



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 գրացվում:

Արդյունքը տպավորիչ է, որովհետև ցույց է տալիս, թե որքան քիչ պահված տեղեկատվություն կարող է բավարար լինել: Բայց այն նաև հեշտ է չափազանցել: 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

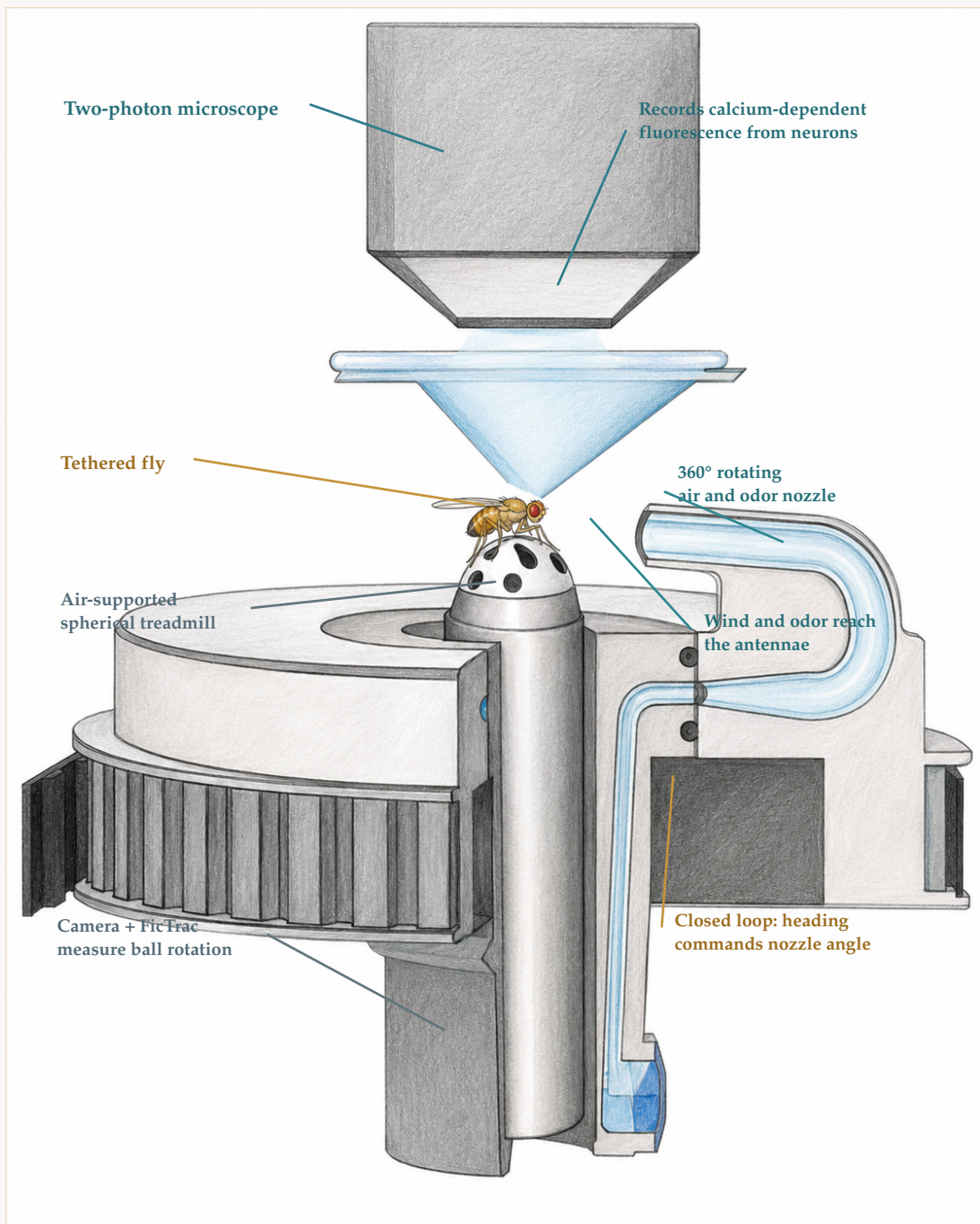
Հոտային շիթը օդով տեղափոխվող հոտի շարժվող շրջանն է: Բաց տարածքում շիթը քամու փոփոխության հետ ծովում է, մասնատվում և նորից միանում: Դրա պատճառով դժվար է ճշգրիտ իմանալ՝ կենդանին յուրաքանչյուր պահին ինչ է հոտոտել:

Հետազոտողները խնդիրը վերահսկելի են դարձրել **փակ օդակով 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

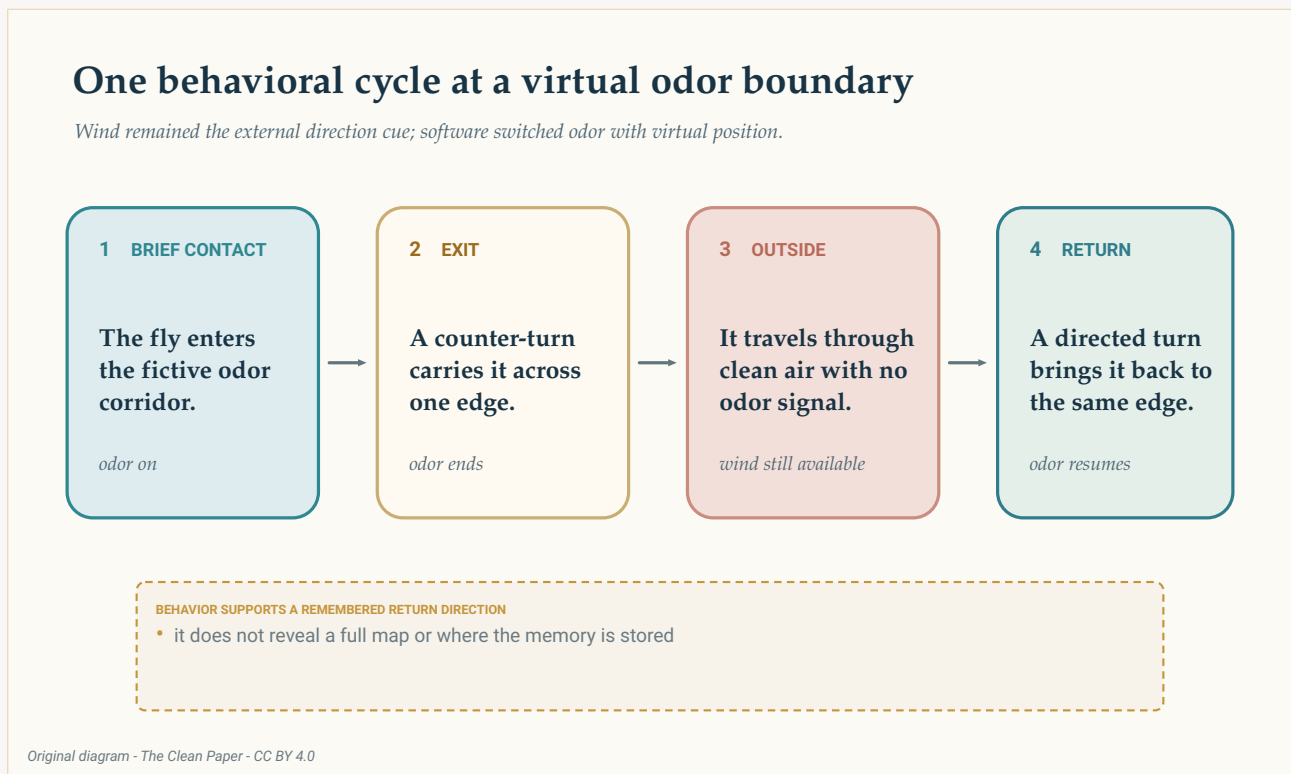
փոխում էին, թե ճանճի բեղիկներին որքան մաքուր օդ կամ խնձորի քացախի հոտ է հասնում՝ ըստ նրա վիրտուալ դիրքի: Ծրագրային սահմանը անցնելը այդպիսով միացնում կամ անջատում էր հոտը՝ ստեղծելով 50 միլիմետր լայնությամբ և մեկ մետր երկարությամբ երևակայական միջանցք, թեև ճանճը երբեք չէր լքում գունդը:

Մարքավորումը յուրաքանչյուր պահին համաժամեցված ձևով գրանցում էր ճանճի վիրտուալ դիրքը, ուղղությունը, հոտի վիճակը և օդային հոսքի կառավարումը: Այդ գրառումից հետագոտողները 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 օդնեղոտ 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 հողվածի 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 մոտքից մինչև երեք, իսկ դրսի bout-ը՝ երեքից 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 ուեֆլեքս 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 գուգակցելը 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 ուղղությունն 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 սիմուլացված 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» եզրակացությունն 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 քանի 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:

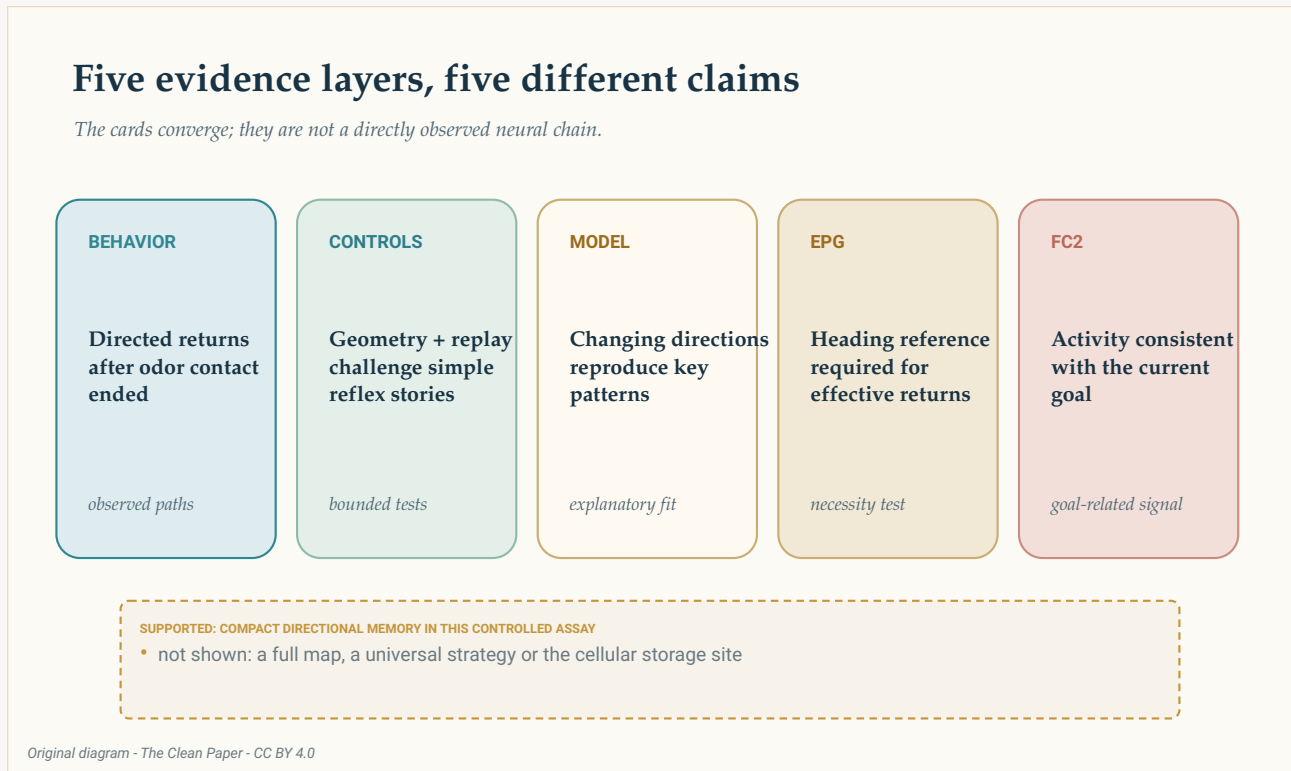
EPG նեյրոնները կրում են heading ազդանշան. նրանց ակտիվության պատկերը հետևում է արտաքին հուշման նկատմամբ ճանճի ուղղությանը: Կայցիումային պատկերումով՝ նյարդային ակտիվության անուղղակի օպտիկական ընթերցմամբ, հետազոտողները գտել են, որ edge tracking-ի ժամանակ EPG ակտիվության փուլը հետևել է քանի նկատմամբ heading-ին: 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 շիրթի սահմանը: Պատկերման համար օգտագործվել

Է 6 ճանճ, իսկ լոեցման համեմատություններում՝ կախված վերլուծությունից 9-ից 14 ճանճանոց խմբեր: Լոեցումը 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 մատախուղի շերտից, մինչ կայուն քամին դեռ ասում է, թե հյուսիսը որտեղ է: Կողմնացույցը կարող է ասել՝ որ ուղղությամբ եք նայում, բայց մատախուղին 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 գույգ 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, կայքիումային պատկերումը և լոցումը հետո ստուգել են մեկ բացատրության տարբեր մասերը: Բայց վարքային, պատկերման և լոցման 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 լոցումը 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 կարգացվել:

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>