The Clean Paper

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

Nzi anaweza kupoteza harufu na bado kugeuka kurudi. Katika mkondo wa harufu wa mtandaoni, mwelekeo uliokumbukwa ulimsaidia

Nzi wa matunda waliofungwa mahali walirudi mara kwa mara kwenye mpaka wa harufu baada ya kutembea kuingia hewa safi. Tabia, modeli na usumbufu wa neva vinaunga mkono kumbukumbu fupi ya mwelekeo, si ramani kamili. Matokeo yanatoka katika jaribio la uhalisia pepe linalodhibitiwa na bado hayaonyeshi mkakati huohuo katika ndege huru ya asili.

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

Nzi anaweza kupoteza harufu na bado kugeuka kurudi kuielekea

Nzi alikuwa ameiacha harufu nyuma.

Aliendelea kutembea kupitia hewa safi, wakati mwingine kwa makumi ya sekunde na mamia ya milimita za mtandaoni. Kisha akageuka kuelekea mpaka aliokuwa ameuvuka na akaipata tena harufu. Wakati huo, harufu yenyewe haingeweza kumwonyesha njia ya kurudi.

Hilo ndilo jambo kuu lililozingatiwa katika utafiti mpya wa Nature kuhusu uelekezaji wa nzi wa matunda. Watafiti wanasema nzi walitumia kumbukumbu fupi ya mwelekeo: si ramani ya mkondo mzima wa harufu, wala kumbukumbu ya umbali waliosafiri, bali mwelekeo uliokumbukwa kuelekea mpaka ambao haukuweza tena kuhisiwa.

Matokeo yanavutia kwa sababu yanaonyesha jinsi taarifa ndogo sana iliyohifadhiwa inaweza kutosha. Pia ni rahisi kuyazidisha. Nzi hawa hawakuruka kwa uhuru katika mazingira ya asili. Walitembea wakiwa wamefungwa juu ya mpira unaobebwa na hewa ndani ya ulimwengu wa mtandaoni uliodhibitiwa kwa karibu. Utafiti unaunga mkono mkakati unaotumia vekta katika kifaa hicho; hauonyeshi kwamba nzi hujenga ramani za akili, hauelezi kila njia ambayo wanyama hufuata harufu, wala hautambui seli ambazo kumbukumbu imehifadhiwa kimwili.

Korido isiyoonekana ilitengenezwa na programu

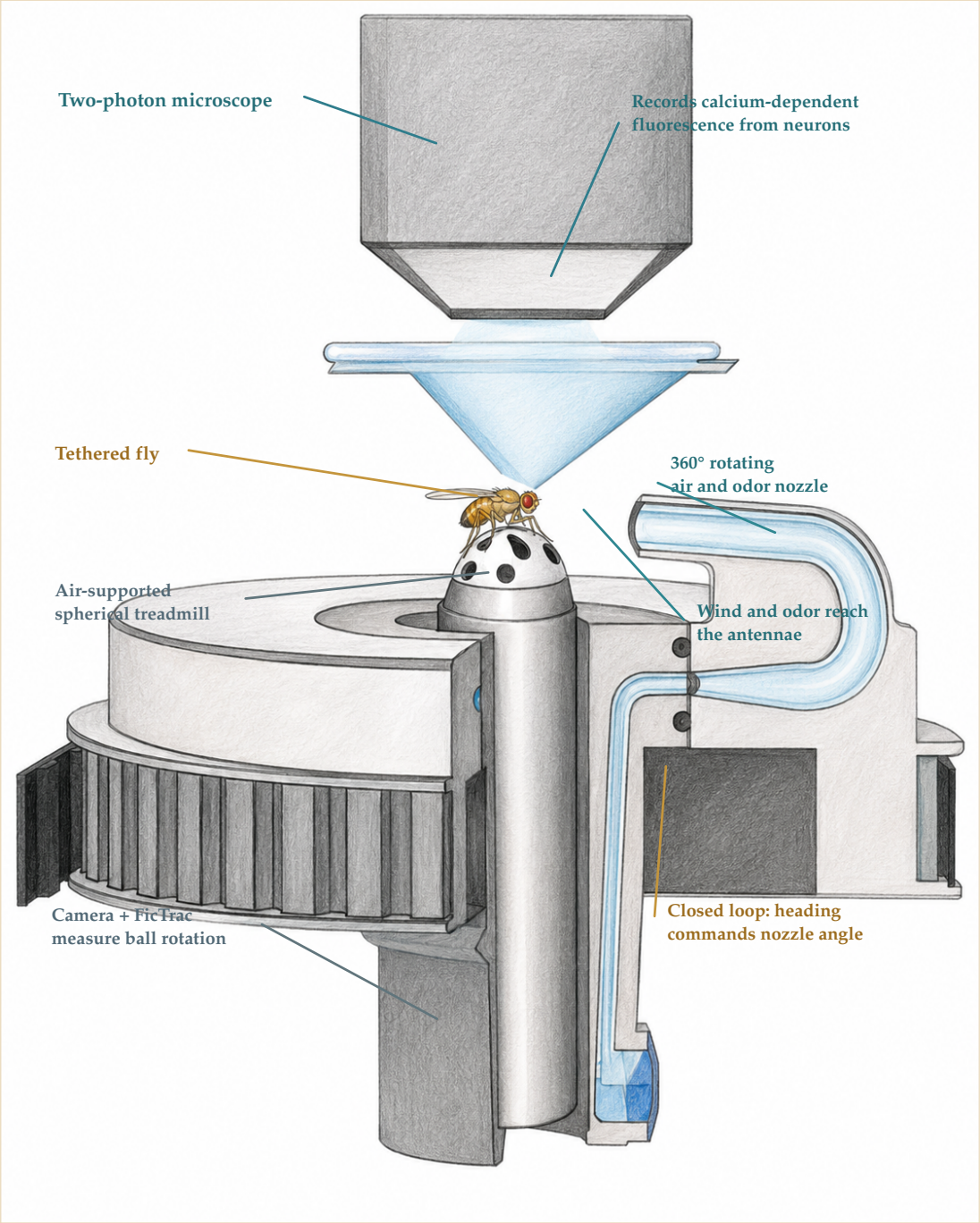
Mkondo wa harufu ni eneo linalosonga la harufu inayobebwa na hewa. Nje, mkondo huo hupinda, hugawanyika na kuungana tena upepo unapobadilika. Hilo hufanya iwe vigumu kujua kwa usahihi mnyama alinusa nini katika kila wakati.

Watafiti waliifanya tatizo lidhibitiwe kwa **uhalisia pepe wa kitanzi funge**. Mwili wa nzi ulifungwa mahali juu ya mpira mwepesi unaoelea kwa hewa. Nzi alipotembea, kamera ilipima mzunguko wa mpira takriban mara 60 kwa sekunde. Programu ilitafsiri mzunguko huo kuwa nafasi ya mtandaoni yenye vipimo viwili na mwelekeo wake.

Mwelekeo huo ulidhibiti pua ya kutolea hewa inayoendeshwa na mota inayoweza kuzunguka nyuzi 360. Nzi alipobadilisha mwelekeo wake wa mtandaoni, pua hiyo ilisogea kumzunguka ili kuweka upepo sambamba na mwelekeo thabiti katika ulimwengu wa mtandaoni wa nzi. Wakati huohuo, vidhibiti vya mtiririko wa wingi vilibadilisha kiasi cha hewa safi au harufu ya siki ya tufaha iliyofikia antena kulingana na nafasi ya mtandaoni ya nzi. Kwa hiyo kuvuka mpaka uliowekwa na programu kuliwasha au kuzima harufu, na kuunda korido ya kubuni yenye upana wa milimita 50 na urefu wa mita moja ingawa nzi hakuwahi kuondoka kwenye mpira.

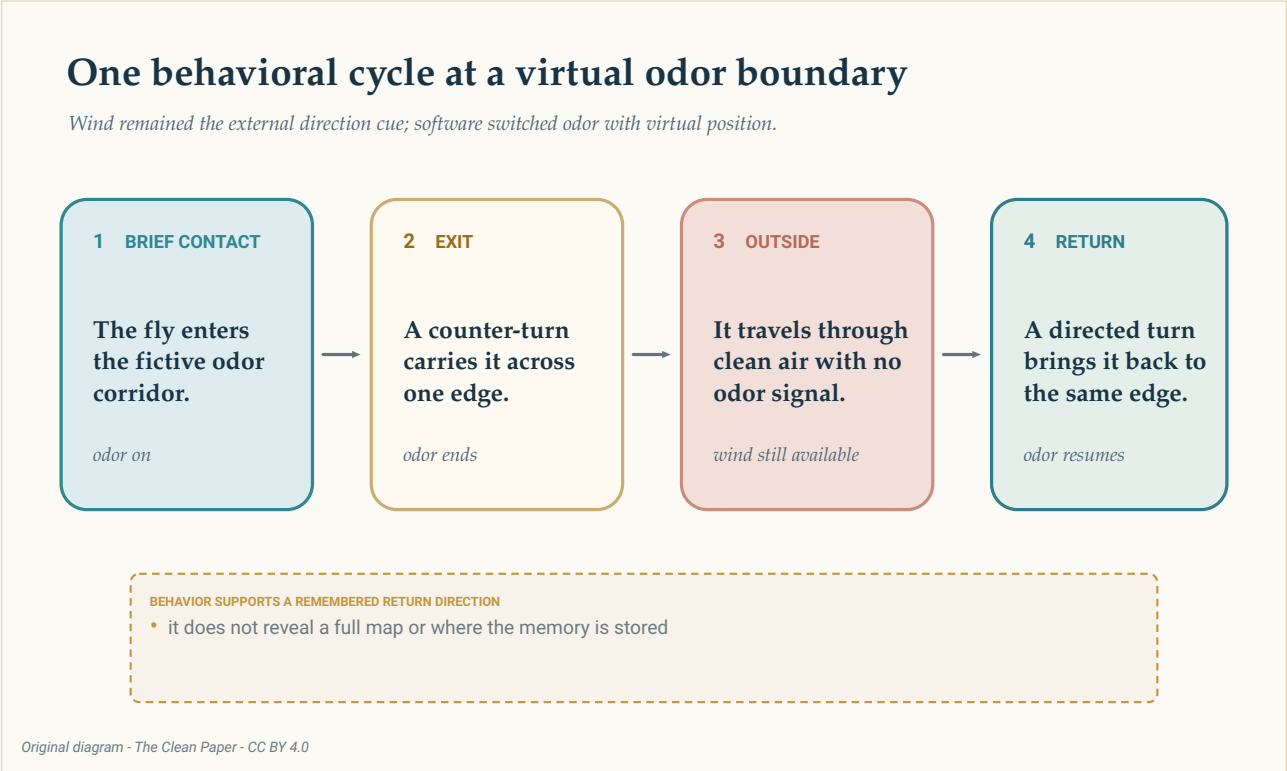
Kifaa kilitoa rekodi iliyosawazishwa ya nafasi ya mtandaoni ya nzi, mwelekeo, hali ya harufu na mipangilio ya udhibiti wa mtiririko wa hewa katika kila wakati. Kutoka rekodi hiyo, watafiti walijenga upya njia, wakaweka alama kila kuingia na kutoka, na kupima jinsi nzi alivyorejea moja kwa moja. Upepo ulitoa ishara ya nje ya mwelekeo; mwendo wa nzi mwenyewe uliamua ni lini alikutana na

upande wowote wa mpaka wa harufu wa mtandaoni.



Nzi alibaki amefungwa juu ya mpira unaobebwa na hewa. Kamera na FicTrac ziligeuza mzunguko wa mpira kuwa mwendo na mwelekeo wa mtandaoni; programu kisha ilizungusha pua ya hewa na harufu na kuwasha au kuzima harufu kulingana na nafasi ya mtandaoni. Katika majaribio tofauti ya picha za neva, darubini ya fotoni mbili juu ya nzi ilirekodi fluoresensi inayotegemea kalsiamu kutoka neuroni za EPG au FC2, na kuruhusu shughuli ya neva kusawazishwa na tabia. Darubini haikuhitajika kwa kila jaribio la tabia.

The Clean Paper CC BY 4.0



Katika jaribio linalodhibitiwa, nzi aliingia kwa muda mfupi katika korido ya harufu ya mtandaoni, akatoka, akasafiri kupitia hewa isiyo na harufu na akafanya kurudi kwa mwelekeo. Tabia inaunga mkono mwelekeo wa kurudi uliokumbukwa; haionyeshi taarifa hiyo imehifadhiwa wapi.

The Clean Paper CC BY 4.0

Katika jaribio kuu la **korido wima**, **nzi 40** waliingia mara kwa mara kwenye harufu, wakafanya geuko la kurudi kutoka humo na kurudi kwenye ukingo uleule. “Wima” ni jina la makala kwa jiometri ya nyuzi 0: mhimili mrefu wa korido ulikuwa sambamba na mwelekeo wa kuelekea upepo. Haimaanishi kifaa kilisimama wima.

Waandishi wanaita muundo huu **ufuatiliaji wa ukingo**. **Kipindi** ni kipindi kimoja endelevu kati ya kuvuka mpaka: kipindi cha ndani kinaanza kuingia hadi kutoka, na kipindi cha nje kutoka hadi nzi anaporudi. Katika vipindi 755 vya ndani, ziara ilidumu wastani wa sekunde 4.9. Wakati wa kurudi, wastani wa umbali kutoka mpaka ulikuwa milimita 10.4. Chini ya 4% ya vipindi 793 vilivuka hadi ukingo wa upande mwingine wa korido.

Nambari hizo mbili za mwisho zinaeleza vipindi, si mamia ya nzi huru tofauti. Tofauti hiyo ni muhimu kwa sababu mnyama mmoja anaweza kuchangia vipindi vingi.

Kurudi hakukuwa reflex tu ya kudumu ya kuelekea upepo

Majaribio kadhaa yalijaribu maelezo rahisi zaidi.

Watafiti kwanza walibadilisha kilichotokea **kando ya** korido nzi alipotembea kuelekea upepo. Harufu ingeweza kuongezeka kuelekea chanzo cha mtandaoni, kubaki thabiti au kupungua. Nzi

walitoa njia zinazofanana katika hali zote tatu. Kwa hiyo kanuni rahisi kama “endelea popote harufu inapoongezeka” haiwezi kueleza ufuatiliaji wa ukingo katika kifaa hiki.

Kisha walilainisha ukingo wa korido wa **upande** kuwa wasifu wa Gaussian, ambapo ukolezi ulibadilika taratibu badala ya kuwaka au kuzima ghafla. Nzi walikusanyika karibu na upande ambako ukolezi ulibadilika kwa kasi zaidi, si katikati ambako harufu ilikuwa kubwa zaidi. Kwa hiyo ishara muhimu ilikuwa mabadiliko ya pembeni yaliyoweka mpaka wa kiutendaji, badala ya ongezeko linalohitajika kuelekea chanzo kando ya korido.

Hilo halimaanishi miteremko ya ukolezi haina umuhimu kamwe katika mazingira ya asili. Linamaanisha ongezeko kuelekea chanzo halikuhitajika kwa tabia hii chini ya hali zilizojaribiwa.

Watafiti pia walibadilisha mwelekeo wa korido. Makundi tofauti yalifuatilia korido wima, nyuzi 45 na nyuzi 90, na kundi jingine lilikutana na korido iliyohama pembeni baada ya kutoka. Ukubwa wa makundi ulikuwa nzi 40, 21, 20 na 24, mtawalia. Njia zao za nje zilibadilika kulingana na jiometri. Kanuni ya jumla kama “geuka daima kuelekea upepo” haiwezi kueleza unyumbufu huo.

Katika kifaa hiki, harufu ilifikia antena mbili ndani ya takriban milisekunde mbili. Kuunganisha uanzishaji wa optojenetiki ya pande zote mbili na upepo kuliweza kuzaa muundo unaofanana na ufuatiliaji wa ukingo. **Optojenetiki** hutumia protini zinazohisi mwanga kubadilisha seli zilizochaguliwa. Hapa matokeo yanaonyesha tofauti ya kushoto dhidi ya kulia katika wakati wa kufika kwa harufu haikuwa lazima kwa tabia hii. Hayafanyi ulinganisho wa pande mbili kutokuwa na maana kwa wanyama wanaosogea kwa uhuru katika mikondo mingine ya harufu.

Vekta ni ndogo kuliko ramani

Vekta ni mwelekeo pamoja na ukubwa. Kiasi muhimu kilichohifadhiwa hapa kilikuwa hasa cha mwelekeo: nzi anapaswa kugeuka njia gani ili kufikia mpaka wa mkondo wa harufu? Utafiti haukupata ushahidi kwamba nzi alihifadhi mpangilio kamili wa mkondo wa harufu au nafasi yake ndani yake.

Waandishi kwanza walitengeneza njia bandia kwa kuchanganya viambato vya mwendo halisi wa nzi. Walichukua urefu wa vipindi vya kutembea na pembe za kugeuka zilizozingatiwa kwa nasibu na kuziunganisha. Baadhi ya watembeaji hawa bandia hatimaye waligonga tena mpaka wa harufu, lakini walizunguka mbali zaidi na walichukua njia zisizo za moja kwa moja kuliko nzi halisi. Hata kuongeza tabia ya kawaida ya nzi kugeuka kuelekea upepo hakukuzaa kurudi kifupi na kwa mwelekeo. Kwa hiyo tabia halisi ilikuwa na taarifa ya mwelekeo zaidi kuliko mchanganyiko wa nasibu ya harakati zilezile.

Kisha watafiti walijenga modeli yenye hali mbili: **kuondoka kwenye mpaka** na **kurudi kwenye mpaka**. Hali hizi hazikuwa lebo za kila wakati ndani au nje ya harufu. Zilikuwa sheria mbadala za uelekezaji zinazoweza kubadilika nzi anaposogea.

Kila kuvuka mpaka kuliipa modeli mwelekeo wa kukumbuka. Wakati wa kutoka, ilisasisha mwelekeo unaotumiwa wakati wa kuondoka. Wakati wa kuingia, ilisasisha mwelekeo tofauti wa kurudi: kwa namna fulani, “nilipopata mpaka, nilikuwa nasogea hivi.” Wakati wa kurudi baadaye, mwelekeo huo uliokumbukwa uliupendelea mwendo wa nzi aliyeigwa katika simuleringi kurudi ukingoni.

Watafiti walikadiria vigezo vya modeli kwa kutumia njia katika korido za nyuzi 0, 45 na 90. Katika ulinganisho wa muhtasari, nzi halisi 72 na simuleringi 75 zilitoa takwimu zinazofanana za njia. Mwelekeo wa kurudi uliosomwa wakati wa kuingia ulipoondolewa, ufuatiliaji ulikuwa na ufanisi mdogo katika mielekeo yote ya korido. Hilo linaunga mkono manufaa ya kumbukumbu ya mwelekeo wa kuingia; halithibitishi kwamba ubongo wa nzi unaendesha milinganyo ya modeli kihalisi.

> **"Kumbukumbu" ina maana gani katika makala hii?**
>
> Watafiti hawakusoma mshale uliowekwa moja kwa moja kutoka ubongo wa nzi. "Kumbukumbu ya mwelekeo" ni hitimisho linaloungwa mkono na tabia, modeli na vipimo vya neva. Modeli inasema kwamba mwelekeo michache inayobadilika inaweza kuzaa takwimu muhimu za njia. Haithibitishi kwamba nzi hutekeleza milinganyo kihalisi, wala kwamba kundi moja lililotajwa la neuroni ndilo eneo la kuhifadhi.

Uzoefu wa ziada na kipande cha nyuzi 45 kilichoelekezwa upande tofauti ulibadilisha tabia ya baadaye katika nzi 10, pamoja na simuleringi 29 za modeli. Hilo linafanya maelezo ya mwelekeo kuwa mahususi zaidi kuliko maelezo ya baada ya tukio, huku yakibaki tafsiri inayotegemea modeli.

Rejea ya mwelekeo na lengo la sasa

Kisha utafiti ulipima na kuvuruga shughuli katika **kompleksi ya kati (central complex)** ya nzi, eneo la ubongo linalohusika na uelekezaji.

> **Ishara mbili zenye kazi tofauti**
>
> EPG na FC2 ni majina ya makundi mawili ya neuroni katika kompleksi ya kati. Shughuli ya EPG hufanya kazi kama usomaji wa dira: hufuatilia mwelekeo ambao nzi anaangalia kwa sasa ukilinganishwa na upepo. Shughuli ya FC2 inahusishwa na mwelekeo ambao nzi anajaribu kusafiri. Mzunguko wa neva wa uelekezaji ulio chini ya mkondo unaweza kulinganisha mwelekeo wa sasa na lengo hilo. Utafiti unajaribu makundi yote mawili, lakini hauonyeshi kwamba mojawapo peke yake huhifadhi kumbukumbu yote.

Neuroni za EPG hubeba ishara ya mwelekeo: muundo wa shughuli zake hufuatilia mwelekeo nzi anaokabili ukilinganishwa na ishara ya nje. Kwa kutumia upigaji picha wa kalsiamu, usomaji wa macho usio wa moja kwa moja wa shughuli ya neva, watafiti waliona awamu ya shughuli ya EPG ikifuata mwelekeo wa nzi ukilinganishwa na upepo wakati wa ufuatiliaji wa ukingo. Uchanganuzi huu ulitumia majaribio 16 kutoka nzi 9.

Ili kuzuia neuroni za EPG, watafiti walizibadilisha kijeni kueleza **GtACR1**, njia ya anioni inayowashwa na mwanga wa kijani. LED ilibaki imewashwa katika jaribio lote la majaribio, ukiiwasha njia hiyo na kukandamiza neuroni zilizochaguliwa; mwanga huohuo haukuathiri nzi wa udhibiti wa kijeni.

Neuroni za EPG zilipozuiwa kwa njia hii, nzi 12 wa majaribio walifanya kurudi kwa mwelekeo

kwa ufanisi mdogo kuliko nzi 6 wa udhibiti wa kijeni. Hitimisho lenye mipaka ni kwamba rejea ya mwelekeo inayobebwa na shughuli ya EPG ilihitajika kwa ufuatiliaji wa ukingo wenye ufanisi chini ya hali zilizojaribiwa. Si ushahidi kwamba neuroni za EPG peke yake zilihifadhi mwelekeo wa mpaka.

Neuroni za FC2 zilionyesha uhusiano tofauti. Shughuli ya kundi lao ilihusishwa na lengo la sasa la uelekezaji na ilielekea kwenye mpaka wa mkondo wa harufu kabla ya migeuko katika jaribio. Upigaji picha ulitumia nzi 6, na ulinganisho wa kuzimwa kwa shughuli ulitumia makundi ya nzi 9 hadi 14 kutegemea uchanganuzi. Kuzimwa kwa shughuli kuliharibu ufuatiliaji wa ukingo.

Tabia, jiometri ya mkondo wa harufu iliyobadilishwa, modeli iliyokadiriwa na vurugaji mbili za neva zinaunga mkono sehemu tofauti za maelezo ya kumbukumbu ya mwelekeo. Kwa pamoja zinaunga mkono mwelekeo mfupi wa lengo katika jaribio hili linalodhibitiwa, si ramani kamili wala eneo la seli lililothibitishwa la kuhifadhi.

The Clean Paper CC BY 4.0

Huu ni ushahidi unaoungana, si mnyororo wa sababu na athari ulioonyeshwa moja kwa moja. Shughuli ya EPG ilitoa rejea ya mwelekeo inayohitajika. Shughuli ya FC2 ililingana na mwelekeo wa lengo na ilihitajika kwa tabia yenye ufanisi. Majaribio hayakutambua “engram” moja ya kumbukumbu wala kuthibitisha kwamba sinepsi za FC2 zilihifadhi mwelekeo kimwili.

Kama analogia ya takriban kwa kiwango cha binadamu, fikiria unatoka katika ukanda mwembamba wa ukungu huku upepo thabiti ukiendelea kukuambia kaskazini ni wapi. Dira inaweza kukuambia unaangalia upande gani, lakini kurudi kwenye ukungu pia kunahitaji mwelekeo uliokumbukwa kuelekea ukingo wake. Kulinganisha mwelekeo wa sasa na mwelekeo huo unaotaka kunakuambia ugeuke wapi. Huo ndio mgawanyo wa kazi unaopendekezwa hapa kwa ishara za EPG na FC2. Ni analogia ya maelezo, si ushahidi kwamba binadamu hutumia seli au algoriti ileile.

Kumbukumbu ilitegemea kitendo, si muda wa harufu pekee

Katika jaribio la uchezaji upya, nzi walipokea mfuatano uleule wa nyakati za harufu kama awali, lakini muda ulitenganishwa na walichokuwa wakifanya wakati huo. Upendeleo wa mwelekeo uliojifunzwa ulidhoofika katika vipindi vya uchezaji upya. Hilo linaunga mkono usasishaji **unaotegemea tendo**, uliounganishwa na kitendo: muhimu hakikuwa kuonyeshwa tu mfuatano wa harufu bila kutenda, bali uhusiano kati ya harufu na mwendo wa nzi.

Idadi inayotumika kama kigawanyo hubadilika katika uchanganuzi huo. Paneli za Extended Data zinajumuisha nzi 8 au 9 kutegemea ulinganisho; mfululizo wa vipindi mfuatano hutumia nzi 8; paneli za njia zinahitaji angalau mara 10 za kuingia zenye ufanisi; na paneli za modeli zilizooanishwa hutumia njia 21 za simuleringi zinazokidhi pia kizingiti hicho cha kuingia. Hizi si sampuli moja iliyounganishwa ya nzi wanane.

Mkondo wa harufu unaofanana zaidi na hali ya asili ilikuwa muhimu, lakini bado ilikuwa ya mtandaoni

Watafiti pia walicheza upya mkondo wa harufu uliorekodiwa awali yenye mabadiliko mengi zaidi. Waliipanua mara tano katika nafasi na muda ili nzi waliofungwa waweze kukutana nayo mara ya kutosha. **Nzi 10 kati ya 12** walifika ndani ya milimita 50 za mtandaoni kutoka chanzo chake.

Hiyo si nzi kumi waliopata chanzo halisi katika hewa wazi. Ni utendaji katika uchezaji upya unaodhibitiwa wa mkondo wa harufu unaofanana na hali ya asili.

Kwa kila aina ya mkondo wa harufu wenye mienendo, modeli ilizalisha njia 2,000. Ulinganisho wa mkondo wa harufu uliopanuliwa ulichambua 1,850 kati ya 2,000 baada ya kuhitaji kuingia kwa ufanisi na kuondoa njia zilizoanza karibu mno na chanzo. Kumbukumbu ilisaidia zaidi karibu na chanzo, ambapo mikutaniko ya harufu inayofuatana ilibaki na muundo wa mwelekeo ulio thabiti, na kidogo zaidi katika eneo lenye mtiririko wenye vurugu upande wa chini wa upepo.

Sifa hiyo ya tahadhari ni sehemu ya matokeo. Mwelekeo mfupi unaweza kusaidia tu wakati ulimwengu unabaki thabiti kimwelekeo vya kutosha kwa mkutano uliopita na harufu kusema jambo muhimu kuhusu inayofuata.

Kile ambacho utafiti hauonyeshi

- **Hauonyeshi** nzi akijenga ramani kamili ya anga.
- **Hauonyeshi** ndege huru kupitia mkondo wa harufu wa asili ambayo haijabadilishwa.
- **Hauonyeshi** kwamba uelekezaji wote unaoongozwa na harufu hutumia mkakati huu.
- **Hauonyeshi** kwamba neuroni za EPG au FC2 ndizo eneo pekee la kimwili la kuhifadhi kumbukumbu.

- **Haubadili** modeli iliyokadiriwa kuwa algoriti halisi ya kibaolojia ya nzi.
- **Hauwezi** kuhamishwa moja kwa moja kwa uelekezaji wa binadamu.

Utafiti una nguvu zaidi pale ulipo mahususi zaidi. Udhibiti wa kitanzi funge uliwapa watafiti ufikiaji sahihi wa kila mkutano na harufu. Mabadiliko ya jiometri, uchezaji upya, uundaji wa modeli, upigaji picha wa kalsiamu na kuzimwa kwa shughuli kisha yalijaribu sehemu tofauti za maelezo moja. Lakini makundi ya tabia, upigaji picha na kuzimwa kwa shughuli yalikuwa tofauti; ukubwa wa sampuli haukuamuliwa mapema; ukusanyaji na uchanganuzi wa data haukupangwa kwa nasibu wala kufichwa kwa wachambuzi; na chini ya 10% ya nzi waliofungwa waliondolewa kwa matatizo ya kuzoea, kujibu au ufuatiliaji.

Mipaka hiyo haifuti jambo lililoonekana. Inaweka mipaka yake.

Muhtasari safi

Nzi wa matunda waliofungwa wakitembea katika korido ya harufu ya mtandaoni walirudi mara kwa mara kwenye mpaka baada ya kuiacha harufu nyuma. Mabadiliko ya ukolezi na jiometri ya korido, modeli ya kubadili hali iliyokadiriwa, upigaji picha wa neva na uzimaji wa shughuli kwa optojenetiki vinaunga mkono maelezo kwamba nzi hutumia mwelekeo mfupi uliokumbukwa badala ya ramani kamili. Neuroni za EPG zilitoa rejea ya mwelekeo inayohitajika, huku shughuli ya FC2 ikilingana na mwelekeo wa lengo la sasa. Matokeo yamewekewa mipaka kwenye jaribio la kutembea linalodhibitiwa; hayatambui eneo la seli la kuhifadhi kumbukumbu wala kuonyesha uchakataji uleule wa neva katika ndege huru ya asili.

Ukaguzi bila chumvi

Kile makala inaonyesha: Katika jaribio la kitanzi funge la nzi waliofungwa, nzi walifanya kurudi kwa mwelekeo kwenye mipaka ya harufu ya mtandaoni ambayo hawakuweza tena kuihisi. Vidhibiti vingi vya tabia, uundaji wa modeli na vurugaji wa neva vinaunga mkono mkakati unaotumia vekta.

Kile kinachohitimishwa: Kwamba tabia hutumia kumbukumbu fupi ya mwelekeo, na kwamba shughuli ya kundi la FC2 inawakilisha lengo la sasa la uelekezaji. Maudhui ya kumbukumbu hayakusomwa moja kwa moja.

Kile ambacho haionyeshi: Ramani kamili ya akili, mkakati wa jumla wa kunusa, utendaji wa ndege huru katika mkondo wa harufu wa asili, eneo moja la kuhifadhi kumbukumbu au analogia ya moja kwa moja kwa binadamu.

Vikwazo vikuu: Spishi moja na kifaa kilichodhibitiwa; makundi na vitengo tofauti vya uchanganuzi katika majaribio; ishara zisizo za moja kwa moja za kalsiamu; majaribio ya ulazima ambayo hayathibitishi utoshelevu; na mkondo wa harufu unaofanana na hali ya asili uliochezwa upya na kupanuliwa.

Msomaji wa kawaida awe na imani kiasi gani? Imani kubwa kwamba jambo la kurudi kwa mwelekeo ni halisi katika kifaa hiki na kwamba shughuli ya kompleksi ya kati inayohusiana na mwelekeo na lengo ni muhimu. Imani ya wastani katika modeli kama maelezo mafupi. Imani ndogo katika dai lolote linaloipanua bila mabadiliko hadi hewa wazi au kuiita ramani kamili.

Vyanzo

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