The Clean Paper

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

Milçək qoxunu itirsə də geri dönə bilir. Virtual qoxu şleyfində yadda qalan istiqamət kömək etdi

Bərkidilmiş meyvə milçəkləri qoxusuz havaya keçdikdən sonra təkrar-təkrar qoxu sərhədinə qayıtdı. Davranış, modelləşdirmə və neyron müdaxilələri tam xəritəni yox, yığcam istiqamət yaddaşını dəstəkləyir. Nəticə nəzarət olunan virtual-reallıq sınağından gəlir və eyni strategiyanın sərbəst təbii uçuşda istifadə edildiyini hələ göstərmir.

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

Milçək qoxunu itirsə də ona doğru geri dönə bilir

Milçək qoxunu arxada qoymuşdu.

O, bəzən onlarla saniyə və yüzlərlə virtual millimetr boyunca təmiz havada yeriməyə davam edirdi. Sonra keçdiyi sərhədə doğru dönür və qoxunu yenidən tapırdı. Həmin anda qoxunun özü geri yolu göstərə bilməzdi.

Meyvə milçəklərinin naviqasiyasına dair yeni Nature tədqiqatının əsas müşahidəsi budur. Tədqiqatçılar milçəklərin yığcam istiqamət yaddaşından istifadə etdiyini irəli sürürlər: bütün qoxu şleyfinin xəritəsi yox, qət edilən məsafənin yaddaşı yox, artıq hiss olunmayan sərhədə doğru yadda qalmış istiqamət.

Nəticə diqqətəlayiqdir, çünki çox az saxlanılan məlumatın belə kifayət edə bildiyini göstərir. Amma onu şişirtmək də asandır. Bu milçəklər təbii mənzərədə sərbəst uçmayıblar. Onlar ciddi nəzarət olunan virtual dünyada havada dayanan topun üstündə bərkidilmiş halda yeriyiblər. Tədqiqat bu qurğuda vektor əsaslı strategiyanı dəstəkləyir; milçəklərin zehni xəritə qurduğunu göstərmir, heyvanların qoxunu izləməsinin bütün yollarını izah etmir və yaddaşın fiziki olaraq hansı hüceyrələrdə saxlandığını müəyyən etmir.

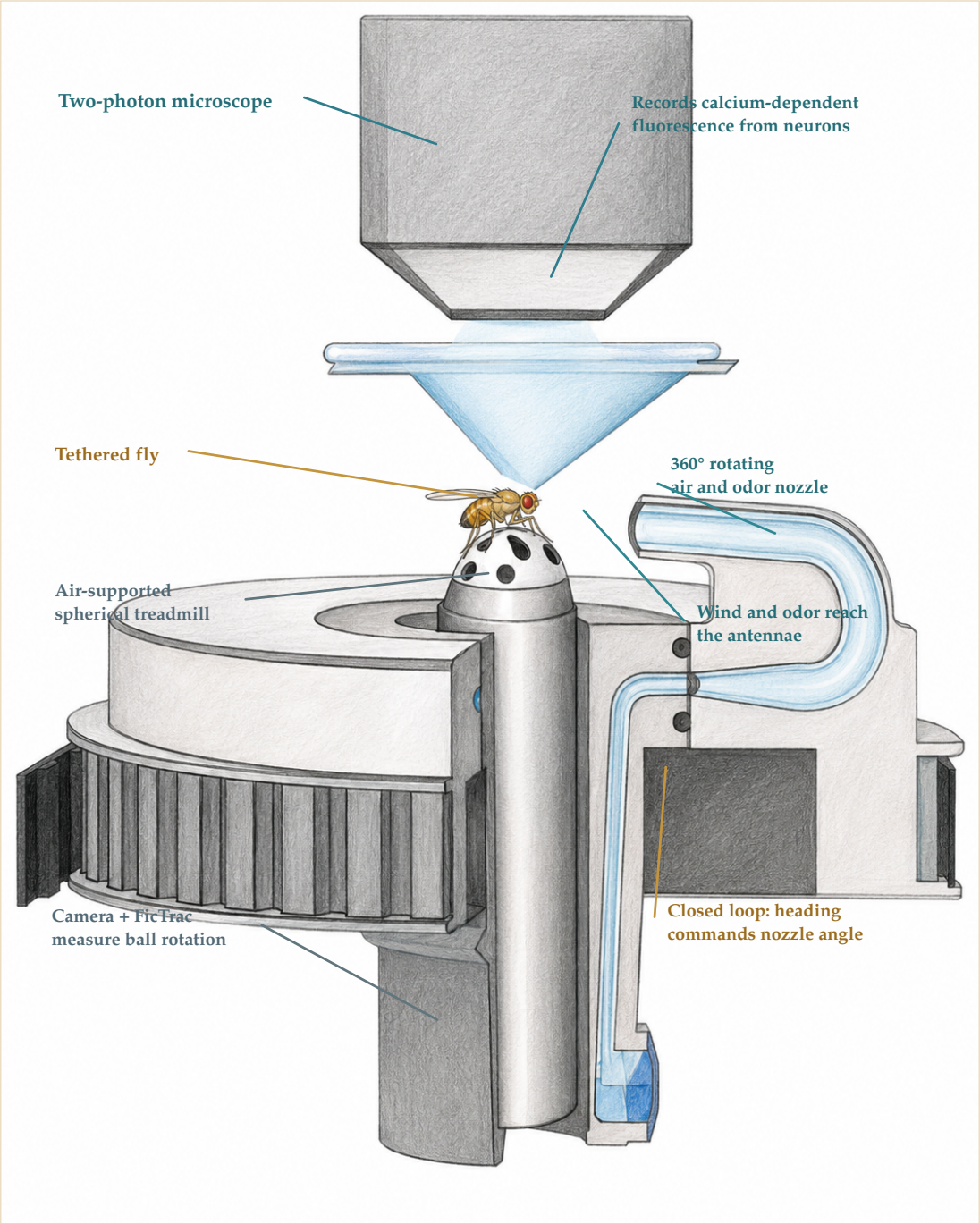
Görünməz dəhlizi proqram təminatı yaratmışdı

Qoxu şleyfi havanın daşıdığı qoxunun hərəkət edən bölgəsidir. Açıq havada külək dəyişdikcə şleyf əyilir, parçalanır və yenidən birləşir. Buna görə heyvanın hər anda nə qoxuladığını dəqiq bilmək çətindir.

Tədqiqatçılar problemi **qapalı dövrəli virtual reallıq** ilə idarəolunan edib. Milçəyin bədəni havada üzən yüngül topun üstündə sabitləşdirilmişdi. Milçək yeridikcə kamera topun fırlanmasını saniyədə təxminən 60 dəfə ölçürdü. Proqram bu fırlanmanı virtual ikiölçülü mövqe və istiqamətə çevirirdi.

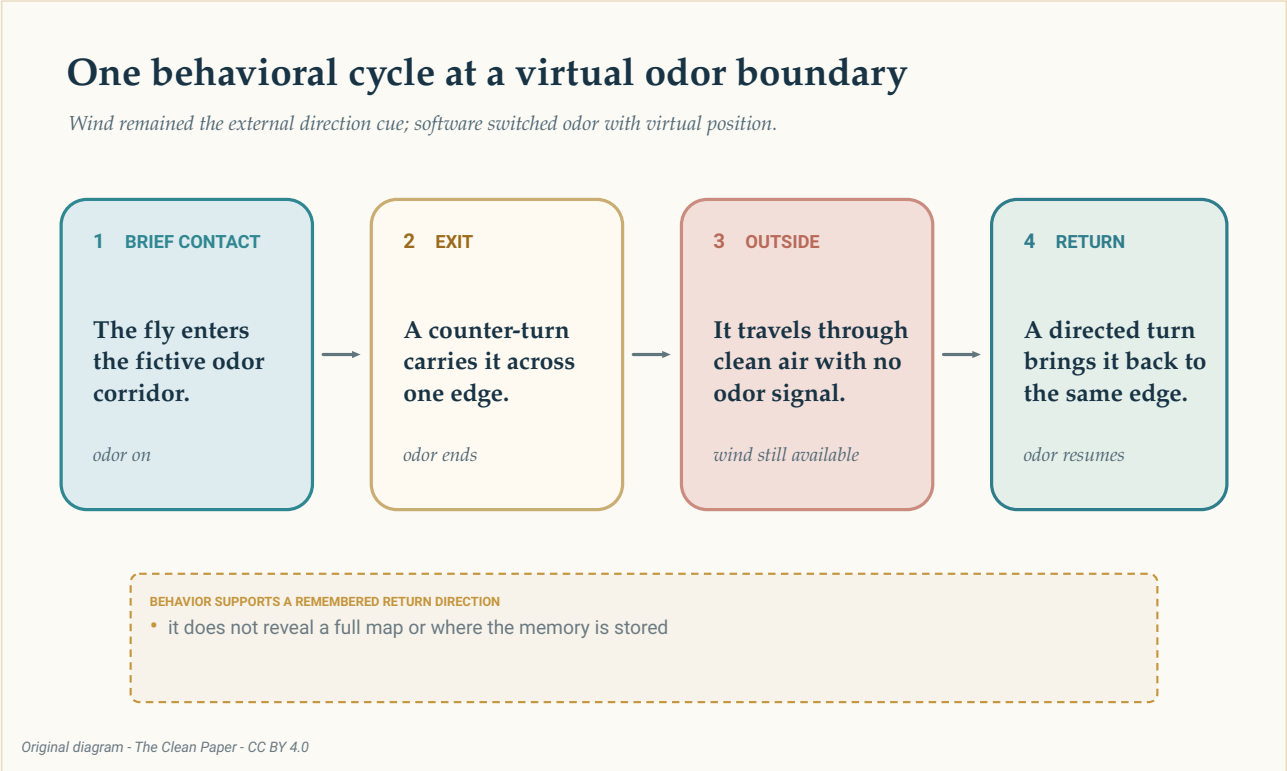
Bu istiqamət 360 dərəcə dönə bilən motorlu burunluğu idarə edirdi. Milçək virtual istiqamətini dəyişəndə burunluq onun ətrafında hərəkət edir və küləyi virtual dünyadakı sabit istiqamətlə uyğun saxlayırdı. Eyni zamanda kütlə-axını tənzimləyiciləri milçəyin virtual mövqeyinə görə antenalara nə qədər təmiz hava və ya alma sirkəsi qoxusunun çatdığını dəyişirdi. Beləliklə proqramla müəyyən edilmiş sərhədi keçmək qoxunu açır və ya söndürürdü; milçək topu heç vaxt tərk etməsə də 50 millimetr enində və bir metr uzunluğunda xəyali dəhliz yaranırdı.

Qurğu hər zaman nöqtəsində milçəyin virtual mövqeyini, istiqamətini, qoxu vəziyyətini və hava axını idarələrini sinxron qeydə alırdı. Tədqiqatçılar bu qeyddən trayektoriyaları yenidən qurub, hər giriş və çıxışı işarələyib və milçəyin nə qədər birbaşa qayıtdığını ölçüblər. Külək xarici istiqamət işarəsini verirdi; milçəyin öz hərəkəti onun virtual qoxu sərhədinin hansı tərəfi ilə nə vaxt qarşılaşdığını müəyyən edirdi.



Milçək havada üzən topun üstündə bərkidilmiş qalırdı. Kamera və FicTrac topun fırlanmasını virtual hərəkət və istiqamətə çevirirdi; proqram sonra hava-qoxu burunluğunu çevirir və virtual mövqeyə uyğun qoxunu açıb-söndürürdü. Ayrı neyron görüntüləmə sınaqlarında milçəyin üstündəki iki-foton mikroskop EPG və ya FC2 neyronlarından kalsiumdan asılı flüoresansı qeydə alırdı və neyron fəaliyyətini davranışla uyğunlaşdırmağa imkan verirdi. Mikroskop hər davranış sınağı üçün lazım deyildi.

The Clean Paper CC BY 4.0



Nəzarət olunan sınaqda milçək qısa müddət virtual qoxu dəhlizinə daxil oldu, ordan çıxdı, qoxusuz havada hərəkət etdi və istiqamətli şəkildə geri döndü. Davranış yadda qalan dönüş istiqamətini dəstəkləyir; həmin məlumatın harada saxlandığını göstərmir.

The Clean Paper CC BY 4.0

Əsas **şaquli-dəhliz** təcrübəsində **40 milçək** qoxuya təkrar daxil olur, əks dönərək ondan çıxır və eyni kənara geri qayıdırdı. “Şaquli” məqalədə 0 dərəcə həndəsəsinin adıdır: dəhlizin uzun oxu küləyin əks istiqamətinə paralel idi. Bu, qurğunun dik dayandığı demək deyil.

Müəlliflər bu nümunəyə **kənar izləmə** deyirlər. **Epizod** sərhəd keçidləri arasındakı bir fasilə-siz epizoddur: daxili epizod girişdən çıxışadək, xarici epizod isə çıxışdan milçəyin geri dönməsinədək davam edir. 755 daxili epizod üzrə bir ziyarət orta hesabla 4,9 saniyə çəkib. Dönüşlər zamanı sərhəddən orta məsafə 10,4 millimetr olub. 793 epizodun 4%-dən azı dəhlizin qarşı kənarına qədər keçib.

Son iki rəqəm yüzlərlə müstəqil milçəyi yox, epizodları təsvir edir. Fərq vacibdir, çünki bir heyvan çoxlu epizod verə bilər.

Dönüşlər sadəcə sabit küləyə-qarşı refleks deyildi

Bir neçə təcrübə daha sadə izahları sınaqdan keçirdi.

Tədqiqatçılar əvvəlcə milçək dəhliz boyunca küləyə qarşı yeriyərkən **uzununa** nə baş verdiyini dəyişdirdilər. Qoxu virtual mənbəyə doğru güclənə, sabit qala və ya zəifləyə bilərdi. Milçəklər hər üç halda oxşar yollar göstərdi. Buna görə “qoxu harada güclənirsə ora get” kimi

sadə qayda bu qurğudakı kənar izləməni izah edə bilməz.

Sonra onlar dəhlizin **yan** kənarını sərt keçid əvəzinə konsentrasiyanın tədricən dəyişdiyi Qauss profilinə yumşaltdılar. Milçəklər qoxunun ən güclü olduğu mərkəzdə yox, konsentrasiyanın ən sürətlə dəyişdiyi cinahda toplaşdı. Deməli əsas işarə dəhliz boyunca mənbəyə doğru artım yox, effektiv sərhədi göstərən yanal dəyişmə idi.

Bu, təbiətdə konsentrasiya gradientlərinin heç vaxt vacib olmadığı demək deyil. Sadəcə sınaqdan keçirilən şəraitdə bu davranış üçün mənbəyə doğru artım lazım olmadı.

Tədqiqatçılar dəhlizin orientasiyasını da dəyişdirdilər. Ayrı qruplar şaquli, 45 dərəcə və 90 dərəcə dəhlizləri izlədilər, başqa bir qrup isə çıxışlardan sonra yana sıçrayan dəhlizlə qarşılaşdı. Qrup ölçüləri müvafiq olaraq 40, 21, 20 və 24 milçək idi. Onların xarici yolları həndəsə ilə dəyişdi. “Həmişə küləyə qarşı dön” kimi ümumi qayda bu çevikliyi izah edə bilməz.

Bu qurğuda qoxu iki antenaya təxminən iki millisaniyə fərqlə çatırdı. İkitərəfli optogenetik aktivləşdirməni küləklə birləşdirmək kənar-izləmə tipli nümunəni təkrar yarada bildi. **Optogenetika** seçilmiş hüceyrələrin fəaliyyətini dəyişdirmək üçün işığa həssas zülallardan istifadə edir. Buradakı nəticə qoxunun sola və sağa çatması arasındakı fərqin bu davranış üçün zəruri olmadığını göstərir. Bu, başqa şleyflərdə sərbəst hərəkət edən heyvanlarda ikitərəfli müqayisəni əhəmiyyətsiz etmir.

Vektor xəritədən kiçikdir

Vektor istiqamət və ölçüdən ibarətdir. Burada faydalı saxlanılan kəmiyyət əsasən istiqamətli idi: milçək şleyf sərhədinə çatmaq üçün hansı tərəfə dönməlidir? Tədqiqat milçəyin şleyfin tam düzülüşünü və ya onun içində öz mövqeyini saxladığına dair sübut tapmadı.

Müəlliflər əvvəlcə real milçək hərəkətinin komponentlərini qarışdıraraq süni yollar yaratdılar. Müşahidə olunmuş qaçış uzunluqları və dönmə bucaqlarını təsadüfi seçib birləşdirdilər. Bu sintetik gəzənlərin bəzisi sonda qoxu sərhədinə yenidən çatdı, amma real milçəklərdən daha çox dolaşdı və daha az birbaşa yol seçdi. Milçəklərin adi küləyə-qarşı dönmə meylini əlavə etmək belə qısa, istiqamətli dönüşləri təkrar yaratmadı. Deməli real davranış eyni hərəkətlərin təsadüfi qarışığından daha çox istiqamət məlumatı daşıyırdı.

Sonra tədqiqatçılar iki rejimli model qurdular: **sərhəddən ayrıl** və **sərhədə qayıt**. Bu rejimlər qoxunun içində və ya çölündəki hər ana verilən etiketlər deyildi. Milçək hərəkət etdikcə dəyişə bilən alternativ idarəetmə qaydaları idi.

Hər sərhəd keçidi modelə yadda saxlanacaq istiqamət verirdi. Çıxış zamanı model ayrılarkən istifadə etdiyi istiqaməti yeniləyirdi. Giriş zamanı ayrıca dönüş istiqamətini yeniləyirdi: mahiyyətcə “sərhədi tapanda bu tərəfə gedirdim”. Sonrakı dönüş zamanı həmin yadda qalmış istiqamət simulyasiya olunan milçəyin hərəkətini yenidən kənara tərəf yönəldirdi.

Tədqiqatçılar modeli 0, 45 və 90 dərəcə dəhlizlərdəki trayektoriyalara uyğunlaşdırdılar.

Xülasə müqayisəsində 72 real milçək və 75 simulyasiya oxşar yol statistikaları yaratdı. Girişdə öyrənilən dönüş istiqaməti çıxarılanda bütün dəhliz orientasiyalarında izləmə daha az səmərəli oldu. Bu, giriş-istiqaməti yaddaşının faydalı olduğunu dəstəkləyir; milçəyin beyninin model tənliklərini hərfi mənada işlətməsini sübut etmir.

> **Bu məqalədə "yaddaş" nə deməkdir?**
>
> Tədqiqatçılar milçəyin beynindən saxlanmış oxu birbaşa oxumayıblar. "İstiqamət yaddaşı" davranış, model və neyron ölçmələri ilə dəstəklənən çıxarışdır. Model bir neçə dəyişən istiqamətin vacib yol statistikalarını təkrar yarada bildiyini deyir. Milçəyin tənlikləri hərfi mənada həyata keçirdiyini və ya adı çəkilən bir neyron qrupunun yaddaşın saxlanma yeri olduğunu sübut etmir.

Əks istiqamətli 45 dərəcə seqmentlə əlavə təcrübə 10 milçəkdə sonrakı davranışı dəyişdi; paralel olaraq 29 model simulyasiyası aparıldı. Bu, istiqamət izahını sonradan uydurulmuş təsvirdən daha konkret edir, amma yenə model əsaslı şərh olaraq qalır.

İstiqamət istinadı və cari məqsəd

Sonra tədqiqat milçəyin naviqasiyada iştirak edən beyin bölgəsi olan **mərkəzi kompleksindəki** fəaliyyəti ölçüb və pozub.

> **Fərqli işi olan iki siqnal**
>
> EPG və FC2 mərkəzi kompleksdə iki neyron populyasiyasının adıdır. EPG fəaliyyəti kompas oxunuşu kimi işləyir: milçəyin küləyə nisbətən hazırda baxdığı istiqaməti izləyir. FC2 fəaliyyəti milçəyin getməyə çalışdığı istiqamətlə əlaqəlidir. Aşağı axın idarəetmə dövrəsi cari istiqaməti həmin məqsədlə müqayisə edə bilər. Tədqiqat hər iki populyasiyanı sınaqdan keçirir, amma onlardan hər hansı birinin təkbaşına bütün yaddaşı saxladığını göstərmir.

EPG neyronları cari istiqamət siqnalı daşıyır: fəaliyyət naxışı milçəyin xarici işarəyə nisbətən baxdığı istiqaməti izləyir. Neyron fəaliyyətinin dolayı optik göstəricisi olan kalsium görüntüləməsindən istifadə edən tədqiqatçılar EPG fəaliyyət fazasının kənar izləmə zamanı küləyə nisbətən cari istiqaməti izlədiyini tapıblar. Bu analiz 9 milçəkdən 16 sınaqdan istifadə edib.

EPG neyronlarını inhibə etmək üçün tədqiqatçılar onları yaşıl işıqla aktivləşən anion kanalı olan **GtACR1** ifadə edəcək şəkildə mühəndisliklə dəyişiblər. Test sınağı boyunca LED açıq qalıb, həmin kanalı aktivləşdirib seçilmiş neyronları basdırıb; eyni işıqlandırma genetik nəzarət milçəklərinin davranışını pozmayıb.

EPG neyronları bu üsulla inhibə ediləndə 12 eksperimental milçək 6 genetik nəzarət milçəyindən daha az effektiv istiqamətli dönüşlər edib. Məhdud nəticə budur ki, sınaqdan

keçirilən şəraitdə effektiv kənar izləmə üçün EPG fəaliyyətinin daşıdığı istiqamət istinadı lazım idi. EPG neyronlarının sərhəd istiqamətini təkbaşına saxladığına sübut deyil.

FC2 neyronları başqa əlaqə göstərib. Onların populyasiya fəaliyyəti cari naviqasiya məqsədi ilə əlaqəli idi və sınaqda dönüşlərdən əvvəl şleyf sərhədinə doğru yönəlirdi. Görüntüləmə 6 milçəkdən istifadə edib, susdurma müqayisələrində isə analizdən asılı olaraq 9–14 milçəklik qruplar olub. Susdurma kənar izləməni zəiflətdi.

Davranış, dəyişdirilmiş şleyf həndəsəsi, uyğunlaşdırılmış model və iki neyron müdaxiləsi istiqamət-yaddaşı izahının fərqli hissələrini dəstəkləyir. Birlikdə onlar bu nəzarət olunan sınaqda yığcam məqsəd istiqamətini dəstəkləyir, tam xəritəni və ya sübut olunmuş hüceyrəvi saxlanma yerini yox.

The Clean Paper CC BY 4.0

Bu, birləşən sübutdur, səbəbiyyət zəncirinin fotosu deyil. EPG fəaliyyəti lazım olan istiqamət istinadını verdi. FC2 fəaliyyəti məqsəd istiqaməti ilə uyğun idi və effektiv davranış üçün lazım idi. Təcrübələr tək bir yaddaş “engramı” tapmadı və FC2 sinapslarının istiqaməti fiziki olaraq saxladığını sübut etmədi.

İnsan miqyasında kobud analogiya kimi təsəvvür edin ki, sabit küləyin hələ də şimalın harada olduğunu bildirdiyi dar duman zolağından çıxırsınız. Kompas hansı tərəfə baxdığınızı deyə bilər, amma dumana qayıtmaq onun kənarına doğru yadda saxlanmış istiqamət də tələb edir. Cari cari istiqaməti arzu olunan istiqamətlə müqayisə etmək hansı tərəfə dönməli olduğunuzu deyir. Burada EPG və FC2 siqnalları üçün təklif olunan əmək bölgüsü budur. Bu, izah analogiyasıdır; insanların eyni hüceyrələri və ya alqoritmi istifadə etdiyinin sübutu deyil.

Yaddaş təkcə qoxu vaxtından yox, hərəkətdən asılı idi

Təkrar-oynatma təcrübəsində milçəklər əvvəlki kimi eyni qoxu zaman ardıcıllığını aldılar, amma zamanlama onların həmin anda nə etdiyindən ayrıldı. Öyrənilmiş istiqamət meyli təkrar-oynatma epizodları boyunca zəiflədi. Bu, **operant**, yəni hərəkətlə əlaqəli yeniləməni dəstəkləyir: vacib olan yalnız qoxu ardıcıllığına passiv məruz qalmaq deyil, qoxu ilə milçəyin hərəkəti arasındakı əlaqə idi.

Bu analizlərdə məxrəc dəyişir. Extended Data panellərinə müqayisədən asılı olaraq 8 və ya 9 milçək daxildir; ardıcıl-epizod seriyası 8 milçəkdən istifadə edir; trayektoriya panelləri ən azı 10 effektiv giriş tələb edir; cüt model panelləri isə həmin giriş həddini ödəyən 21 simulyasiya trayektoriyasından istifadə edir. Bunlar səkkiz milçəkdən ibarət vahid birləşdirilmiş nümunə deyil.

Daha nizamsız şleyf faydalı idi, amma yenə virtual idi

Tədqiqatçılar daha əvvəl qeydə alınmış, daha nizamsız şleyfi də təkrar-oynatma etdilər. Bərkidilmiş milçəklər onu kifayət qədər tez-tez görə bilsin deyə məkan və zaman baxımından beş dəfə böyütdülər. **12 milçəkdən 10-u** mənbənin 50 virtual millimetrinə qədər yaxınlaşdı.

Bu, açıq havada real mənbəni tapan on milçək deyil. Təbii görünüşlü şleyfin nəzarət olunan təkrar-oynatma-indəki performansdır.

Hər dinamik şleyf növü üçün model 2.000 trayektoriya yaratdı. Böyüdülmüş şleyf müqayisəsi effektiv giriş tələb edildikdən və mənbəyə çox yaxın başlayan trayektoriyalar çıxarıldıqdan sonra həmin 2.000-dən 1.850-ni təhlil etdi. Yaddaş mənbəyə yaxın, ardıcıl qarşılaşmaların istiqamət strukturu daha uyğun qaldığı yerdə daha çox kömək etdi, aşağı külək istiqamətində daha turbulent bölgədə isə daha az.

Bu qeyd nəticənin bir hissəsidir. Yığcam istiqamət yalnız dünya əvvəlki qarşılaşmanın növbəti qarşılaşma haqqında faydalı məlumat verə biləcəyi qədər uyğun qaldıqda kömək edə bilər.

Tədqiqat nəyi göstərmir?

- Milçəyin tam məkan xəritəsi qurduğunu **göstərmir**.
- Dəyişdirilməmiş təbii şleyfdə sərbəst uçuşu **göstərmir**.
- Qoxu ilə yönlənən bütün naviqasiyanın bu strategiyadan istifadə etdiyini **müəyyən etmir**.
- EPG və ya FC2 neyronlarının yaddaşın eksklüziv fiziki saxlanma yeri olduğunu **göstərmir**.
- Uyğunlaşdırılmış modeli milçəyin hərfi bioloji alqoritminə **çevirmir**.
- İnsan naviqasiyasına birbaşa **ümumiləşdirilmir**.

Tədqiqat ən konkret olduğu yerdə ən güclüdür. Qapalı dövrəli nəzarət tədqiqatçılara hər

qoxu qarşılaşmasını dəqiq idarə etməyə imkan verdi. Sonra həndəsə dəyişiklikləri, təkrar-oynatma, modelləşdirmə, kalsium görüntüləməsi və susdurma bir izahın fərqli hissələrini sınaqdan keçirdi. Amma davranış, görüntüləmə və susdurma kohortları ayrı idi; nümunə ölçüləri əvvəlcədən müəyyən edilməmişdi; məlumat toplama və analiz randomizə və kor deyildi; bərkidilmiş milçəklərin 10%-dən azı uyğunlaşma, cavab və ya izləmə problemlərinə görə çıxarılmışdı.

Bu məhdudiyyətlər fenomeni silmir. Onun sərhədlərini müəyyən edir.

Təmiz xülasə

Virtual qoxu dəhlizində yeriyən bərkidilmiş meyvə milçəkləri qoxunu arxada qoyduqdan sonra sərhədə təkrar-təkrar qayıtdı. Konsentrasiya və dəhliz həndəsəsinin dəyişdirilməsi, uyğunlaşdırılmış keçid modeli, neyron görüntüləmə və optogenetik susdurma milçəyin tam xəritə əvəzinə yığcam yadda saxlanmış istiqamətdən istifadə etdiyi izahı dəstəkləyir. EPG neyronları lazım olan istiqamət istinadını təmin etdi, FC2 fəaliyyəti isə cari məqsəd istiqaməti ilə uyğun idi. Nəticə nəzarət olunan yerimə sınağı ilə məhduddur; yaddaşın hüceyrəvi saxlanma yerini müəyyən etmir və eyni hesablamanın sərbəst təbii uçuşda istifadə edildiyini göstərmir.

No-BS yoxlaması

Məqalə nə göstərir: Qapalı dövrəli bərkidilmiş sınaqda milçəklər artıq hiss edə bilmədikləri virtual qoxu sərhədlərinə istiqamətli dönüşlər etdilər. Çoxsaylı davranış nəzarətləri, modelləşdirmə və neyron müdaxilələri vektor əsaslı strategiyanı dəstəkləyir.

Nə çıxarılır: Davranışın yığcam istiqamət yaddaşından istifadə etməsi və FC2 populyasiya fəaliyyətinin cari naviqasiya məqsədini təmsil etməsi. Yaddaşın məzmunu birbaşa oxunmayıb.

Nəyi göstərmir: Tam zehni xəritəni, universal qoxu naviqasiyası strategiyasını, təbii şleyfdə sərbəst uçuş performansını, tək yaddaş-saxlanma yerini və ya insan analoqunu.

Əsas məhdudiyyətlər: Bir növ və nəzarət olunan qurğu; təcrübələr üzrə fərqli milçək kohortları və analiz vahidləri; dolayı kalsium siqnalları; zəruriliyi göstərən, amma kifayətliliyi sübut etməyən testlər; təkrar-oynatma olunmuş və miqyası dəyişdirilmiş təbii görünüşlü şleyf.

Ümumi oxucu nə qədər əmin olmalıdır? Bu qurğuda istiqamətli dönüş fenomeninin real olduğuna və cari istiqamət və məqsədlə əlaqəli mərkəzi-kompleks fəaliyyətinin əhəmiyyətli olduğuna yüksək inam. Modelə yığcam izah kimi orta inam. Onu dəyişmədən açıq havaya ümumiləşdirən və ya tam xəritə adlandıran iddialara aşağı inam.

Mənbələr

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