



The CLEAN PAPER

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

Bir sinek kokuyu kaybedip yine de geri dönebilir.
Sanal bir koku bulutunda hatırlanan yön yardımcı
oldu

Bağı meyve sinekleri temiz havaya çıktıktan sonra tekrar tekrar koku sınırına döndü. Davranış, modelleme ve sinirsel müdahaleler eksiksiz bir haritayı değil, kompakt bir yön hafızasını destekliyor. Sonuç kontrollü bir sanal gerçeklik deneyinden geliyor ve aynı stratejinin doğal serbest uçuşta kullanıldığını henüz göstermiyor.

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

Bir sinek kokuyu kaybedip yine de ona doğru geri dönebilir

Sinek kokuyu geride bırakmıştı.

Temiz havada yürümeye devam etti; bazen onlarca saniye boyunca ve yüzlerce sanal milimetre ilerledi. Sonra geçtiği sınıra doğru döndü ve kokuyu yeniden buldu. O anda kokunun kendisi geri dönüş yolunu gösteremezdi.

Meyve sineklerinin yön bulmasını inceleyen yeni bir Nature çalışmasının temel gözlemi budur. Araştırmacılar sineklerin kompakt bir yön hafızası kullandığını savunuyor: tüm koku bulutunun haritası değil, kat edilen mesafenin hafızası da değil; artık algılanamayan bir sınıra doğru hatırlanan bir yön.

Sonuç çarpıcı, çünkü ne kadar az saklanmış bilginin yeterli olabileceğini gösteriyor. Ama kolayca abartılabilir de. Bu sinekler doğal bir manzara içinde serbestçe uçmadı. Sıkı biçimde kontrollü sanal bir dünyada, havayla desteklenen bir top üzerinde bağlı halde yürüdüler. Çalışma bu düzenekte vektör tabanlı bir stratejiyi destekliyor; sineklerin zihinsel haritalar kurduğunu, hayvanların kokuları takip etmesinin her yolunu açıkladığını ya da hafızanın fiziksel olarak hangi hücrelerde saklandığını göstermiyor.

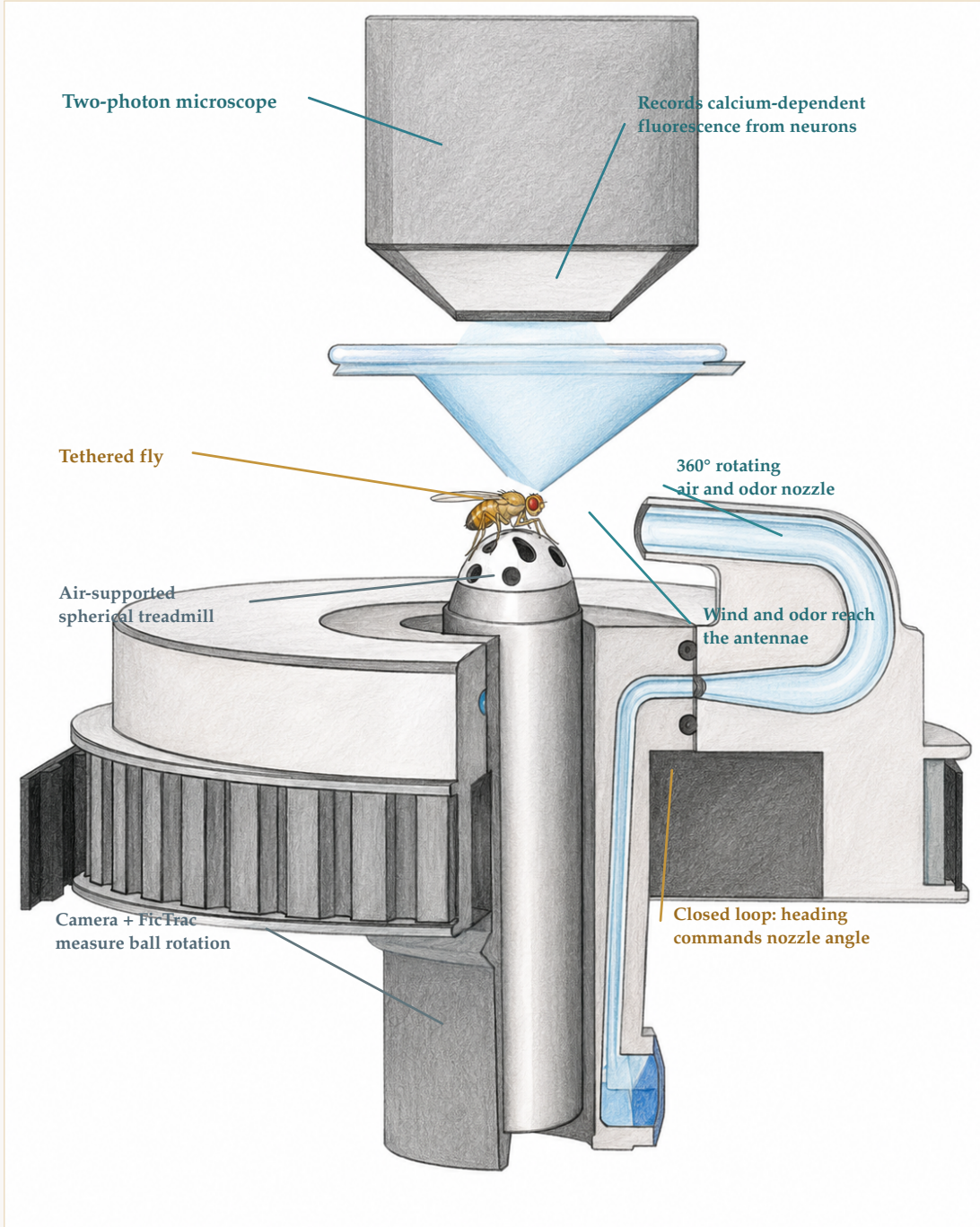
Görünmez koridor yazılımla oluşturuldu

Bir koku bulutu, havayla taşınan kokunun hareket eden bölgesidir. Açık havada rüzgâr değiştikçe bulut kıvrılır, parçalanır ve yeniden birleşir. Bu da bir hayvanın her anda tam olarak ne kokladığını bilmeyi zorlaştırır.

Araştırmacılar problemi **kapalı döngü sanal gerçeklik** ile kontrol edilebilir hale getirdi. Sineğin gövdesi, havada yüzen hafif bir topun üzerinde sabitlenmişti. Sinek yürüdükçe bir kamera topun dönüşünü saniyede yaklaşık 60 kez ölçtü. Yazılım bu dönüşü sanal iki boyutlu konuma ve baş yönüne çevirdi.

Bu yön bilgisi, 360 derece dönebilen motorlu bir nozulu kontrol ediyordu. Sinek sanal yönünü değiştirdikçe nozul da onun çevresinde hareket ediyor, rüzgârı sineğin sanal dünyasında sabit bir yönle hizalı tutuyordu. Aynı zamanda kütle-akış kontrolörleri, sineğin sanal konumuna göre antenlere ne kadar temiz hava ya da elma sirkesi kokusu ulaştığını değiştiriyordu. Böylece yazılımla tanımlanmış bir sınırı geçmek kokuyu açıp kapatıyor; sinek topun üzerinden hiç ayrılmadığı halde 50 milimetre genişliğinde ve bir metre uzunluğunda hayali bir koridor oluşturuyordu.

Düzenek her zaman noktasında sineğin sanal konumunu, yönünü, koku durumunu ve hava akışı kontrollerini senkronize olarak kaydetti. Araştırmacılar bu kayıtlardan yolları yeniden oluşturdu, her giriş ve çıkışı işaretledi ve sineğin ne kadar doğrudan geri döndüğünü ölçtü. Rüzgâr dış yön ipucunu sağladı; sineğin kendi hareketi ise sanal koku sınırının iki tarafından biriyle ne zaman karşılaşacağını belirledi.



Sinek, havayla desteklenen bir topun üzerinde bağlı kaldı. Bir kamera ve FicTrac topun dönüşünü sanal hareket ve baş yönüne çevirdi; yazılım daha sonra hava-koku nozulunu döndürdü ve sanal konuma göre kokuyu açıp kapattı. Aynı sinirsel görüntüleme deneylerinde sineğin üzerindeki iki-foton mikroskop EPG veya FC2 nöronlarından kalsiyuma bağlı floresansı kaydetti; böylece sinir etkinliği davranışla hizalanabildi. Mikroskop her davranış deneyi için gerekli değildi.

The Clean Paper CC BY 4.0

One behavioral cycle at a virtual odor boundary

Wind remained the external direction cue; software switched odor with virtual position.



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

Kontrollü deneyde bir sinek sanal koku koridoruna kısa süre girdi, çıktı, kokusuz havada ilerledi ve yönlü bir geri dönüş yaptı. Davranış, hatırlanan bir geri dönüş yönünü destekler; bu bilginin nerede saklandığını göstermez.

The Clean Paper CC BY 4.0

Ana **dikey koridor** deneyinde **40 sinek** tekrar tekrar kokuya girdi, ters dönüşle dışarı çıktı ve aynı kenara geri döndü. “Dikey”, makalenin 0 derecelik geometriye verdiği addır: koridorun uzun eksenini rüzgârın geldiği yöne paraleldi. Düzenegün dikey olarak ayakta olduğu anlamına gelmez.

Yazarlar bu desene **kenar takibi** diyor. Bir **bout**, sınır geçişleri arasındaki kesintisiz bir bölümdür: içerideki bout girişten çıkışa, dışarıdaki bout ise çıkıştan sineğin geri dönüşüne kadar sürer. 755 içerideki bout boyunca bir ziyaret ortalama 4,9 saniye sürdü. Geri dönüşlerde sınırdan ortalama uzaklık 10,4 milimetreydi. 793 boutun %4’ünden azı koridorun karşı kenarına kadar geçti.

Bu son iki sayı yüzlerce bağımsız sineği değil, boutları tanımlar. Ayrım önemlidir, çünkü tek bir hayvan birçok bout katkısı yapabilir.

Geri dönüşler yalnızca sabit bir rüzgâra-karşı refleksi değildi

Bir dizi deney daha basit açıklamaları test etti.

Araştırmacılar önce sinek rüzgâra karşı yürürken koridor **boyunca** ne olduğunu değiştirdi. Koku sanal kaynağa doğru güçlenebilir, sabit kalabilir ya da zayıflayabilirdi. Sinekler üç durumda da benzer yollar izledi. Dolayısıyla “koku nerede güçleniyorsa oraya git” gibi basit bir kural bu düzenegün kenar takibini açıklayamıyor.

Daha sonra koridorun **yanal** kenarını, derişimin birden açılıp kapanmak yerine kademeli değiştiği Gauss profiline yumuşattılar. Sinekler kokunun en g olduğu merkeze değil, derişimin en hızlı değiştiği yana yakın toplandı. Dolayısıyla ilgili ipucu, koridor boyunca kaynağa doğru zorunlu bir artış değil, etkili bir sınırı işaretleyen yanal değişimdi.

Bu, derişim gradyanlarının doğada hiçbir zaman önemli olmadığı anlamına gelmez. Yalnızca test edilen koşullarda bu davranış için kaynağa doğru bir artışın gerekli olmadığını gösterir.

Araştırmacılar koridorun yönelimini de değiştirdi. Ayrı gruplar dikey, 45 derecelik ve 90 derecelik koridorları izledi; başka bir grup ise çıkışlardan sonra yana sıçrayan bir koridorla karşılaştı. Grup büyüklükleri sırasıyla 40, 21, 20 ve 24 sinekti. Dışarıdaki yolları geometriyle birlikte değişti. “Her zaman rüzgâra karşı dn” gibi genel bir kural bu esnekliği açıklayamıyor.

Bu düzende koku iki antene yaklaşık iki milisaniye içinde ulaştı. İki taraflı optogenetik etkinleştirmeyi rzgrle eşlemek kenar takibine benzer bir desen oluşturabildi. **Optogenetik**, seçilmiş hücreleri değiştirmek için ışığa duyarlı proteinler kullanır. Buradaki sonuç, koku gelişinde sol-sağ farkının bu davranış için gerekli olmadığını düşündürür. Serbest hareket eden hayvanların başka koku bulutlarında iki taraflı karşılaştırmayı kullanmadığı anlamına gelmez.

Bir vektör, bir haritadan daha küçüktür

Bir **vektör**, yn ile büyüklüğün birleşimidir. Burada işe yarayan saklanmış nicelik esas olarak ynseldi: sinek koku bulutunun sınırına ulaşmak için hangi tarafa dönmeliydi? Çalışma, sineğin tüm bulutun yerleşimini ya da içindeki kendi konumunu sakladığına dair kanıt bulmadı.

Yazarlar önce gerçek sinek hareketinin bileşenlerini karıştırarak yapay yollar oluşturdu. Gözlenen koşu uzunluklarını ve dönüş açılarını rastgele seçip birleştirdiler. Bu sentetik yryclerin bazıları sonunda koku sınırına tekrar ulaştı, ancak gerçek sineklerden daha uzağa dolaştı ve daha dolambaçlı yollar izledi. Sineklerin olağan rüzgâra-karşı dönme eğilimini eklemek bile kısa, yönlü geri dönüşleri yeniden üretmedi. Dolayısıyla gerçek davranış, aynı hareketlerin rastgele karışımından daha fazla yön bilgisi içeriyordu.

Araştırmacılar daha sonra iki modlu bir model kurdu: **sınırdan ayrıl** ve **sınıra dn**. Bu modlar kokunun içinde veya dışında geçirilen her anın etiketleri değildi. Sinek hareket ettikçe birbirine geçebilen alternatif yönlendirme kurallarıydı.

Her sınır geçişi modele hatırlanacak bir yön verdi. Çıkışta, ayrılırken kullanılan yönü güncelledi. Girişte ayrı bir geri dönüş yönünü güncelledi: kabaca, “sınırı bulduğumda bu yönde gidiyordum.” Daha sonraki dönüş sırasında bu hatırlanan yn, simüle sineğin hareketini yeniden kenara doğru yönlendirdi.

Araştırmacılar modeli 0, 45 ve 90 derecelik koridorlardaki yollara uydurdu. zet karşılaştırmada 72 gerçek sinek ve 75 simülasyon benzer yol istatistikleri üretti. Girişte öğrenilen geri dönüş yönü kaldırıldığında tüm koridor yönelimlerinde takip daha az verimli hale geldi. Bu, giriş-yönü hafızasının yararlılığını destekler; sineğin beyninin model denklemlerini kelimesi kelimesine çalıştırdığını kanıtlamaz.

Bu makalede “hafıza” ne anlama geliyor?

Araştırmacılar bir sineğin beyninden saklanmış bir oku doğrudan okumadı. “Yön hafızası”; davranış, model ve sinir ölçümleriyle desteklenen bir çıkarımdır. Model, değişen birkaç yönün önemli yol istatistiklerini yeniden üretebildiğini söyler. Sineğin denklemleri kelimesi kelimesine uyguladığını ya da adlandırılmış tek bir nöron grubunun depolama yeri olduğunu kanıtlamaz.

Ters yönelimli 45 derecelik bir bölümle ek deneyim, 10 sinekte daha sonraki davranışı değiştirdi; yanında 29 model simülasyonu vardı. Bu, yönsel açıklamayı olay sonrası bir betimlemeden daha özgül hale getirirken yine de model temelli bir yorum olarak bırakır.

Bir yön referansı ve mevcut hedef

Çalışma daha sonra sineğin yön bulmayla ilişkili bir beyin bölgesi olan **merkezi kompleks** içindeki etkinliği ölçtü ve bozdu.

Farklı görevleri olan iki sinyal

EPG ve FC2, merkezi kompleksteki iki nöron popülasyonunun adıdır. EPG etkinliği pusula okuması gibi davranır: sineğin rüzgâra göre şu anda hangi yöne baktığını izler. FC2 etkinliği sineğin gitmeye çalıştığı yönle ilişkilidir. Aşağı akım bir yönlendirme devresi mevcut baş yönünü bu hedefle karşılaştırabilir. Çalışma iki popülasyonu da test ediyor, ancak ikisinden herhangi birinin tek başına tüm hafızayı sakladığını göstermiyor.

EPG nöronları bir yön sinyali taşır: etkinlik desenleri sineğin dış bir ipucuna göre baktığı yönü izler. Sinir etkinliğinin dolaylı optik ölçümü olan kalsiyum görüntüleme kullanılarak araştırmacılar, kenar takibi sırasında EPG etkinlik fazının rüzgâra göre baş yönünü izlediğini buldu. Bu analiz 9 sinekten 16 deneyi kullandı.

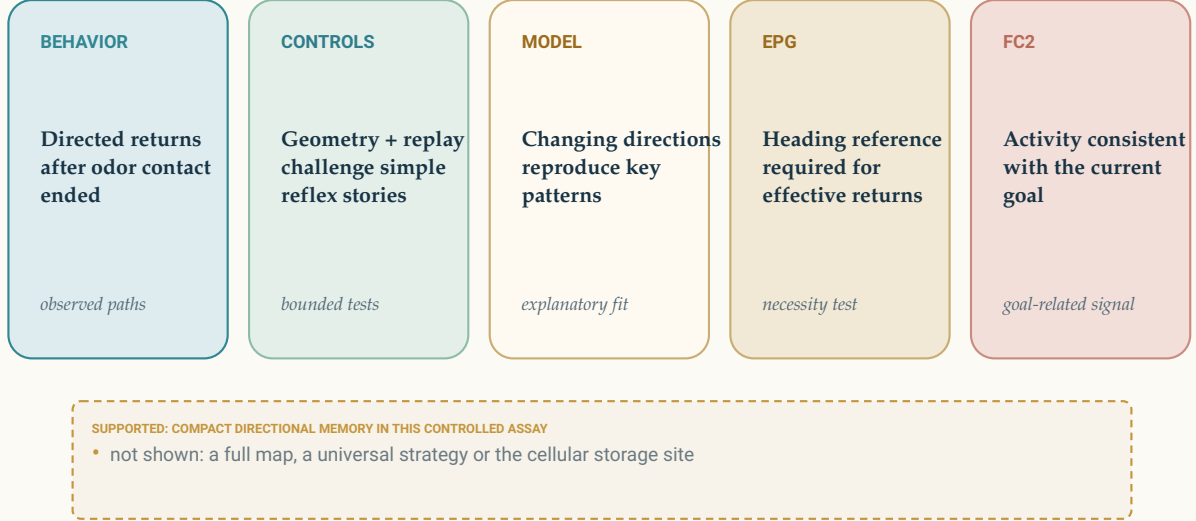
EPG nöronlarını baskılamak için araştırmacılar onları yeşil ışıqla açılan bir anyon kanalı olan **GtACR1** ifade edecek şekilde genetik olarak düzenledi. Test boyunca bir LED açık kaldı; kanalı etkinleştirip seçilmiş nöronları baskıladı. Aynı aydınlatma genetik kontrol sineklerini bozmadı.

EPG nöronları bu şekilde baskılandığında 12 deney sineği, 6 genetik kontrol sineğine göre daha az etkili yönlü dönüşler yaptı. Sınırlı sonuç, EPG etkinliğinin taşıdığı yön referansının test edilen koşullarda etkili kenar takibi için gerekli olduğudur. EPG nöronlarının sınır yönünü tek başına sakladığının kanıtı değildir.

FC2 nöronları farklı bir ilişki gösterdi. Popülasyon etkinliği mevcut yön bulma hedefiyle ilişkiliydi ve deneyde dönüşlerden önce koku bulutunun sınırına doğru yöneliyordu. Görüntülemelerde 6 sinek kullanıldı; susturma karşılaştırmalarında analize bağlı olarak 9 ila 14 sineklik gruplar vardı. Susturma kenar takibini bozdu.

Five evidence layers, five different claims

The cards converge; they are not a directly observed neural chain.



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

Davranış, değiştirilmiş koku bulutu geometrisi, uydurulmuş bir model ve iki sinirsel müdahale, yön hafızası açıklamasının farklı parçalarını destekler. Birlikte kontrollü bu deneyde kompakt bir hedef yönünü desteklerler; eksiksiz bir haritayı ya da kanıtlanmış hücrel depolama yerini değil.

The Clean Paper CC BY 4.0

Bu birleşen kanıttır; fotoğraflanmış bir nedensellik zinciri değildir. EPG etkinliği gerekli bir yön referansı sağladı. FC2 etkinliği hedef yönüyle uyumluydu ve etkili davranış için gerekliydi. Deneyler tek bir hafıza “engramı” bulmadı ve FC2 sinapslarının yönü fiziksel olarak sakladığını kanıtlamadı.

Kabaca insan ölçeğinde bir benzetme olarak, sabit bir rüzgârın size kuzeyin yönünü hâlâ söylediği dar bir sis bankasından çıktığınızı düşünün. Pusula hangi yöne baktığınızı söyleyebilir, ancak sise geri dönmek için kenarına doğru hatırlanan bir yön de gerekir. Mevcut yönü istenen yönle karşılaştırmak hangi tarafa dönmeniz gerektiğini söyler. Burada EPG ve FC2 sinyalleri için önerilen iş bölümü budur. Açıklayıcı bir benzetmedir; insanların aynı hücreleri ya da algoritmayı kullandığına dair kanıt değildir.

Hafıza yalnızca koku zamanlamasına değil, eyleme bağlıydı

Bir tekrar oynatma deneyinde sineklere daha öncekiyle aynı koku zaman dizisi verildi, ancak zamanlama o anda yaptıklarından koparıldı. Öğrenilmiş yönsel yanlılık, tekrar boutları boyunca zayıfladı. Bu, **edimsel**, eylemle bağlantılı bir güncellemeyi destekler: önemli olan yalnızca koku dizisine pasif maruz kalma değil, koku ile sineğin hareketi arasındaki ilişkiydi.

Bu analizlerde payda değişir. Extended Data panelleri karşılaştırmaya bağlı olarak 8 veya 9 sinek

içerir; ardışık-bout serisi 8 sinek kullanır; yol panelleri en az 10 etkili giriş gerektirir; eşleştirilmiş model panellerinde de bu giriş eşliğini karşılayan 21 simüle yol vardır. Bunlar sekiz sinekten oluşan tek bir havuz değildir.

Daha düzensiz bir koku bulutu yararlıydı, ama yine sanaldı

Araştırmacılar daha önce kaydedilmiş, daha düzensiz bir koku bulutunu da tekrar oynattı. Bağlı sineklerin yeterince sık karşılaşabilmesi için uzay ve zamanda beş kat ölçeklediler. **12 sineğin 10'u** kaynağın 50 sanal milimetre yakınına ulaştı.

Bu, on sineğin açık havada gerçek bir kaynak bulduğu anlamına gelmez. Doğala benzer bir bulutun kontrollü tekrarında gösterilen performanstır.

Her dinamik bulut türü için model 2.000 yol üretti. Ölçeklenmiş bulut karşılaştırması, etkili giriş koşulu ve kaynağa fazla yakın başlayan yolların dışlanmasıyla sonra bu 2.000 yolun 1.850'sini analiz etti. Hafıza, ardışık karşılaşmaların tutarlı yönsel yapı koruduğu kaynağa yakın yerde daha çok; daha aşağı rüzgârdaki daha türbülanslı bölgede ise daha az yardımcı oldu.

Bu niteleme sonucun parçasıdır. Kompakt bir yön ancak dünya, önceki karşılaşmanın bir sonraki hakkında yararlı bir şey söyleyebileceği kadar tutarlı kaldığında yardımcı olabilir.

Çalışmanın göstermediği şeyler

- Sineğin eksiksiz bir uzamsal harita oluşturduğunu **göstermiyor**.
- Değiştirilmemiş doğal bir koku bulutunda serbest uçuşu **göstermiyor**.
- Tüm koku güdümlü yön bulmanın bu stratejiyi kullandığını **ortaya koymuyor**.
- EPG veya FC2 nöronlarının hafızanın tek fiziksel depolama yeri olduğunu **göstermiyor**.
- Uydurulmuş modeli sineğin gerçek biyolojik algoritmasına **dönüştürmüyor**.
- İnsan yön bulmasına doğrudan **genellenmiyor**.

Çalışma en güçlü olduğu yerde en özgüldür. Kapalı döngü kontrol, araştırmacılara her koku karşılaşmasına hassas erişim verdi. Geometri değişiklikleri, tekrar oynatma, modelleme, kalsiyum görüntüleme ve susturma daha sonra tek bir açıklamanın farklı parçalarını test etti. Ancak davranış, görüntüleme ve susturma kohortları ayırdı; örneklem büyüklükleri önceden belirlenmedi; veri toplama ve analiz rastgeleleştirilmiş ya da kör değildi; ayrıca bağlı sineklerin %10'undan azı alıştırma, yanıt veya izleme sorunları nedeniyle dışlandı.

Bu sınırlar olguyu silmez. Onu tanımlar.

Kısa özet

Sanal bir koku koridorunda yürüyen bağlı meyve sinekleri, kokuyu geride bıraktıktan sonra tekrar tekrar sınıra geri döndü. Derişim ve koridor geometrisindeki değişiklikler, uydurulmuş geçişli bir model, sinir görüntüleme ve optogenetik susturma; sineğin tam bir harita yerine kompakt bir hatırlanan yön kullandığı açıklamasını destekliyor. EPG nöronları gerekli bir yön referansı sağlarken FC2 etkinliği mevcut hedef yönüyle uyumluydu. Sonuç kontrollü bir yürüme deneyine bağlıdır; hafızanın hücrel depolama yerini belirlemez ve serbest doğal uçuşta aynı hesaplamayı göstermez.

Abartısız değerlendirme

Makale neyi gösteriyor: Kapalı döngü, bağlı bir deneyde sinekler artık algılayamadıkları sanal koku sınırlarına yönlü geri dönüşler yaptı. Birden fazla davranış kontrolü, modelleme ve sinirsel müdahale vektör tabanlı bir stratejiyi destekliyor.

Ne çıkarılıyor: Davranışın kompakt bir yön hafızası kullandığı ve FC2 popülasyon etkinliğinin mevcut yön bulma hedefini temsil ettiği. Hafızanın içeriği doğrudan okunmadı.

Ne göstermiyor: Tam bir zihinsel haritayı, evrensel bir koku stratejisini, doğal bir bulutta serbest uçuş performansını, tek bir hafıza-depolama yerini ya da insandaki karşılığını.

Başlıca sınırlamalar: Tek tür ve kontrollü düzenek; deneyler arasında farklı sinek kohortları ve analiz birimleri; dolaylı kalsiyum sinyalleri; yeterlilik kanıtlamayan gereklilik testleri; ayrıca tekrar oynatılmış ve ölçeklenmiş doğala benzer bir bulut.

Genel bir okuyucu ne kadar güvenmeli: Bu düzende yönlü geri dönüş olgusunun gerçek olduğuna ve yön ile hedef ilişkili merkezi kompleks etkinliğinin önemli olduğuna yüksek güven. Modelin kompakt açıklama olarak uygunluğuna orta güven. Bunun açık havaya değişmeden taşındığı ya da eksiksiz bir harita olduğu iddiasına düşük güven.

Kaynaklar

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>