The Clean Paper

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

ბუზს შეუძლია სუნი დაკარგოს და მაინც მისკენ უკან შემობრუნდეს. ვირტუალურ ნაკადში დამახსოვრებული მიმართულება დაეხმარა

მიბმული ხილის ბუზები სუფთა ჰაერში გასვლის შემდეგაც განმეორებით ბრუნდებოდა სუნის საწყვართან. ქცევა, მოდელირება და ნერვული დარღვევები მიმართულების კომპაქტურ მეხსიერებას უჭერს მხარს და არა სრულ რუკას. შედეგი კონტროლირებადი ვირტუალური რეალობის ტესტიდან მოდის და ჯერ არ აჩვენებს იმავე სტრატეგიას თავისუფალ ბუნებრივ ფრენაში.

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

ბუზს შეუძლია სუნი დაკარგოს და მაინც მისკენ უკან შემობრუნდეს

ბუზმა სუნი უკან მოიტოვა.

ის სუფთა ჰაერში აგრძელებდა სიარულს, ზოგჯერ ათეულობით წამი და ასეულობით ვირტუალური მილიმეტრი. შემდეგ ის იმ საზღვრისკენ ბრუნდებოდა, რომელიც უკვე გადაკვეთა, და სუნს ისევ პოულობდა. იმ მომენტში თვით სუნს უკან დაბრუნების მიმართულების ჩვენება აღარ შეეძლო.

ეს არის ხილის ბუზის ნავიგაციის ახალი Nature-ის კვლევის ცენტრალური დაკვირვება. მკვლევრები ამტკიცებენ, რომ ბუზები მიმართულების კომპაქტურ მეხსიერებას იყენებდნენ: არა მთლიანი სუნის ნაკადის რუკას და არა გავლილი მანძილის მეხსიერებას, არამედ იმ საზღვრისკენ დამახსოვრებულ მიმართულებას, რომელიც უკვე აღარ იყო შესაგრძნობი.

შედეგი შთამბეჭდავია, რადგან აჩვენებს, რამდენად მცირე რაოდენობის შენახული ინფორმაცია შეიძლება საკმარისი იყოს. მაგრამ მისი გადაჭარბებაც ადვილია. ეს ბუზები ბუნებრივ ლანდშაფტში თავისუფლად არ დაფრინავდნენ. ისინი მკაცრად კონტროლირებად ვირტუალურ სამყაროში, ჰაერით მხარდაჭერილ ბურთზე მიბმული დადიოდნენ. კვლევა ამ აპარატში ვექტორზე დაფუძნებულ სტრატეგიას უჭერს მხარს; ის არ აჩვენებს, რომ ბუზები გონებრივ რუკებს ქმნიან, არ ხსნის ყველა გზას, რომლითაც ცხოველები სუნს მიჰყვებიან, და არ ადგენს იმ უჯრედებს, რომლებშიც მეხსიერება ფიზიკურად ინახება.

უხილავი დერეფანი პროგრამულმა უზრუნველყოფ შექმნა

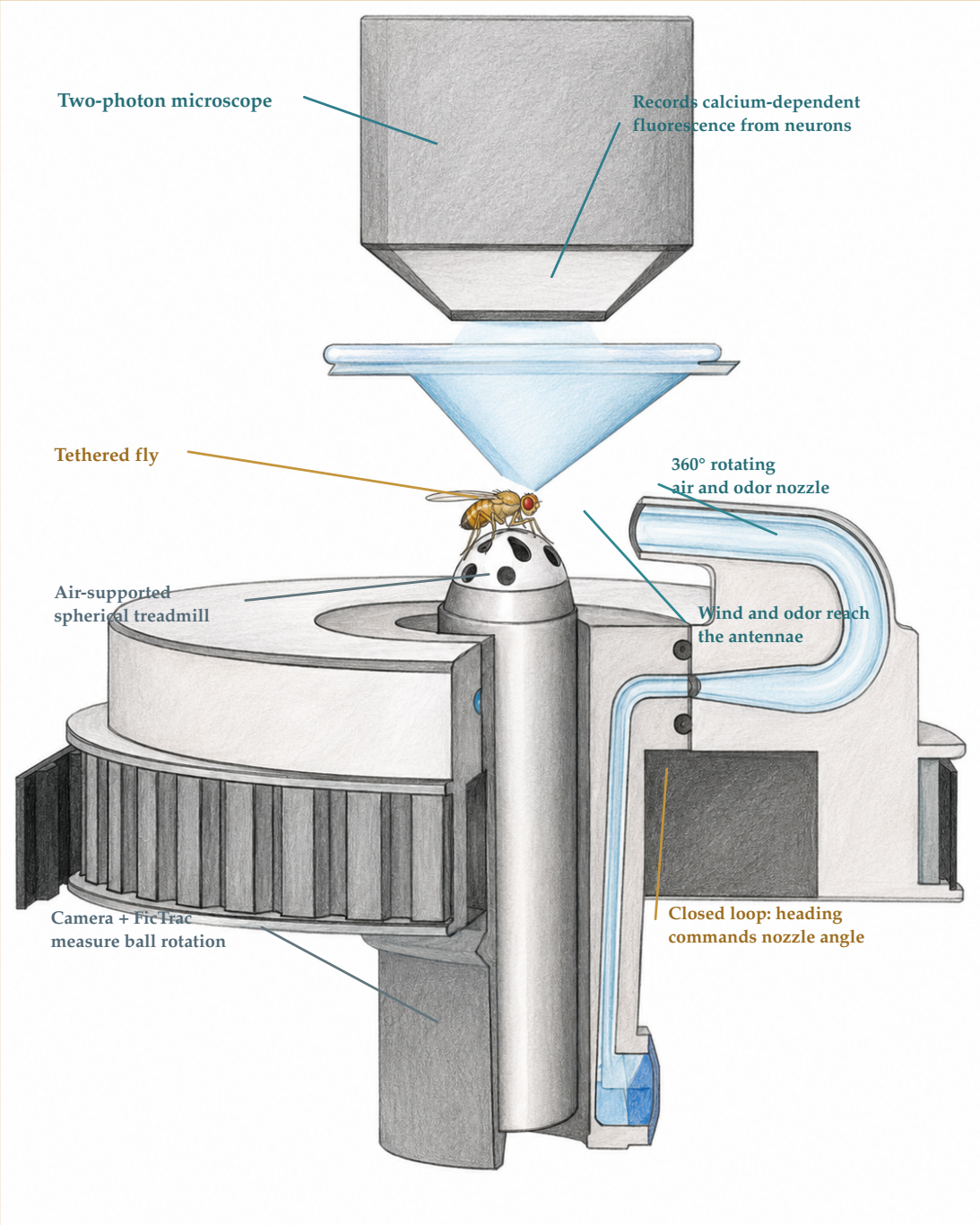
სუნის ნაკადი არის ჰაერით გადატანილი მოძრავი რეგიონი, სადაც სუნის მოლეკულებია. გარეთ ასეთი ნაკადი ქარის ცვლილებასთან ერთად იხრება, იშლება და ისევ ერთიანდება. ამის გამო რთულია ზუსტად ვიცოდეთ, კონკრეტულ მომენტში ცხოველმა რა შეიგრძნო.

მკვლევრებმა პრობლემა კონტროლირებადი გახადეს **დახურული მარყუჟის ვირტუალური რეალობით**. ბუზის სხეული ადგილზე იყო მიბმული ჰაერზე მცურავი მსუბუქი ბურთის ზემოთ. ბუზის სიარულისას კამერა ბურთის ბრუნვას წამში დაახლოებით 60-ჯერ ზომავდა. პროგრამული უზრუნველყოფა ამ ბრუნვას ვირტუალურ ორგანზომილებიან პოზიციად და მიმართულებად გარდაქმნიდა.

ეს მიმართულება აკონტროლებდა მოტორიზებულ საქშენს, რომელსაც 360 გრადუსით ბრუნვა შეეძლო. როცა ბუზი ვირტუალურ მიმართულებას იცვლიდა, საქშენი მის გარშემო მოძრაობდა ისე, რომ ქარი ბუზის ვირტუალურ სამყაროში მუდმივ მიმართულებას მიჰყოლოდა. ამავე დროს mass-flow controllers ბუზის ვირტუალური პოზიციის მიხედვით ცვლიდა, რამდენი სუფთა ჰაერი ან ვაშლის ძმრის სუნი აღწევდა ანტენებამდე.

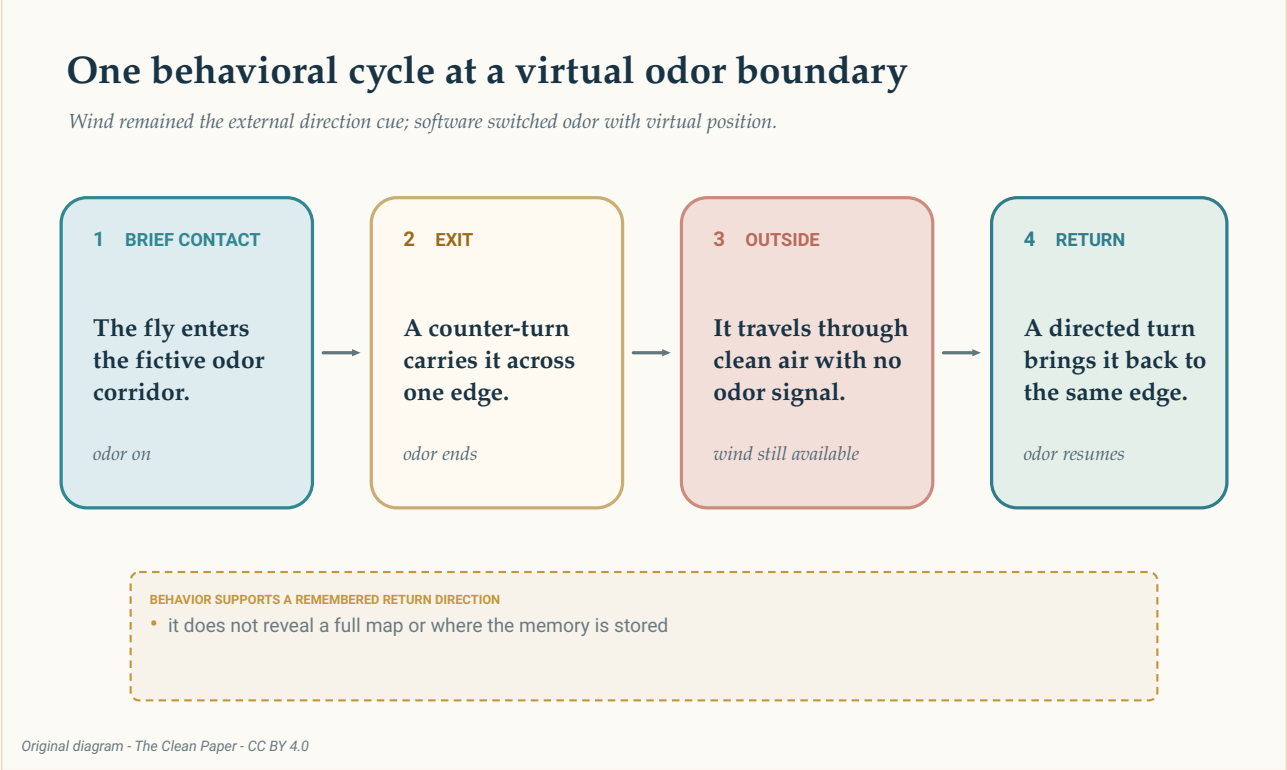
პროგრამულად განსაზღვრული საზღვრის გადაკვეთა შესაბამისად სუნს რთავდა ან თიშავდა და ქმნიდა 50 მილიმეტრი სიგანისა და ერთი მეტრი სიგრძის მოჩვენებით დერეფანს, მიუხედავად იმისა, რომ ბუზი ბურთს საერთოდ არ ტოვებდა.

აპარატურა თითოეულ დროით წერტილზე სინქრონულად იწერდა ბუზის ვირტუალურ პოზიციას, მიმართულებას, სუნის მდგომარეობასა და ჰაერის ნაკადის კონტროლს. ამ ჩანაწერებიდან მკვლევრებმა ტრაექტორიები აღადგინეს, თითოეული შესვლა და გასვლა მონიშნეს და გაზომეს, რამდენად პირდაპირ ბრუნდებოდა ბუზი. ქარი გარე მიმართულების მინიშნებას აძლევდა; თვით ბუზის მოძრაობა განსაზღვრავდა, როდის შეხვდებოდა ვირტუალური სუნის საზღვრის რომელიმე მხარეს.



ბუზი ჰაერით მხარდაჭერილი ბურთის ზემოთ მიბმული რჩებოდა. კამერა და FicTrac ბურთის ბრუნვას ვირტუალურ მოძრაობად და მიმართულებად გარდაქმნიდა; შემდეგ პროგრამა ჰაერ-სუნის საქშენს ატრიალებდა და ვირტუალური პოზიციის მიხედვით სუნს რთავდა ან თიშავდა. ცალკე ნერვული ვიზუალიზაციის ცდებში ბუზის ზემოთ არსებული ორფოტონიანი მიკროსკოპი EPG ან FC2 ნეირონებიდან კალციუმზე დამოკიდებულ ფლუორესცენციას იწერდა, რაც ნერვული აქტივობის ქცევასთან გასწორების საშუალებას იძლეოდა. მიკროსკოპი ყველა ქცევით ცდაში საჭირო არ იყო.

The Clean Paper CC BY 4.0



კონტროლირებად ტესტში ბუზი მოკლედ შედიოდა ვირტუალურ სუნის დერეფანში, გამოდიოდა, სუნის გარეშე ჰაერში მიდიოდა და შემდეგ მიზანმიმართულად ბრუნდებოდა. ქცევა დამახსოვრებულ დაბრუნების მიმართულებას უჭერს მხარს; ის არ გვიჩვენებს, სად ინახება ეს ინფორმაცია.

The Clean Paper CC BY 4.0

მთავარ **ვერტიკალური დერეფნის** ექსპერიმენტში **40 ბუზი** განმეორებით შედიოდა სუნში, კონტრ-მობრუნებით გამოდიოდა და იმავე კიდეს უბრუნდებოდა. „ვერტიკალური“ ნაშრომის სახელია 0-გრადუსიანი გეომეტრიისთვის: დერეფნის გრძელი ღერძი ქარის საწინააღმდეგო მიმართულების პარალელურად იყო. ეს არ ნიშნავს, რომ აპარატურა ვერტიკალურად იდგა.

ავტორები ამ ნიმუშს **კიდის მიყოლას** უწოდებენ. **Bout** არის საზღვრის გადაკვეთებს შორის ერთი უწყვეტი ეპიზოდი: შიდა bout იწყება შესვლით და სრულდება გამოსვლით, ხოლო გარე bout — გამოსვლიდან ბუზის დაბრუნებამდე. 755 შიდა bout-ის განმავლობაში ერთი ვიზიტი საშუალოდ 4.9 წამს გრძელდებოდა. დაბრუნებებისას საზღვრიდან საშუალო მანძილი 10.4 მილიმეტრი იყო. 793 bout-ის 4%-ზე ნაკლები დერეფნის

მოპირდაპირე კიდემდე მთლიანად გადავიდა.

ეს ბოლო ორი რიცხვი bout-ებს აღწერს და არა ასობით დამოუკიდებელ ბუზს. განსხვავება მნიშვნელოვანია, რადგან ერთ ცხოველს ბევრი bout-ის შეტანა შეუძლია.

დაბრუნებები უბრალოდ ფიქსირებული ქარის საწინააღმდეგო რეფლექსი არ იყო

რამდენიმე ექსპერიმენტმა უფრო მარტივი ახსნები შეამოწმა.

მკვლევრებმა ჯერ შეცვალეს, რა ხდებოდა დერეფნის **გასწვრივ**, როცა ბუზი ქარის საწინააღმდეგოდ მიდიოდა. სუნი ვირტუალური წყაროსკენ შეიძლება გაძლიერებულიყო, უცვლელი დარჩენილიყო ან შესუსტებულიყო. სამივე შემთხვევაში ბუზების გზები მსგავსი იყო. ამიტომ წესი, როგორიცაა „გააგრძელე იქით, სადაც სუნი ძლიერდება“, ამ აპარატში კიდის მიყოლას ვერ ხსნის.

შემდეგ დერეფნის **გვერდითი** კიდე Gaussian პროფილად შეარბილეს, სადაც კონცენტრაცია მკვეთრი ჩართვა-გამორთვის ნაცვლად თანდათან იცვლებოდა. ბუზები იმ ფლანგთან გროვდებოდა, სადაც კონცენტრაცია ყველაზე სწრაფად იცვლებოდა და არა ცენტრში, სადაც სუნი ყველაზე ძლიერი იყო. შესაბამისი მინიშნება იყო გვერდითი ცვლილება, რომელიც ეფექტურ საზღვარს ნიშნავდა, და არა აუცილებელი წყაროსკენ ზრდა დერეფნის გასწვრივ.

ეს არ ნიშნავს, რომ ბუნებაში კონცენტრაციის გრადიენტები არასოდეს არის მნიშვნელოვანი. ეს მხოლოდ იმას ნიშნავს, რომ გამოცდილი პირობებისას ამ ქცევისთვის წყაროსკენ კონცენტრაციის ზრდა საჭირო არ იყო.

მკვლევრებმა დერეფნის ორიენტაციაც შეცვალეს. ცალკეული ჯგუფები მიჰყვებოდა ვერტიკალურ, 45-გრადუსიან და 90-გრადუსიან დერეფნებს, ხოლო კიდევ ერთი ჯგუფი ხვდებოდა დერეფანს, რომელიც გამოსვლის შემდეგ გვერდზე „ხტებოდა“. ჯგუფების ზომები შესაბამისად 40, 21, 20 და 24 ბუზი იყო. მათი გარე ტრაექტორიები გეომეტრიასთან ერთად იცვლებოდა. ზოგადი წესი „ყოველთვის ქარის საწინააღმდეგოდ შეტრიალდი“ ასეთ მოქნილობას ვერ ხსნის.

ამ მოწყობილობაში სუნი ორ ანტენას შორის დაახლოებით ორი მილიწამის სხვაობით აღწევდა. ორმხრივი ოპტოგენეტიკური აქტივაციის ქართან შეწყვილებამ კიდის მიყოლის მსგავსი ნიმუშის გამეორება შეძლო. **ოპტოგენეტიკა** სინათლეზე მგრძნობიარე ცილებს იყენებს შერჩეული უჯრედების აქტივობის შესაცვლელად. აქ შედეგი მიუთითებს, რომ სუნის მარცხენა-მარჯვენა ჩამოსვლის განსხვავება ამ კონკრეტული ქცევისთვის აუცილებელი არ იყო. ეს ორმხრივ შედარებას სხვა ნაკადებში თავისუფლად მოძრავი ცხოველებისთვის უმნიშვნელოს არ ხდის.

ვექტორი რუკაზე პატარაა

ვექტორი არის მიმართულება და ზომა. აქ სასარგებლო შენახული სიდიდე ძირითადად მიმართულებითი იყო: საით უნდა შეტრიალდეს ბუზი, რომ სუნის ნაკადის საზღვარს დაუბრუნდეს? კვლევამ ვერ იპოვა მტკიცებულება, რომ ბუზი ნაკადის სრულ განლაგებას ან მის შიგნით საკუთარ პოზიციას ინახავდა.

ავტორებმა ჯერ ხელოვნური ტრაექტორიები შექმნეს რეალური ბუზის მოძრაობის ინგრედიენტების არევით. ისინი შემთხვევითად იღებდნენ დაკვირვებულ სირბილის სიგრძეებსა და მოხვევის კუთხეებს და ერთმანეთს აერთებდნენ. ამ სინთეზური „მოსიარულეების“ ნაწილი ბოლოს მაინც ხვდებოდა სუნის საზღვარს, მაგრამ რეალურ ბუზებზე უფრო შორს ხეტიალობდა და ნაკლებად პირდაპირი გზით ბრუნდებოდა. ბუზების ჩვეულებრივი ქარის საწინააღმდეგო მოხვევის ტენდენციის დამატებამაც კი მოკლე, მიზანმიმართული დაბრუნებები ვერ აღადგინა. შესაბამისად, რეალურ ქცევაში უფრო მეტი მიმართულებითი ინფორმაცია იყო, ვიდრე იგივე მოძრაობების შემთხვევით გადარევაში.

შემდეგ მკვლევრებმა ააგეს მოდელი ორი რეჟიმით: **საზღვრის დატოვება** და **საზღვართან დაბრუნება**. ეს რეჟიმები სუნის შიგნით ან გარეთ ყველა მომენტის პირდაპირი ეტიკეტები არ იყო. ისინი ალტერნატიული მართვის წესები იყო, რომლებსაც ბუზის მოძრაობასთან ერთად გადართვა შეეძლო.

ყოველი საზღვრის გადაკვეთა მოდელს დასამახსოვრებელ მიმართულებას აძლევდა. გამოსვლისას ის ანახლებდა მიმართულებას, რომელსაც დატოვებისას იყენებდა. შესვლისას კი ცალკე დაბრუნების მიმართულებას ანახლებდა: არსებითად — „როცა საზღვარი ვიპოვე, ამ მიმართულებით ვმოძრაობდი“. მოგვიანებით დაბრუნებისას ეს დამახსოვრებული მიმართულება სიმულირებული ბუზის მოძრაობას კიდისკენ აბრუნებდა.

მკვლევრებმა მოდელი 0-, 45- და 90-გრადუსიანი დერეფნების ტრაექტორიებს მოარგეს. შემაჯამებელ შედარებაში 72 რეალურმა ბუზმა და 75 სიმულაციამ მსგავსი გზის სტატისტიკა მისცა. როცა შესვლისას ნასწავლი დაბრუნების მიმართულება ამოიღეს, ყველა დერეფნის ორიენტაციაში მიყოლა ნაკლებად ეფექტური გახდა. ეს შესვლის მიმართულების მეხსიერების სასარგებლოობას უჭერს მხარს; მაგრამ არ ამტკიცებს, რომ ბუზის ტვინი მოდელის განტოლებებს სიტყვასიტყვით ასრულებს.

რას ნიშნავს „მეხსიერება“ ამ ნაშრომში?

მკვლევრებს ბუზის ტვინიდან შენახული ისარი პირდაპირ არ წაუკითხავთ. „მიმართულებითი მეხსიერება“ არის ქცევით, მოდელითა და ნერვული გაზომვებით მხარდაჭერილი დასკვნა. მოდელი ამბობს, რომ რამდენიმე ცვალებად მიმართულებას მნიშვნელოვანი ტრაექტორიული სტატისტიკის გამეორება შეუძლია. ის არ ამტკიცებს, რომ ბუზი განტოლებებს სიტყვასიტყვით ახორციელებს ან რომ რომელიმე დასახელებული ნეირონული ჯგუფი მეხსიერების შენახვის ადგილია.

საპირისპიროდ ორიენტირებული 45-გრადუსიანი სეგმენტის დამატებითმა გამოცდილებამ 10 ბუზში მოგვიანებით ქცევა გადასწია; პარალელურად 29 მოდელური სიმულაციაც ჩატარდა. ეს მიმართულებით ახსნას post-hoc აღწერაზე უფრო კონკრეტულს ხდის, მაგრამ ის კვლავ მოდელზე დაფუძნებულ ინტერპრეტაციად რჩება.

მიმართულების საცნობარო სისტემა და მიმდინარე მიზანი

შემდეგ კვლევამ გაზომა და დაარღვია აქტივობა ბუზის **ცენტრალურ კომპლექსში**, ტვინის რეგიონში, რომელიც ნავიგაციაში მონაწილეობს.

> **ორი სიგნალი განსხვავებული ამოცანებით**
>
> EPG და FC2 ცენტრალური კომპლექსის ორი ნეირონული პოპულაციის სახელებია. EPG აქტივობა კომპასის მაჩვენებელს ჰგავს: ის აკვირდება, ქართან მიმართებით რა მიმართულებითაა ბუზი ამჟამად შებრუნებული. FC2 აქტივობა დაკავშირებულია მიმართულებასთან, საითაც ბუზი ცდილობს გადაადგილებას. ქვედა დონის მართვის წრედს შეუძლია მიმდინარე სათაური მიზანთან შეადაროს. კვლევა ორივე პოპულაციას ამოწმებს, მაგრამ არ აჩვენებს, რომ რომელიმე მათგანი მარტო მთლიან მეხსიერებას ინახავს.

EPG ნეირონები heading-სიგნალს ატარებს: მათი აქტივობის ნიმუში გარე მინიშნებასთან მიმართებით ბუზის მიმართულებას მიჰყვება. კალციუმის ვიზუალიზაციით — ნერვული აქტივობის ირიბი ოპტიკური მაჩვენებლით — მკვლევრებმა ნახეს, რომ კიდის მიყოლისას EPG აქტივობის ფაზა ქართან მიმართებით heading-ს მისდევდა. ანალიზში გამოიყენეს 9 ბუზის 16 ცდა.

EPG ნეირონების დასათრგუნად მკვლევრებმა ისინი გენეტიკურად შეცვალეს ისე, რომ გამოეხატათ **GtACR1** — ანიონური არხი, რომელიც მწვანე სინათლით ირთვება. LED მთელი სატესტო ცდის განმავლობაში ჩართული იყო, არხს ააქტიურებდა და შერჩეულ ნეირონებს თრგუნავდა; იგივე განათებამ გენეტიკურ საკონტროლო ბუზებში ფუნქცია არ დააზიანა.

როდესაც EPG ნეირონები ამ გზით ითრგუნებოდა, 12 ექსპერიმენტული ბუზი 6 გენეტიკურ საკონტროლო ბუზზე ნაკლებად ეფექტურ მიზანმიმართულ დაბრუნებებს აკეთებდა. შეზღუდული დასკვნაა, რომ EPG აქტივობით მიწოდებული heading-საცნობარო სიგნალი გამოცდილი პირობებისას ეფექტური კიდის მიყოლისთვის საჭირო იყო. ეს არ ამტკიცებს, რომ EPG ნეირონები მარტო ინახავდა საზღვრის მიმართულებას.

FC2 ნეირონებმა სხვა კავშირი აჩვენა. მათი პოპულაციური აქტივობა მიმდინარე ნავიგაციურ მიზანთან იყო დაკავშირებული და ტესტში მოხვევამდე სუნის ნაკადის საზღვრისკენ მიუთითებდა. ვიზუალიზაციაში 6 ბუზი გამოიყენეს, ხოლო დადუმების

შედარებებში ანალიზის მიხედვით 9-დან 14 ბუზამდე ჯგუფები. დადუმებამ კიდის მიყოლა გააუარესა.

ქცევა, შეცვლილი ნაკადის გეომეტრია, მორგებული მოდელი და ორი ნერვული დარღვევა მიმართულებითი მეხსიერების ახსნის სხვადასხვა ნაწილს უჭერს მხარს. ერთად ისინი ამ კონტროლირებად ტესტში კომპაქტურ მიზნობრივ მიმართულებას უჭერს მხარს და არა სრულ რუკას ან დადასტურებულ უჯრედულ შენახვის ადგილს.

The Clean Paper CC BY 4.0

ეს არის ერთმანეთთან შემხვედრი მტკიცებულება და არა მიზეზობრიობის გადაღებული ჯაჭვი. EPG აქტივობა საჭირო heading-საცნობარო სიგნალს აწვდიდა. FC2 აქტივობა მიზნობრივ მიმართულებას შეესაბამებოდა და ეფექტური ქცევისთვის საჭირო იყო. ექსპერიმენტებს ერთი მეხსიერების „ენგრამა“ არ უპოვია და არ დაუმტკიცებია, რომ FC2 სინაფსებში მიმართულება ფიზიკურად ინახებოდა.

უხეში ადამიანური ანალოგიისთვის წარმოიდგინეთ, რომ ვიწრო ნისლის ზოლიდან გამოდიხართ, ხოლო მუდმივი ქარი კვლავ გეუბნებათ, სად არის ჩრდილოეთი. კომპასი გეტყვით, საით იყურებით, მაგრამ ნისლთან დასაბრუნებლად მისი კიდის დამახსოვრებული მიმართულებაც გჭირდებათ. მიმდინარე heading-ის სასურველ მიმართულებასთან შედარება გეუბნებათ, საით უნდა შეტრიალდეთ. აქ EPG და FC2 სიგნალებისთვის დაახლოებით ასეთი შრომის დანაწილებაა შემოთავაზებული. ეს განმარტებითი ანალოგიაა და არა მტკიცებულება, რომ ადამიანებიც იმავე უჯრედებს ან ალგორითმს იყენებს.

მეხსიერება მოქმედებაზე იყო დამოკიდებული და არა მხოლოდ სუნის დროზე

Replay ექსპერიმენტში ბუზებმა მიიღეს სუნის დროების იგივე თანმიმდევრობა, როგორც ადრე, მაგრამ დრო აღარ იყო დაკავშირებული იმასთან, რასაც ისინი იმ მომენტში აკეთებდნენ. ნასწავლი მიმართულებითი მიკერძოება replay bout-ების განმავლობაში დასუსტდა. ეს **ოპერანტულ**, მოქმედებასთან დაკავშირებულ განახლებას უჭერს მხარს: მნიშვნელოვანი იყო არა მხოლოდ სუნის თანმიმდევრობის პასიური მიღება, არამედ სუნისა და ბუზის მოძრაობის ურთიერთობა.

ამ ანალიზებში მნიშვნელები იცვლება. Extended Data-ის პანელები შედარების მიხედვით 8 ან 9 ბუზს მოიცავს; თანმიმდევრული bout-ის სერია 8 ბუზს იყენებს; ტრაექტორიულ პანელებს მინიმუმ 10 ეფექტური შესვლა სჭირდება; ხოლო შეწყვილებული მოდელის პანელები 21 სიმულირებულ ტრაექტორიას იყენებს, რომლებიც ასევე აკმაყოფილებს შესვლის ზღურბლს. ეს ყველაფერი რვა ბუზის ერთ გაერთიანებულ ნიმუშს არ წარმოადგენს.

უფრო არარეგულარული ნაკადი სასარგებლო ტესტი იყო, მაგრამ მაინც ვირტუალური

მკვლევრებმა ასევე ხელახლა გაუშვეს ადრე ჩაწერილი, უფრო არარეგულარული ნაკადი. მას სივრცესა და დროში ხუთჯერ გაადიდეს, რათა მიბმულ ბუზებს მასთან საკმარისად ხშირად შეხვედრა შეძლებოდათ. **12 ბუზიდან ათი** მის წყაროს 50 ვირტუალურ მილიმეტრამდე მიუახლოვდა.

ეს არ არის ათი ბუზი, რომელმაც ღია ჰაერში ნამდვილი წყარო იპოვა. ეს არის შესრულება ნატურალისტური ნაკადის კონტროლირებად replay-ში.

თითოეული დინამიკური ნაკადის ტიპისთვის მოდელმა 2,000 ტრაექტორია შექმნა. მასშტაბირებული ნაკადის შედარებამ ამ 2,000-დან 1,850 გააანალიზა მას შემდეგ, რაც მოითხოვა ეფექტური შესვლა და გამორიცხა წყაროსთან ძალიან ახლოს დაწყებული ტრაექტორიები. მეხსიერება წყაროსთან ახლოს უფრო ეხმარებოდა, სადაც თანმიმდევრული შეხვედრები თანმიმდევრულ მიმართულებით სტრუქტურას ინარჩუნებდა, და ნაკლებად — უფრო ტურბულენტურ ქვემო-ქარის რეგიონში.

ეს შეზღუდვა თვით შედეგის ნაწილია. კომპაქტური მიმართულება მხოლოდ მაშინ შეიძლება დაგვეხმაროს, როცა გარემო საკმარისად თანმიმდევრული რჩება, რომ წინა შეხვედრა შემდეგზე სასარგებლო ინფორმაციას გვაძლევდეს.

რას არ აჩვენებს კვლევა

- ის **არ** აჩვენებს ბუზს, რომელიც სრულ სივრცით რუკას აგებს.
- ის **არ** აჩვენებს თავისუფალ ფრენას უცვლელ ბუნებრივ სუნის ნაკადში.
- ის **არ** ადგენს, რომ სუნით მართული ნავიგაციის ყველა ფორმა ამ სტრატეგიას იყენებს.
- ის **არ** აჩვენებს, რომ EPG ან FC2 ნეირონები მეხსიერების ექსკლუზიური ფიზიკური შენახვის ადგილია.
- ის **არ** აქცევს მორგებულ მოდელს ბუზის სიტყვასიტყვით ბიოლოგიურ ალგორითმად.
- ის **არ** გადადის პირდაპირ ადამიანის ნავიგაციაზე.

კვლევა ყველაზე ძლიერია იქ, სადაც ყველაზე კონკრეტულია. დახურული მარყუჟის კონტროლმა მკვლევრებს თითოეულ სუნთან შეხვედრაზე ზუსტი წვდომა მისცა. შემდეგ გეომეტრიის ცვლილებამ, replay-მ, მოდელირებამ, კალციუმის ვიზუალიზაციამ და დადუმებამ ერთი ახსნის სხვადასხვა ნაწილი შეამოწმა. მაგრამ ქცევითი, ვიზუალიზაციისა და დადუმების კოჰორტები ცალკე იყო; ნიმუშის ზომები წინასწარ არ იყო განსაზღვრული; მონაცემების შეგროვება და ანალიზი არ იყო რანდომიზებული ან ბრმა; ხოლო მიბმული ბუზების 10%-ზე ნაკლები გამორიცხეს აკლიმატაციის, რეაქციის ან tracking-ის პრობლემების გამო.

ეს შეზღუდვები ფენომენს არ აუქმებს. ისინი მის საზღვრებს განსაზღვრავს.

სუფთა შეჯამება

ვირტუალურ სუნის დერეფანში მიბმული ხილის ბუზები სუნის უკან დატოვების შემდეგაც განმეორებით ბრუნდებოდა საზღვართან. კონცენტრაციისა და დერეფნის გეომეტრიის ცვლილებები, მორგებული switching-მოდელი, ნერვული ვიზუალიზაცია და ოპტოგენეტიკური დადუმება უჭერს მხარს ახსნას, რომლის მიხედვითაც ბუზი სრულ რუკაზე მეტად მიმართულების კომპაქტურ მეხსიერებას იყენებს. EPG ნეირონები საჭირო heading-საცნობარო სიგნალს აწვდიდა, ხოლო FC2 აქტივობა მიმდინარე მიზნობრივ მიმართულებას შეესაბამებოდა. შედეგი შეზღუდულია კონტროლირებად სიარულის ტესტზე; ის არ ადგენს მეხსიერების უჯრედულ შენახვის ადგილს და არ აჩვენებს იმავე გამოთვლას თავისუფალ ბუნებრივ ფრენაში.

შელამაზების გარეშე შემოწმება

რას აჩვენებს ნაშრომი: დახურული მარყუჟის მიბმულ ტესტში ბუზები მიზანმიმართულად ბრუნდებოდა ვირტუალურ სუნის საზღვრებთან, რომელთა შეგრძნებაც იმ მომენტში აღარ შეეძლო. მრავალი ქცევითი კონტროლი, მოდელირება და ნერვული დარღვევა ვექტორზე დაფუძნებულ სტრატეგიას უჭერს მხარს.

რა არის დასკვნილი: რომ ქცევა მიმართულების კომპაქტურ მეხსიერებას იყენებს და FC2 პოპულაციის აქტივობა მიმდინარე ნავიგაციურ მიზანს წარმოადგენს. მეხსიერების შინაარსი პირდაპირ არ წაუკითხავთ.

რას არ აჩვენებს: სრულ გონებრივ რუკას, უნივერსალურ ყნოსვით სტრატეგიას, ბუნებრივ ნაკადში თავისუფალი ფრენის შესრულებას, ერთ მეხსიერების შენახვის ადგილს ან ადამიანურ ანალოგს.

მთავარი შეზღუდვები: ერთი სახეობა და კონტროლირებადი აპარატურა; სხვადასხვა ბუზის კოჰორტები და ანალიზის ერთეულები სხვადასხვა ექსპერიმენტში; ირიბი კალციუმის სიგნალები; აუცილებლობის ტესტები, რომლებიც საკმარისობას არ ამტკიცებს; და ნატურალისტური ნაკადი, რომელიც replay იყო და მასშტაბირებული.

რამდენად უნდა ენდოს ამას ზოგადი მკითხველი? მაღალი ნდობა, რომ მიზანმიმართული დაბრუნების ფენომენი ამ აპარატში რეალურია და heading-თან და მიზანთან დაკავშირებული ცენტრალური კომპლექსის აქტივობა მნიშვნელოვანია. ზომიერი ნდობა მოდელში, როგორც კომპაქტურ ახსნაში. დაბალი ნდობა ნებისმიერ მტკიცებაში, რომელიც მას უცვლელად ღია ჰაერზე ავრცელებს ან სრულ რუკას უწოდებს.

წყაროები

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