масавага патоку змянялі колькасць чыстага паветра або паху яблычнага воцату, што дасягаў вусікаў, паводле віртуальнага становішча мушкі. Перасячэнне праграмна зададзенай мяжы такім чынам уключала або выключала пах, утвараючы ўяўны калідор шырынёй 50 міліметраў і даўжынёй адзін метр, хоць мушка ніколі не пакідала шар.

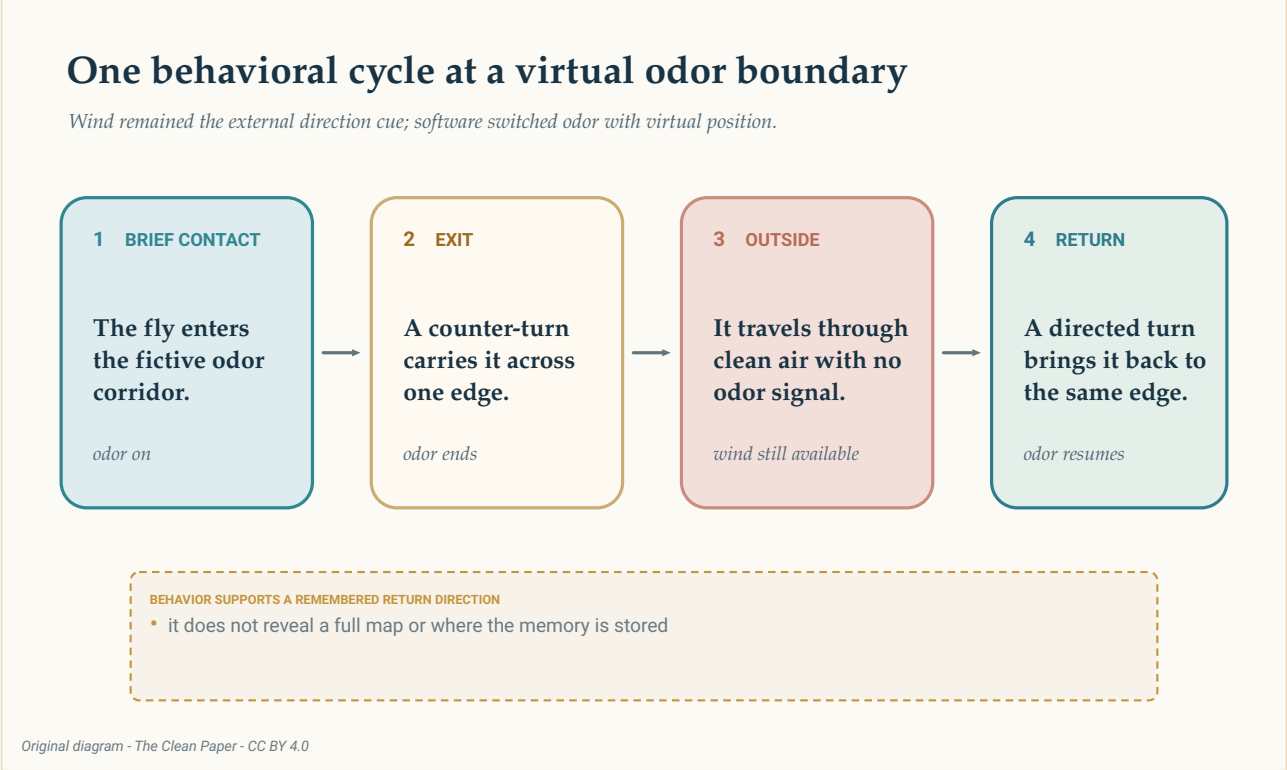
Устаноўка стварала сінхранізаваны запіс віртуальнага становішча мушкі, яе кірунку,

стану паху і параметраў паветранага патоку ў кожны момант. З гэтага запісу даследчыкі аднаўлялі траекторыі, адзначалі кожны ўваход і выхад і вымяралі, наколькі прамым быў зварот. Вецер даваў знешнюю апорную вось; уласны рух мушкі вызначаў, калі яна сустракала той ці іншы бок віртуальнай мяжы паху.



Мушка заставалася замацаванай над шарам на паветранай падушцы. Камера і FicTrac ператваралі кручэнне шара ў віртуальны рух і кірунак; затым праграма паварочвала сопла паветра і паху і пераключала пах паводле віртуальнага становішча. Падчас асобных доследаў з нейравізуалізацыяй двухфатонны мікраскоп над мушкай запісваў залежную ад кальцыю флуарэсцэнцыю нейронаў EPG або FC2, што дазваляла супаставіць нервовую актыўнасць з паводзінамі. Мікраскоп не быў патрэбны ў кожным паводзінскім доследзе.

The Clean Paper CC BY 4.0



У кантраляваным доследзе мушка ненадоўга ўваходзіла ў віртуальны пахавы калідор, пакідала яго, рухалася праз паветра без паху і мэтанакіравана вярталася. Паводзіны падтрымліваюць ідэю запомненага кірунку вяртання, але не паказваюць, дзе захоўваецца гэтая інфармацыя.

The Clean Paper CC BY 4.0

У галоўным эксперыменце з **вертыкальным калідорам 40 мушак** неаднаразова ўваходзілі ў пах, рабілі сустрэчны паварот, выходзілі з яго і вярталіся да таго самага краю. «Вертыкальны» — назва геаметрыі 0 градусаў у працы: доўгая вось калідора ішла паралельна напрамку супраць ветру. Гэта не азначае, што ўстаноўка стаяла вертыкальна.

Аўтары называюць гэты ўзор **адсочваннем краю**. **Эпізод** — адзін бесперапынны адрэзак паміж перасячэннямі мяжы: унутраны эпізод доўжыцца ад уваходу да выхаду, а вонкавы — ад выхаду да вяртання. У 755 унутраных эпізодах наведванне паху ў сярэднім доўжылася 4,9 секунды. Падчас вяртанняў сярэдняя адлегласць ад мяжы складала 10,4 міліметра. Менш за 4% з 793 эпізодаў даходзілі да супрацьлеглага краю калідора.

Апошнія дзве лічбы апісваюць эпізоды, а не сотні незалежных мушак. Гэта важна, бо адна жывёла можа даць шмат эпізодаў.

Вяртанні не былі проста фіксаваным рэфлексам ісці супраць ветру

Некалькі эксперыментаў праверылі больш простыя тлумачэнні.

Спачатку даследчыкі змянілі тое, што адбывалася **ўздоўж** калідора, калі мушка ішла супраць ветру. Пах мог узмацняцца ў бок віртуальнай крыніцы, заставацца сталым або слабнуць. Ва ўсіх трох выпадках мушкі ішлі падобнымі шляхамі. Таму простае правіла накшталт «ідзі туды, дзе пах становіцца мацнейшым» не можа растлумачыць адсочванне краю ў гэтай устаноўцы.

Затым даследчыкі зрабілі **бакавую** мяжу калідора мяккай, надаўшы канцэнтрацыі гаусаўскі профіль, дзе яна змянялася паступова, а не рэзка. Мушкі збіраліся каля схілу, дзе канцэнтрацыя змянялася найхутчэй, а не ў цэнтры, дзе пах быў наймацнейшы. Таму істотным сігналам была бакавая змена, якая пазначала эфектыўную мяжу, а не абавязковы рост канцэнтрацыі ў бок крыніцы ўздоўж калідора.

Гэта не азначае, што градыенты канцэнтрацыі ніколі не маюць значэння ў прыродзе. Гэта азначае, што для гэтых паводзін у праверaных умовах рост у бок крыніцы не быў неабходны.

Даследчыкі таксама змянялі арыентацыю калідора. Асобныя групы адсочвалі калідоры пад вугламі 0, 45 і 90 градусаў, а яшчэ адна група сустракала калідор, які пасля выхаду скакаў убок. Памеры груп складалі адпаведна 40, 21, 20 і 24 мушкі. Іх шляхі па-за пахам змяняліся разам з геаметрыяй. Агульнае правіла «заўсёды паварочвай супраць ветру» не можа растлумачыць такую гнуткасць.

У гэтай устаноўцы пах дасягаў двух вусікаў з розніцай каля дзвюх мілісекунд. Двухбаковая оптагенетычная актывацыя ў спалучэнні з ветрам магла ўзнавіць карціну, падобную да адсочвання краю. **Оптагенетыка** выкарыстоўвае святлоадчувальныя бялкі, каб змяняць актыўнасць выбраных клетак. Тут вынік паказвае, што розніца ў часе прыходу паху злева і справа не была неабходнай для гэтых паводзін. Ён не робіць двухбаковае параўнанне неістотным для свабодна рухомых жывёл у іншых шлейфах.

Вектар меншы за карту

Вектар — гэта кірунак разам з велічынёй. Карысная захаваная велічыня тут была пераважна накіраванай: куды мушка павінна павярнуць, каб дасягнуць мяжы шлейфа? Даследаванне не знайшло сведчанняў, што мушка захоўвала поўную схему шлейфа або сваё становішча ў ім.

Спачатку аўтары стварылі штучныя траекторыі, перамяшаўшы складнікі рэальнага руху мушак. Яны выпадкова бралі назіраныя даўжыні прабежак і вуглы павароту і злучалі іх. Некаторыя сінтэтычныя «хадункі» ўрэшце зноў траплялі на мяжу паху,

але блукалі далей і вярталіся менш прамымі шляхамі, чым сапраўдныя мушкі. Нават даданне звычайнай схільнасці мушак паварочваць супраць ветру не ўзнавіла кароткія мэтанакіраваныя вяртанні. Значыць, у рэальных паводзінах было больш інфармацыі пра кірунак, чым у выпадковым перамешванні тых самых рухаў.

Затым даследчыкі пабудавалі мадэль з двума рэжымамі: **адыходзіць ад мяжы** і **вяртацца да мяжы**. Гэтыя рэжымы не былі пазнакамі кожнага моманту ўнутры або па-за пахам. Гэта былі альтэрнатыўныя правілы кіравання рухам, якія маглі пераключацца.

Кожнае перасячэнне мяжы давала мадэлі кірунак для запамінання. Пры выхадзе яна абнаўляла кірунак, выкарыстаны падчас адыходу. Пры ўваходзе — асобны кірунак вяртання: фактычна «калі я знайшла мяжу, я рухалася вось так». Падчас наступнага вяртання гэты запомнены кірунак схіляў змадэляваную мушку рухацца назад да краю.

Даследчыкі падагналі мадэль да траекторый у калідорах пад вугламі 0, 45 і 90 градусаў. У выніковым параўнанні 72 рэальныя мушкі і 75 сімуляцый далі падобныя статыстыкі шляхоў. Калі запомнены пры ўваходзе кірунак вяртання выдалялі, адсочванне станавілася менш эфектыўным пры ўсіх арыентацыях калідора. Гэта падтрымлівае карысць памяці пра кірунак уваходу, але не даказвае, што мозг мушкі літаральна выконвае ўраўненні мадэлі.

> **Што азначае «памяць» у гэтай працы?**
>
> Даследчыкі не счытвалі захаваную стрэлку непасрэдна з мозгу мушкі. «Памяць пра кірунак» — выснова, падтрымана паводзінамі, мадэллю і нервовымі вымярэннямі. Мадэль паказвае, што некалькі зменлівых кірункаў могуць узнавіць важныя статыстыкі траекторый. Яна не даказвае, што мушка літаральна рэалізуе гэтыя ўраўненні або што адна названая група нейронаў з'яўляецца месцам захоўвання.

Дадатковы досвед з сегментам пад супрацьлеглым вуглом 45 градусаў зрушыў пазнейшыя паводзіны ў 10 мушак; паралельна аналізаваліся 29 мадэльных сімуляцый. Гэта робіць тлумачэнне праз кірунак больш канкрэтным, чым апісанне пасля факту, але яно ўсё яшчэ застаецца мадэльнай інтэрпрэтацыяй.

Апорны кірунак і бягучая мэта

Затым даследаванне вымярала і парушала актыўнасць у **цэнтральным комплексе** мушкі — вобласці мозгу, якая ўдзельнічае ў навігацыі.

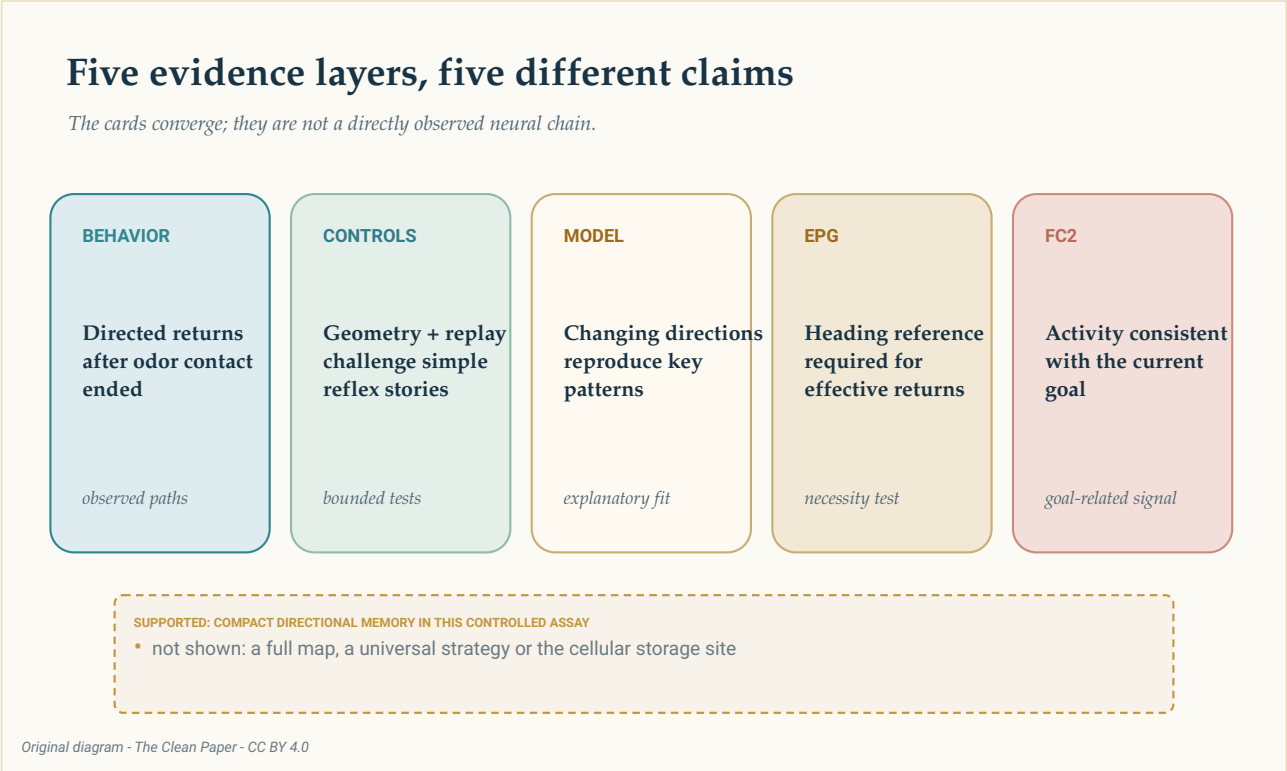
> **Два сігналы з рознымі задачамі**
>
> EPG і FC2 — назвы дзвюх папуляцый нейронаў у цэнтральным комплексе. Актыўнасць EPG працуе як паказанне компаса: яна адсочвае кірунак, у якім мушка цяпер павернутая адносна ветру. Актыўнасць FC2 звязана з кірункам, у якім мушка спрабуе рухацца. Ніжэйшая па ланцугу сістэма кіравання можа параўноўваць бягучы кірунак з гэтай мэтай. Даследаванне правярае абедзве папуляцыі, але не паказвае, што адна з іх самастойна захоўвае ўсю памяць.

Нейроны EPG нясуць сігнал кірунку: іх узор актыўнасці адсочвае, куды павернутая мушка адносна знешняга арыенціра. Выкарыстоўваючы кальцыевую візуалізацыю — ускоснае аптычнае вымярэнне нервовай актыўнасці, — даследчыкі выявілі, што фаза актыўнасці EPG падчас адсочвання краю адпавядала кірунку адносна ветру. Аналіз уключаў 16 спроб у 9 мушак.

Каб тармазіць нейроны EPG, даследчыкі генетычна прымусілі іх экспрэсаваць **GtACR1**, аніённы канал, які ўключаецца зялёным святлом. Святлодыёд заставаўся ўключаным цягам усяго выпрабавання, актываваў канал і прыгнятаў выбраныя нейроны; такое ж асвятленне не пагаршала паводзіны генетычных кантрольных мушак.

Калі нейроны EPG тармазілі такім чынам, 12 эксперыментальных мушак рабілі менш эфектыўныя мэтанакіраваныя вяртанні, чым 6 генетычных кантрольных. Абмежаваная выснова: апорны кірунак, які нясе актыўнасць EPG, быў патрэбны для эфектыўнага адсочвання краю ў праверaных умовах. Гэта не доказ, што нейроны EPG самі захоўвалі кірунак да мяжы.

Нейроны FC2 паказалі іншае суаднясенне. Актыўнасць іх папуляцыі была звязана з бягучай навігацыйнай мэтай і перад паваротамі ў доследзе паказвала ў бок мяжы шлейфа. У візуалізацыі ўдзельнічалі 6 мушак, а ў параўнаннях з выключэннем — групы ад 9 да 14 мушак у залежнасці ад аналізу. Выключэнне пагаршала адсочванне краю.



Паводзіны, змененая геаметрыя шлейфа, падагнаная мадэль і два нервовыя ўмяшанні падтрымліваюць розныя часткі тлумачэння праз памяць пра кірунак. Разам яны падтрымліваюць кампактны мэтавы кірунак у гэтым кантраляваным доследзе, але не поўную карту і не даказанае клетачнае месца захоўвання.

The Clean Paper CC BY 4.0

Гэта збежныя доказы, а не сфатаграфаваны ланцуг прычыннасці. Актыўнасць EPG давала неабходную апорную сістэму кірунку. Актыўнасць FC2 адпавядала мэтаваму кірунку і была патрэбная для эфектыўных паводзін. Эксперыменты не знайшлі адзін «энграм» памяці і не даказалі, што кірунак фізічна захоўваецца ў сінапсах FC2.

Як грубую аналогію чалавечага маштабу ўявіце, што вы выйшлі з вузкай паласы туману, а стабільны вецер усё яшчэ паказвае, дзе поўнач. Компас можа паведаміць, куды вы павернутыя, але для вяртання ў туман патрэбны таксама запомнены напрамак да яго краю. Параўнанне бягучага кірунку з жаданым паказвае, куды павярнуць. Менавіта такі падзел працы паміж сігналамі EPG і FC2 прапануецца тут. Гэта тлумачальная аналогія, а не доказ таго, што людзі выкарыстоўваюць тыя ж клеткі або алгарытм.

Памяць залежала ад дзеяння, а не толькі ад часу паху

У эксперыменце з паўторным прайграваннем мушкі атрымлівалі тую самую паслядоўнасць момантаў паху, што і раней, але час больш не залежаў ад іх бягучых дзеянняў. Засвоенае зрушэнне кірунку слабела ад эпізоду да эпізоду. Гэта падтрымлівае **аперантнае**, звязанае з дзеяннем абнаўленне: важным было не пасіўнае ўздзеянне паслядоўнасці

пахаў, а сувязь паміж пахам і рухам мушкі.

Назоўнік у гэтых аналізах змяняецца. Панэлі Extended Data ўключаюць 8 або 9 мушак у залежнасці ад параўнання; паслядоўная серыя эпізодаў выкарыстоўвае 8 мушак; траекторныя панэлі патрабуюць не менш за 10 эфектыўных уваходаў; а адпаведныя мадэльныя панэлі выкарыстоўваюць 21 змадэляваную траекторыю, якая таксама адпавядае гэтаму парогу ўваходаў. Гэта не адна аб'яднаная выбарка з васьмі мушак.

Больш нерэгулярны шлейф быў карысным, але ўсё яшчэ віртуальным

Даследчыкі таксама прайгралі раней запісаны, больш нерэгулярны шлейф. Яны павялічылі яго ў прасторы і часе ў пяць разоў, каб замацаваныя мушкі маглі сустракаць яго дастаткова часта. **Дзесяць з 12 мушак** дасягнулі адлегласці менш за 50 віртуальных міліметраў ад крыніцы.

Гэта не дзесяць мушак, якія знайшлі сапраўдную крыніцу ў адкрытым паветры. Гэта вынік у кантраляваным прайграванні натуралістычнага шлейфа.

Для кожнага тыпу дынамічнага шлейфа мадэль стварыла 2 000 траекторый. Параўнанне з маштабаваным шлейфам аналізавала 1 850 з гэтых 2 000 пасля патрабавання эфектыўнага ўваходу і выключэння траекторый, якія пачыналіся занадта блізка да крыніцы. Памяць дапамагала больш каля крыніцы, дзе паслядоўныя сустрэчы захоўвалі ўзгодненую структуру кірунку, і менш у больш турбулентнай вобласці далей па ветры.

Гэтая агаворка — частка выніку. Кампактны кірунак можа дапамагаць толькі тады, калі свет застаецца дастаткова ўзгодненым, каб папярэдняя сустрэча казала нешта карыснае пра наступную.

Чаго даследаванне не паказвае

- Яно **не** паказвае, што мушка будуе поўную прасторавую карту.
- Яно **не** паказвае свабодны палёт у нязмененым натуральным шлейфе.
- Яно **не** ўстанаўлівае, што ўся навігацыя па паху выкарыстоўвае гэтую стратэгію.
- Яно **не** паказвае, што нейроны EPG або FC2 з'яўляюцца адзіным фізічным месцам захоўвання памяці.
- Яно **не** ператварае падагнаную мадэль у літаральны біялагічны алгарытм мушкі.
- Яно **не** пераносіцца непасрэдна на чалавечую навігацыю.

Даследаванне наймацнейшае там, дзе яно найбольш канкрэтнае. Кіраванне з замкнёнай

зваротнай сувяззю дало даследчыкам дакладны доступ да кожнай сустрэчы з пахам. Змены геаметрыі, паўторнае прайграванне, мадэляванне, кальцыевая візуалізацыя і выключэнне нейронаў затым праверылі розныя часткі аднаго тлумачэння. Але паводзінскія, візуалізацыйныя і эксперыментальныя групы былі асобнымі; памеры выбарак не задаваліся загадзя; збор і аналіз даных не былі рандомізаваныя або асляпленыя; і менш за 10% замацаваных мушак выключылі з-за праблем з адаптацыяй, адказам або адсочваннем.

Гэтыя абмежаванні не сціраюць з'яву. Яны яе вызначаюць.

Кароткі вынік

Замацаваныя пладовыя мушкі, якія ішлі праз віртуальны пахавы калідор, неаднаразова вярталіся да мяжы пасля таго, як пакідалі пах ззаду. Змены канцэнтрацыі і геаметрыі калідора, падагнаная пераключальная мадэль, нервовая візуалізацыя і оптагенетычнае выключэнне падтрымліваюць тлумачэнне, паводле якога мушка выкарыстоўвае кампактны запомнены кірунак, а не поўную карту. Нейроны EPG давалі неабходную апорную сістэму кірунку, а актыўнасць FC2 адпавядала бягучай мэтавай напрамленасці. Вынік абмежаваны кантраляваным доследам з хадой; ён не вызначае клетачнае месца захоўвання памяці і не паказвае тую ж вылічальную стратэгію ў свабодным натуральным палёце.

Праверка без сенсацый

Што паказвае праца: у доследзе з замацаванымі мушкамі і замкнёнай зваротнай сувяззю яны мэтанакіравана вярталіся да віртуальных межаў паху, якіх ужо не маглі адчуваць. Некалькі паводзінскіх кантроляў, мадэляванне і нервовыя ўмяшанні падтрымліваюць вектарную стратэгію.

Што выведзена: што паводзіны выкарыстоўваюць кампактную памяць пра кірунак і што актыўнасць папуляцыі FC2 прадстаўляе бягучую навігацыйную мэту. Змест памяці непасрэдна не счытваўся.

Чаго праца не паказвае: поўнай ментальнай карты, універсальнай нюхальнай стратэгіі, паводзін у свабодным палёце ў натуральным шлейфе, аднаго месца захоўвання памяці або чалавечага аналага.

Галоўныя абмежаванні: адзін від і кантраляваная ўстаноўка; розныя групы мушак і адзінкі аналізу ў розных эксперыментах; ускосныя кальцыевыя сігналы; тэсты неабходнасці, якія не даказваюць дастатковасць; і натуралістычны шлейф, які быў прайграны і маштабаваны.

Наколькі ўпэўненым павінен быць шырокі чытач? Высокая ўпэўненасць, што

з’ява мэтанакіраванага вяртання рэальная ў гэтай устаноўцы і што актыўнасць цэнтральнага комплексу, звязаная з кірункам і мэтай, мае значэнне. Умераная ўпэўненасць у мадэлі як кампактным тлумачэнні. Нізкая ўпэўненасць у сцвярджэннях, якія без змен пераносяць яе ў адкрытае паветра або называюць поўнай картай.

Крыніцы

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