The Clean Paper

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

Ճանճը կարող է կորցնել հոտը և միևնույն է հետ դառնալ: Վիրտուալ հոտային շիթում օգնեց հիշված ուղղությունը

Ամրացված պտղաճանճերը մաքուր օդի մեջ դուրս գալուց հետո բազմիցս վերադարձան հոտի սահմանին: Վարքը, մոդելավորումը և նյարդային միջամտությունները աջակցում են ուղղության կոմպակտ հիշողությանը, ոչ ամբողջական քարտեզին: Արդյունքը գալիս է վերահսկվող վիրտուալ իրականության փորձից և դեռ չի ցույց տալիս նույն ռազմավարությունը ազատ բնական թռիչքում:

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

Ճանճը կարող է կորցնել հոտը և միևնույն է հետ դառնալ դեպի այն

Ճանճը հոտը թողել էր հետևում։

Այն շարունակում էր քայլել մաքուր օդի միջով՝ երբեմն տասնյակ վայրկյաններ և հարյուրավոր վիրտուալ միլիմետրեր։ Հետո շրջվում էր դեպի այն սահմանը, որը անցել էր, և նորից գտնում հոտը։ Այդ պահին հենց հոտը չէր կարող ցույց տալ վերադարձի ճանապարհը։

Սա պտղաճանճերի նավիգացիայի մասին Nature-ի նոր ուսումնասիրության կենտրոնական դիտարկումն է։ Հետազոտողները պնդում են, որ ճանճերը օգտագործել են ուղղության կոմպակտ հիշողություն՝ ոչ ամբողջ հոտային շիթի քարտեզ և ոչ անցած հեռավորության հիշողություն, այլ այն սահմանի ուղղության հիշված ազիմուտը, որն այլևս չէր զգացվում։

Արդյունքը տպավորիչ է, որովհետև ցույց է տալիս, թե որքան քիչ պահված տեղեկատվություն կարող է բավարար լինել։ Բայց այն նաև հեշտ է չափազանցնել։ Այս ճանճերը ազատ չեն թռչել բնական լանդշաֆտով։ Նրանք քայլել են ամրացված վիճակում՝ օդով պահվող գնդի վրա, խիստ վերահսկվող վիրտուալ աշխարհի ներսում։ Ուսումնասիրությունը այս սարքավորման մեջ աջակցում է վեկտորային ռազմավարությանը. այն չի ցույց տալիս, որ ճանճերը մտավոր քարտեզներ են կառուցում, չի բացատրում կենդանիների հոտեր հետևելու բոլոր ձևերը և չի նույնականացնում այն բջիջները, որոնցում հիշողությունը ֆիզիկապես պահվում է։

Անտեսանելի միջանցքը ստեղծվել էր ծրագրային ապահովմամբ

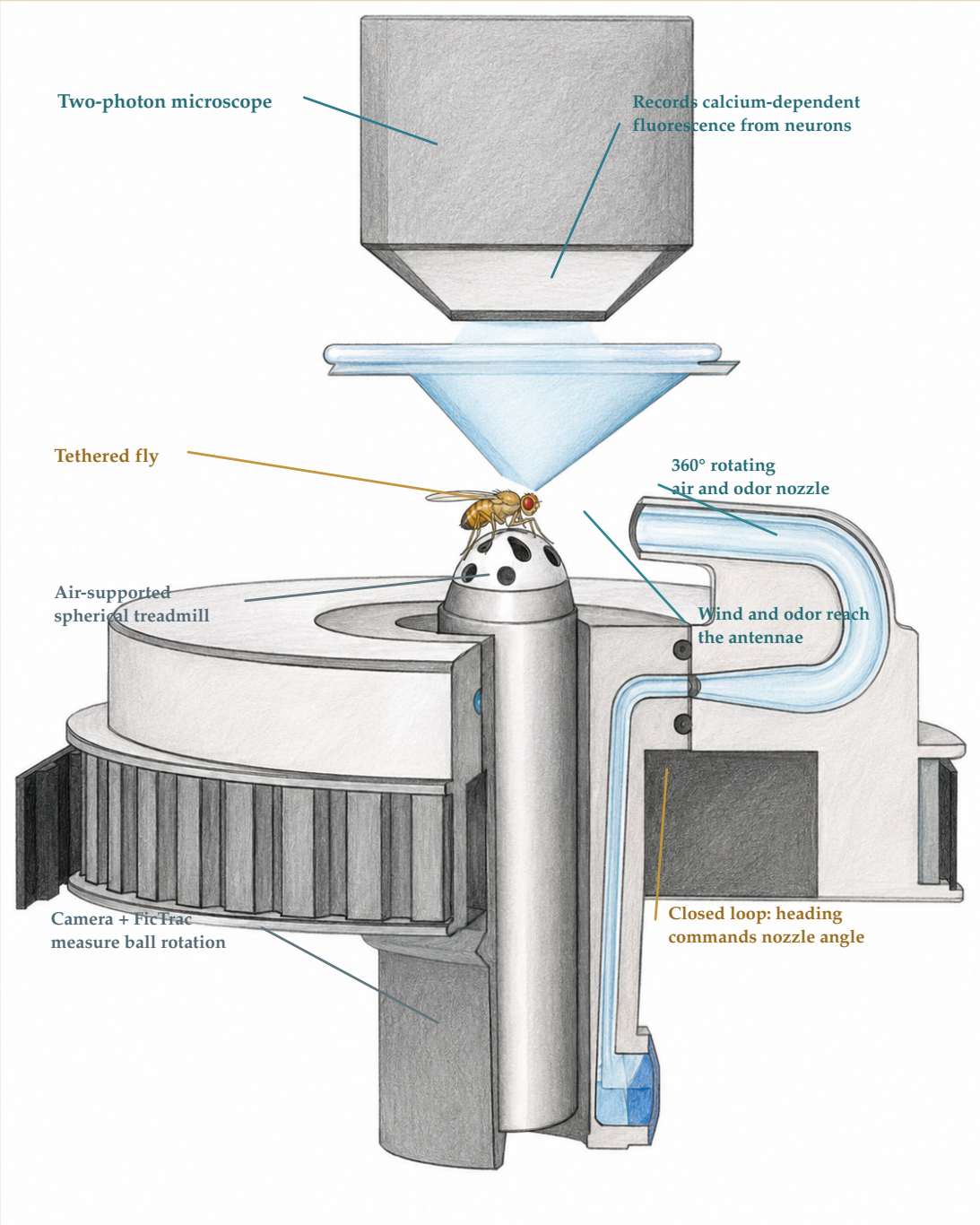
Հոտային շիթը օդով տեղափոխվող հոտի շարժվող շրջանն է։ Բաց տարածքում շիթը քամու փոփոխության հետ ծռվում է, մասնատվում և նորից միանում։ Դրա պատճառով դժվար է ճշգրիտ իմանալ՝ կենդանին յուրաքանչյուր պահին ինչ է հոտոտել։

Հետազոտողները խնդիրը վերահսկելի են դարձրել **փակ օղակով վիրտուալ իրականության** միջոցով։ Ճանճի մարմինը տեղում ամրացված էր օդի վրա լողացող թեթև գնդի վերևում։ Երբ ճանճը քայլում էր, տեսախցիկը մոտ վայրկյանում 60 անգամ չափում էր գնդի պտույտը։ Ծրագիրը այդ պտույտը փոխակերպում էր վիրտուալ երկչափ դիրքի և ուղղության։

Այդ ուղղությունը կառավարում էր շարժիչով վարդակը, որը կարող էր պտտվել 360 աստիճանով։ Երբ ճանճը փոխում էր իր վիրտուալ ուղղությունը, վարդակը շարժվում էր նրա շուրջ՝ քամին ճանճի վիրտուալ աշխարհում կայուն ուղղության հետ համահունչ պահելու համար։ Միաժամանակ զանգվածային հոսքի կարգավորիչները

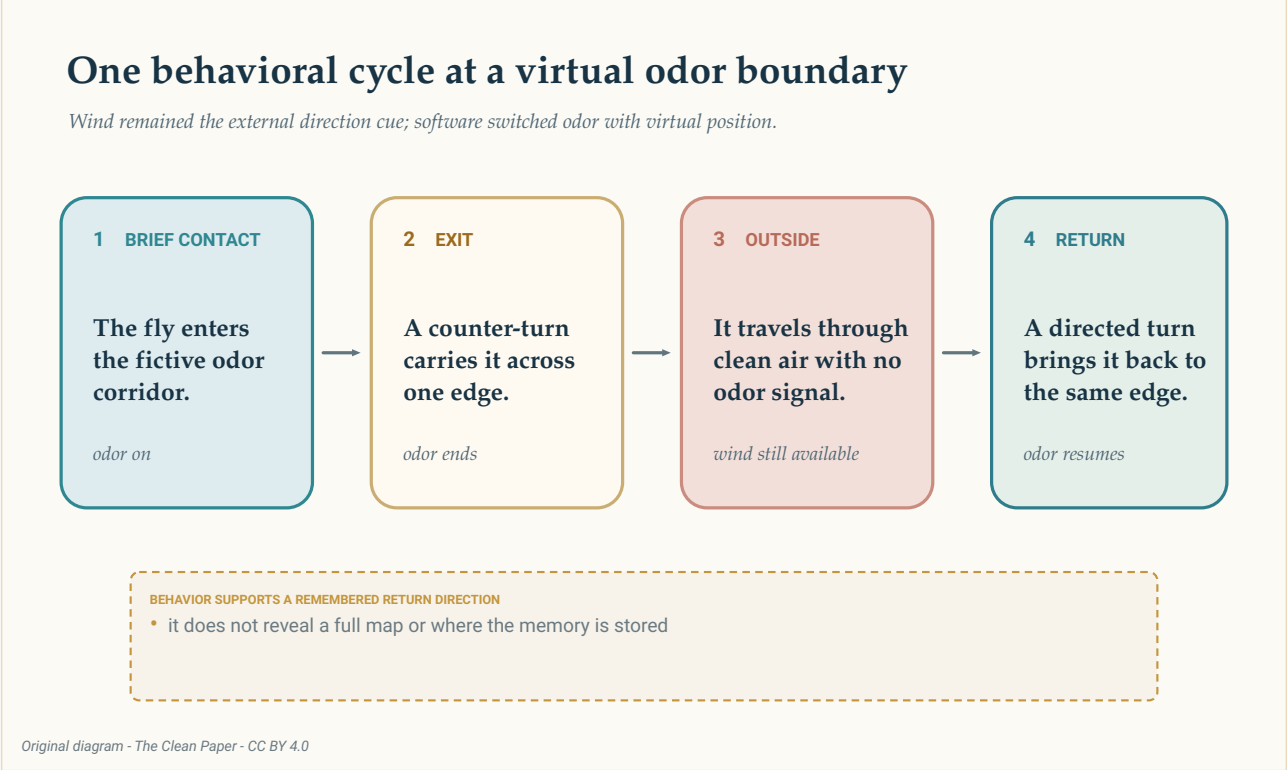
փոխում էին, թե ճանճի բեղիկներին որքան մաքուր օդ կամ խնձորի քացախի հոտ է հասնում՝ ըստ նրա վիրտուալ դիրքի: Ծրագրային սահմանը անցնելը այդպիսով միացնում կամ անջատում էր հոտը՝ ստեղծելով 50 միլիմետր լայնությամբ և մեկ մետր երկարությամբ երևակայական միջանցք, թեև ճանճը երբեք չէր լքում գունդը:

Սարքավորումը յուրաքանչյուր պահին համաժամեցված ձևով գրանցում էր ճանճի վիրտուալ դիրքը, ուղղությունը, հոտի վիճակը և օդային հոսքի կառավարումը: Այդ գրառումից հետազոտողները վերականգնել են ուղիները, նշել յուրաքանչյուր մուտքն ու ելքը և չափել՝ որքան ուղիղ է ճանճը վերադարձել: Քամին տալիս էր արտաքին ուղղության հուշումը, իսկ ճանճի սեփական շարժումն էր որոշում, թե երբ է այն հանդիպում վիրտուալ հոտային սահմանի որևէ կողմին:



Ճանճը մնում էր ամրացված՝ օդով պահվող գնդի վերևում: Տեսախցիկը և FicTrac-ը գնդի պտույտը փոխակերպում էին վիրտուալ շարժման ու ուղղության, իսկ ծրագիրը հետո պտտում էր օդևհոտ վարդակը և ըստ վիրտուալ դիրքի միացնում կամ անջատում հոտը: Առանձին նյարդային պատկերման փորձերի ժամանակ ճանճի վերևի երկֆոտոնային մանրադիտակը գրանցում էր EPG կամ FC2 նեյրոնների կալցիումից կախված ֆլուորեսցենցիան՝ թույլ տալով նյարդային ակտիվությունը համադրել վարքի հետ: Մանրադիտակը յուրաքանչյուր վարքային փորձի համար անհրաժեշտ չէր:

The Clean Paper CC BY 4.0



Վերահսկվող փորձի մեջ ճանճը կարճ մտնում էր վիրտուալ հոտային միջանցք, դուրս գալիս, անցնում հոտազուրկ օդով և ուղղված վերադարձ կատարում: Վարքը աջակցում է հիշված վերադարձի ուղղությանը, բայց չի բացահայտում՝ այդ տեղեկատվությունը որտեղ է պահվում:

The Clean Paper CC BY 4.0

Հիմնական **ուղղահայաց միջանցքի** փորձի մեջ **40 ճանճ** բազմիցս մտել են հոտային գոտի, հակադարձ շրջվել՝ դուրս գալու համար, և վերադարձել նույն եզրին: «Ուղղահայաց»-ը հոդվածի անվանումն է 0-աստիճան երկրաչափության համար. միջանցքի երկար առանցքը զուգահեռ էր քամուն հակառակ ուղղությանը: Դա չի նշանակում, որ սարքը կանգնած էր ուղղաձիգ:

Հեղինակներն այս պատկերը կոչում են **edge tracking**՝ սահմանի հետևում: **Bout-ը** երկու սահմանի հատումների միջև մեկ անընդհատ դրվագ է. ներսի bout-ը տևում է մուտքից մինչև ելք, իսկ դրսի bout-ը՝ ելքից մինչև ճանճի վերադարձը: 755 ներսի bout-երում այցը միջինը տևել է 4.9 վայրկյան: Վերադարձների ժամանակ սահմանից միջին հեռավորությունը եղել է 10.4 միլիմետր: 793 bout-երից 4%-ից պակասն է

ամբողջությամբ անցել մինչև միջանցքի հակառակ եզրը։

Այս վերջին երկու թվերը նկարագրում են bout-եր, ոչ հարյուրավոր անկախ ճանճեր։ Տարբերությունը կարևոր է, որովհետև մեկ կենդանի կարող է բազմաթիվ bout-եր տալ։

Վերադարձները պարզապես ֆիքսված՝ քամուն հակառակ ռեֆլեքս չէին

Մի քանի փորձեր ստուգել են ավելի պարզ պատմությունները։

Սկզբում հետազոտողները փոխել են այն, ինչ տեղի էր ունենում միջանցքի **երկայնքով**, երբ ճանճը քայլում էր քամուն հակառակ։ Հոտը վիրտուալ աղբյուրին մոտենալիս կարող էր ուժեղանալ, մնալ հաստատուն կամ թուլանալ։ Բոլոր երեք դեպքերում ճանճերը նման ուղիներ են ստեղծել։ Այսպիսով «շարունակի՛ր գնալ այնտեղ, որտեղ հոտն ուժեղանում է» պարզ կանոնը այս սարքավորման մեջ edge tracking-ը չի բացատրում։

Հետո նրանք միջանցքի **կողային** կտրուկ եզրը դարձրել են Gaussian պրոֆիլ, որտեղ կոնցենտրացիան փոխվում էր աստիճանաբար։ Ճանճերը հավաքվել են այն կողամասում, որտեղ կոնցենտրացիան ամենաարագ էր փոխվում, ոչ կենտրոնում, որտեղ հոտն ամենաուժեղն էր։ Հետևաբար կարևոր հուշումը կողային փոփոխությունն էր, որը արդյունավետ սահման էր նշում, ոչ միջանցքի երկայնքով աղբյուրի ուղղությամբ պարտադիր աճը։

Սա չի նշանակում, որ կոնցենտրացիայի գրադիենտները բնության մեջ երբեք կարևոր չեն։ Դա նշանակում է, որ փորձարկված պայմաններում այս վարքի համար աղբյուրի ուղղությամբ աճը պարտադիր չէր։

Հետազոտողները նաև փոխել են միջանցքի կողմնորոշումը։ Առանձին խմբեր հետևել են 0, 45 և 90 աստիճանի միջանցքներին, իսկ մեկ այլ խումբ հանդիպել է միջանցքի, որը ելքերից հետո կողք էր «ցատկում»։ Խմբերի չափերը համապատասխանաբար եղել են 40, 21, 20 և 24 ճանճ։ Դրսի ուղիները փոխվել են երկրաչափության հետ։ «Միշտ շրջվիր քամուն հակառակ» ընդհանուր կանոնը չի կարող բացատրել այդ ճկունությունը։

Այս սարքավորման մեջ հոտը երկու բեղիկներին հասել է մոտ երկու միլիվայրկյան տարբերությամբ։ Երկկողմ օպտոգենետիկ ակտիվացումը քամու հետ զուգակցելը կարող էր վերարտադրել edge-tracking-ի նման պատկեր։ **Օպտոգենետիկան** օգտագործում է լույսի նկատմամբ զգայուն սպիտակուցներ՝ ընտրված բջիջների ակտիվությունը փոխելու համար։ Այստեղ արդյունքը հուշում է, որ հոտի ձախաջ ժամանման տարբերությունը այս վարքի համար պարտադիր չէր։ Դա երկկողմ համեմատությունը չի դարձնում անկարևոր ազատ շարժվող կենդանիների համար այլ շիթերում։

Վեկտորը քարտեզից փոքր է

Վեկտորը ուղղություն է՝ չափի հետ միասին։ Այստեղ օգտակար պահվող մեծությունը հիմնականում ուղղությունն էր. ո՞ր կողմ պետք է շրջվի ճանճը՝ շիթի սահմանին հասնելու համար։ Ուսումնասիրությունը ապացույց չի գտել, որ ճանճը պահում էր ամբողջ շիթի դասավորության կամ դրա ներսում սեփական դիրքի լրիվ քարտեզ։

Հեղինակները սկզբում արհեստական ուղիներ են ստեղծել՝ իրական ճանճերի շարժման բաղադրիչները խառնելով։ Նրանք պատահականորեն վերցրել են դիտված ընթացքի երկարություններ և շրջման անկյուններ ու միացրել դրանք։ Այս սինթետիկ «քայլողների» մի մասը ի վերջո կրկին հարվածել է հոտային սահմանին, բայց ավելի հեռու է թափառել և ավելի քիչ ուղիղ ճանապարհներ օգտագործել, քան իրական ճանճերը։ Նույնիսկ ճանճերի սովորական՝ քամուն հակառակ շրջվելու միտումը ավելացնելը չի վերարտադրել կարճ, ուղղված վերադարձները։ Այսպիսով իրական վարքը ավելի շատ ուղղության տեղեկատվություն էր պարունակում, քան նույն շարժումների պատահական վերախառնումը։

Հետո հետազոտողները կառուցել են երկու ռեժիմով մոդել՝ **հեռանալ սահմանից** և **վերադառնալ սահմանին**։ Այս ռեժիմները պիտակներ չէին հոտի ներսում կամ դրսում յուրաքանչյուր պահի համար։ Դրանք այլընտրանքային ղեկավարման կանոններ էին, որոնք կարող էին շարժման ընթացքում փոխվել։

Սահմանի յուրաքանչյուր հատումը մոդելին հիշելու ուղղություն էր տալիս։ Ելքի պահին այն թարմացնում էր հեռանալու ժամանակ օգտագործվող ուղղությունը։ Մուտքի պահին՝ առանձին վերադարձի ուղղությունը՝ ըստ էության «երբ սահմանը գտա, այս կողմ էի շարժվում»։ Հետագա վերադարձի ժամանակ այդ հիշված ուղղությունը սիմուլյացված ճանճի շարժումը կողմնակալում էր դեպի եզրը։

Հետազոտողները մոդելը հարմարեցրել են 0, 45 և 90 աստիճանի միջանցքների ուղիներին։ Ամփոփիչ համեմատության մեջ 72 իրական ճանճ և 75 սիմուլյացիա տվել են նման ուղու վիճակագրություն։ Երբ մուտքի պահին սովորած վերադարձի ուղղությունը հեռացվել է, բոլոր միջանցքային կողմնորոշումներում հետևումը պակաս արդյունավետ է դարձել։ Սա աջակցում է մուտքի ուղղության հիշողության օգտակարությանը, բայց չի ապացուցում, որ ճանճի ուղեղը բառացիորեն աշխատեցնում է մոդելի հավասարումները։

> **Ի՞նչ է նշանակում «հիշողություն» այս հոդվածում**
>
> Հետազոտողները ճանճի ուղեղից ուղղակիորեն չեն կարդացել պահված սլաք։ «Ուղղության հիշողությունը» եզրակացություն է, որին աջակցում են վարքը, մոդելը և նյարդային չափումները։ Մոդելը ցույց է տալիս, որ մի քանի փոփոխվող ուղղություններ կարող են վերարտադրել կարևոր ուղու վիճակագրությունը։ Դա չի ապացուցում, որ ճանճը բառացիորեն իրականացնում է հավասարումները կամ որ նեյրոնների մեկ անվանված խումբը պահեստավորման վայրն է։

Հակառակ կողմնորոշմամբ 45-աստիճան հատվածի լրացուցիչ փորձը հետագա վարքը տեղափոխել է 10 ճանճերի մոտ՝ 29 մոդելային սիմուլյացիաների հետ միասին: Սա ուղղության բացատրությունը դարձնում է հետադարձ ձևակերպումից ավելի կոնկրետ՝ այնուամենայնիվ մնալով մոդելային մեկնաբանություն:

Ուղղության հղում և ընթացիկ նպատակ

Հետո ուսումնասիրությունը չափել և խանգարել է ճանճի **կենտրոնական համալիրում**՝ նավիգացիային մասնակցող ուղեղային շրջանում, ակտիվությունը:

> **Երկու ազդանշան՝ տարբեր գործերով**
>
> EPG և FC2-ը կենտրոնական համալիրի երկու նեյրոնային պոպուլյացիաների անուններ են: EPG ակտիվությունը գործում է կողմնացույցի ընթերցման պես՝ հետևում է, թե ճանճը տվյալ պահին քամու նկատմամբ որ ուղղությամբ է նայում: FC2 ակտիվությունը կապված է այն ուղղության հետ, որով ճանճը փորձում է շարժվել: Ստորին ղեկավարման շղթան կարող է համեմատել ընթացիկ heading-ը այդ նպատակի հետ: Ուսումնասիրությունը ստուգում է երկու պոպուլյացիաներն էլ, բայց չի ցույց տալիս, որ դրանցից մեկը միայնակ պահում է ամբողջ հիշողությունը:

EPG նեյրոնները կրում են heading ազդանշան. նրանց ակտիվության պատկերը հետևում է արտաքին հուշման նկատմամբ ճանճի ուղղությանը: Կալցիումային պատկերումով՝ նյարդային ակտիվության անուղղակի օպտիկական ընթերցմամբ, հետազոտողները գտել են, որ edge tracking-ի ժամանակ EPG ակտիվության փուլը հետևել է քամու նկատմամբ heading-ին: Այս վերլուծությունը օգտագործել է 9 ճանճի 16 փորձ:

EPG նեյրոնները ճնշելու համար հետազոտողները գենետիկորեն ստիպել են դրանց արտահայտել **GtACR1**՝ կանաչ լույսով ակտիվացվող անիոնային ալիք: Փորձի ընթացքում LED-ը շարունակ միացված է եղել՝ ակտիվացնելով այդ ալիքը և ճնշելով ընտրված նեյրոնները: Նույն լուսավորությունը գենետիկական վերահսկիչ ճանճերի վարքը չի վնասել:

Այս ձևով EPG նեյրոնները ճնշելիս 12 փորձարարական ճանճեր ավելի քիչ արդյունավետ ուղղված վերադարձներ են կատարել, քան 6 գենետիկական վերահսկիչ ճանճերը: Սահմանափակ եզրակացությունն այն է, որ EPG ակտիվությամբ տրվող heading հղումը անհրաժեշտ էր փորձարկված պայմաններում արդյունավետ edge tracking-ի համար: Սա ապացույց չէ, որ EPG նեյրոնները միայնակ պահում էին սահմանի ուղղությունը:

FC2 նեյրոնները այլ հարաբերություն են ցույց տվել: Նրանց պոպուլյացիոն ակտիվությունը կապված էր ընթացիկ նավիգացիոն նպատակի հետ և փորձի շրջումներից առաջ ուղղված էր դեպի շիթի սահմանը: Պատկերման համար օգտագործվել

է 6 ճանճ, իսկ լռեցման համեմատություններում՝ կախված վերլուծությունից 9-ից 14 ճանճանոց խմբեր: Լռեցումը վնասել է edge tracking-ը:

Վարքը, փոխված շիթի երկրաչափությունը, հարմարեցված մոդելը և երկու նյարդային միջամտությունները աջակցում են ուղղության հիշողության բացատրության տարբեր մասերին: Միասին դրանք աջակցում են այս վերահսկվող փորձի մեջ կոմպակտ նպատակային ուղղությանը, ոչ ամբողջական քարտեզի կամ ապացուցված բջջային պահեստավորման վայրի:

The Clean Paper CC BY 4.0

Սա համակցվող ապացույց է, ոչ պատճառական շղթայի լուսանկար: EPG ակտիվությունը տվել է անհրաժեշտ heading հղում: FC2 ակտիվությունը համապատասխանել է նպատակային ուղղությանը և անհրաժեշտ էր արդյունավետ վարքի համար: Փորձերը չեն գտել մեկ հիշողության «ենգրամ» և չեն ապացուցել, որ FC2 սինապսներն ուղղությունը ֆիզիկապես պահում են:

Մարդկային մասշտաբի մոտավոր նմանության համար պատկերացրեք՝ դուրս եք գալիս նեղ մառախուղի շերտից, մինչ կայուն քամին դեռ ասում է, թե հյուսիսը որտեղ է: Կողմնացույցը կարող է ասել՝ որ ուղղությամբ եք նայում, բայց մառախուղին վերադառնալու համար պետք է նաև հիշել նրա եզրի ուղղությունը: Ընթացիկ heading-ը ցանկալի ուղղության հետ համեմատելը ասում է՝ որ կողմ շրջվել: Սա այստեղ EPG և FC2 ազդանշանների համար առաջարկվող աշխատանքի բաժանումն է: Բացատրական նմանություն է, ոչ ապացույց, որ մարդիկ օգտագործում են նույն բջիջները կամ ալգորիթմը:

Հիշողությունը կախված էր գործողությունից, ոչ միայն հոտի ժամանակացույցից

Replay փորձի մեջ ճանճերը ստացել են նույն հոտային ժամանակային հաջորդականությունը, ինչ նախկինում, բայց ժամանակացույցն այլևս կապված չէր տվյալ պահին իրենց գործողության հետ: Սովորած ուղղության կողմնակալությունը replay bout-երի ընթացքում թուլացել է: Սա աջակցում է **օպերանտ**, գործողության հետ կապված թարմացմանը. կարևոր էր ոչ միայն հոտի հաջորդականության պասիվ զգացումը, այլ հոտի և ճանճի շարժման հարաբերությունը:

Այդ վերլուծությունների հայտարարները փոխվում են: Extended տվյալներ վահանակները կախված համեմատությունից ներառում են 8 կամ 9 ճանճ, հաջորդական bout-երի շարքը՝ 8 ճանճ, ուղիների վահանակները պահանջում են առնվազն 10 արդյունավետ մուտք, իսկ զույգ մոդելային վահանակները օգտագործում են 21 սիմուլացված ուղի, որոնք նույնպես բավարարում են այդ մուտքի շեմը: Սրանք մեկ ընդհանուր ութ ճանճանոց նմուշ չեն:

Ավելի անկանոն շիթն օգտակար էր, բայց դեռ վիրտուալ

Հետազոտողները նաև replay են արել նախկինում գրանցված, ավելի անկանոն շիթ: Այն տարածության և ժամանակի մեջ հինգ անգամ մասշտաբավորել են, որպեսզի ամրացված ճանճերը բավական հաճախ հանդիպեն դրան: **12 ճանճից 10-ը** հասել են աղբյուրից 50 վիրտուալ միլիմետրի սահմաններում:

Սա տասը ճանճ չէ, որոնք բաց օդում գտել են իրական աղբյուր: Սա բնականին նման շիթի վերահսկվող replay-ի ներսում արդյունավետություն է:

Յուրաքանչյուր դինամիկ շիթի տեսակի համար մոդելը ստեղծել է 2,000 ուղի: Մասշտաբավորված շիթի համեմատությունը այդ 2,000-ից վերլուծել է 1,850-ը՝ արդյունավետ մուտք պահանջելու և աղբյուրին չափազանց մոտ սկսած ուղիները բացառելուց հետո: Հիշողությունն ավելի շատ է օգնել աղբյուրի մոտ, որտեղ հաջորդական հանդիպումները պահպանում էին համահունչ ուղղական կառուցվածք, և ավելի քիչ՝ ավելի ներքև՝ տուրբուլենտ շրջանում:

Այս որակավորումը արդյունքի մասն է: Կոմպակտ ուղղությունը կարող է օգնել միայն այն ժամանակ, երբ աշխարհը բավական համահունչ է մնում, որպեսզի նախորդ հանդիպումը ինչոր օգտակար բան ասի հաջորդի մասին:

Ինչ չի ցույց տալիս ուսումնասիրությունը

- Այն **չի** ցույց տալիս, որ ճանճը կառուցում է ամբողջական տարածական քարտեզ։
- Այն **չի** ցույց տալիս ազատ թռիչք չփոփոխված բնական շիթում։
- Այն **չի** հաստատում, որ հոտով ուղղորդվող ամբողջ նավիգացիան օգտագործում է այս ռազմավարությունը։
- Այն **չի** ցույց տալիս, որ EPG կամ FC2 նեյրոնները հիշողության բացառիկ ֆիզիկական պահեստավորման վայրն են։
- Այն **չի** դարձնում հարմարեցված մոդելը ճանճի բառացի կենսաբանական ալգորիթմ։
- Այն **չի** ընդհանրացվում ուղղակիորեն մարդկանց նավիգացիայի վրա։

Ուսումնասիրությունն ամենաուժեղն է այնտեղ, որտեղ ամենակոնկրետն է։ Փակ օղակային կառավարումը հետազոտողներին ճշգրիտ հասանելիություն է տվել յուրաքանչյուր հոտային հանդիպման նկատմամբ։ Երկրաչափության փոփոխությունները, replay-ը, մոդելավորումը, կալցիումային պատկերումը և լռեցումը հետո ստուգել են մեկ բացատրության տարբեր մասերը։ Բայց վարքային, պատկերման և լռեցման կոհորտները առանձին էին, նմուշների չափերը նախապես չէին որոշվել, տվյալների հավաքումն ու վերլուծությունը պատահականացված կամ կույր չէին, և ամրացված ճանճերի 10%-ից պակասը բացառվել է հարմարվելու, արձագանքի կամ հետևման խնդիրների պատճառով։

Այս սահմանափակումները երևույթը չեն ջնջում։ Դրանք սահմանում են այն։

Կարճ ամփոփում

Վիրտուալ հոտային միջանցքով քայլող ամրացված պտղաճանճերը հոտը թողնելուց հետո բազմիցս վերադարձել են սահմանին։ Կոնցենտրացիայի և միջանցքի երկրաչափության փոփոխությունները, հարմարեցված անցումային մոդելը, նյարդային պատկերումը և օպտոգենետիկ լռեցումը աջակցում են այն բացատրությանը, ըստ որի ճանճը ամբողջական քարտեզի փոխարեն օգտագործում է հիշված կոմպակտ ուղղություն։ EPG նեյրոնները տվել են անհրաժեշտ heading հղում, իսկ FC2 ակտիվությունը համապատասխանել է ընթացիկ նպատակային ուղղությանը։ Արդյունքը սահմանափակված է վերահսկվող քայլելու փորձով. այն չի նույնականացնում հիշողության բջջային պահեստավորման վայրը և չի ցույց տալիս նույն հաշվարկը ազատ բնական թռիչքում։

Առանց չափազանցության

Ինչ է ցույց տալիս հոդվածը. Փակ օղակով ամրացված փորձի մեջ ճանճերը ուղղված վերադարձներ են կատարել դեպի վիրտուալ հոտային սահմաններ, որոնք այլևս չէին զգում: Բազմաթիվ վարքային վերահսկումները, մոդելավորումը և նյարդային միջամտությունները աջակցում են վեկտորային ռազմավարությանը:

Ինչն է ենթադրվում. Որ վարքը օգտագործում է կոմպակտ ուղղության հիշողություն, և որ FC2 պոպուլյացիոն ակտիվությունը ներկայացնում է ընթացիկ նավիգացիոն նպատակ: Հիշողության պարունակությունն ուղղակիորեն չի կարդացվել:

Ինչ չի ցույց տալիս. Ամբողջական մտավոր քարտեզ, համընդհանուր հոտային ռազմավարություն, ազատ թռիչքի արդյունավետություն բնական շիթում, հիշողության մեկ պահեստավորման վայր կամ մարդկային անալոգ:

Հիմնական սահմանափակումները. Մեկ տեսակ և վերահսկվող սարքավորում, տարբեր փորձերում տարբեր ճանճային կոհորտներ և վերլուծական միավորներ, անուղղակի կալցիումային ազդանշաններ, անհրաժեշտության փորձեր, որոնք բավարարություն չեն ապացուցում, և բնականին նման շիթ, որը replay է արվել ու մասշտաբավորվել:

Որքան վստահություն պետք է ունենա սովորական ընթերցողը. Բարձր վստահություն, որ ուղղված վերադարձի երևույթը իրական է այս սարքավորման մեջ և որ կենտրոնական համալիրի heading- և goal-կապված ակտիվությունը կարևոր է: Միջին վստահություն մոդելի նկատմամբ՝ որպես կոմպակտ բացատրություն: Ցածր վստահություն ցանկացած պնդման նկատմամբ, որը նույն ձևով այն տեղափոխում է բաց օդ կամ անվանում ամբողջական քարտեզ:

Աղբյուրներ

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