The Clean Paper

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

গন্ধ হারিয়েও মাছি ফিরে ঘুরতে পারে। Virtual plume-এ মনে রাখা দিক তাকে সাহায্য করছে

Tethered fruit fly গন্ধের corridor থেকে পরিষ্কার বাতাস-এ বেরিয়ে যাওয়ার পরও বারবার একই গন্ধের সীমানা-তে ফিরে এসছে। আচরণ, modeling ও neural perturbation পূর্ণ spatial map-এর বদলে ছোট একটি দিক memory-র পক্ষে প্রমাণ দেয়। ফলটি নিয়ন্ত্রিত virtual-reality assay থেকে; প্রাকৃতিক মুক্ত উড়ান-এ একই কৌশল এখনো দেখানো হয়নি।

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

গন্ধ হারিয়েও একটি মাছি আবার তার দিকে ফিরতে পারে

মাছটি গন্ধের এলাকা ছেড়ে বেরিয়ে গিয়েছিল।

তারপরও সে পরিষ্কার বাতাসের মধ্যে হাঁটতে থাকে—কখনও কয়েক দশক সেকেন্ড, কখনও শত শত ভার্চুয়াল মিলিমিটার। এরপর সে আগের অতিক্রম করা সীমানার দিকে ঘুরে আবার গন্ধ খুঁজে পায়। সেই মুহূর্তে গন্ধ নিজে আর তাকে ফিরে যাওয়ার দিক দেখাতে পারত না।

ফলমাছির দিকনির্ণয় নিয়ে নতুন একটি প্রকৃতি গবেষণা-র মূল পর্যবেক্ষণ এটি। গবেষকদের যুক্তি, মাছিগুলো দিকের একটি ছোট স্মৃতি ব্যবহার করছেলি: পুরো গন্ধ প্লুমের মানচিত্র নয়, হাঁটা দূরত্বের স্মৃতিও নয়, বরং তখন আর অনুভব করা যাচ্ছিল না এমন একটি সীমানার দিকে মনে রাখা bearing।

ফলটি আকর্ষণীয়, কারণ খুব অল্প সংরক্ষিত তথ্যও যে যথেষ্ট হতে পারে তা দেখায়। তবে এটিকে বাড়িয়ে বলা সহজ। মাছিগুলো প্রাকৃতিক পরিবেশে মুক্তভাবে উড়ছিল না। তারা একটি হালকা, বাতাসে ভাসমান বলের ওপর বাঁধা অবস্থায় হাঁটছিল, কঠোরভাবে নিয়ন্ত্রিত ভার্চুয়াল জগতের মধ্যে। এই যন্ত্রপাতিতে ভেক্টর-ভিত্তিক কৌশলের পক্ষে গবেষণাটি প্রমাণ দেয়; কিন্তু মাছি মানসিক মানচিত্র বানায়, প্রাণীরা গন্ধ অনুসরণ করার সব পদ্ধতি এটি ব্যাখ্যা করে, বা স্মৃতি কোন কোষে শারীরিকভাবে জমা থাকে—এসব দেখায় না।

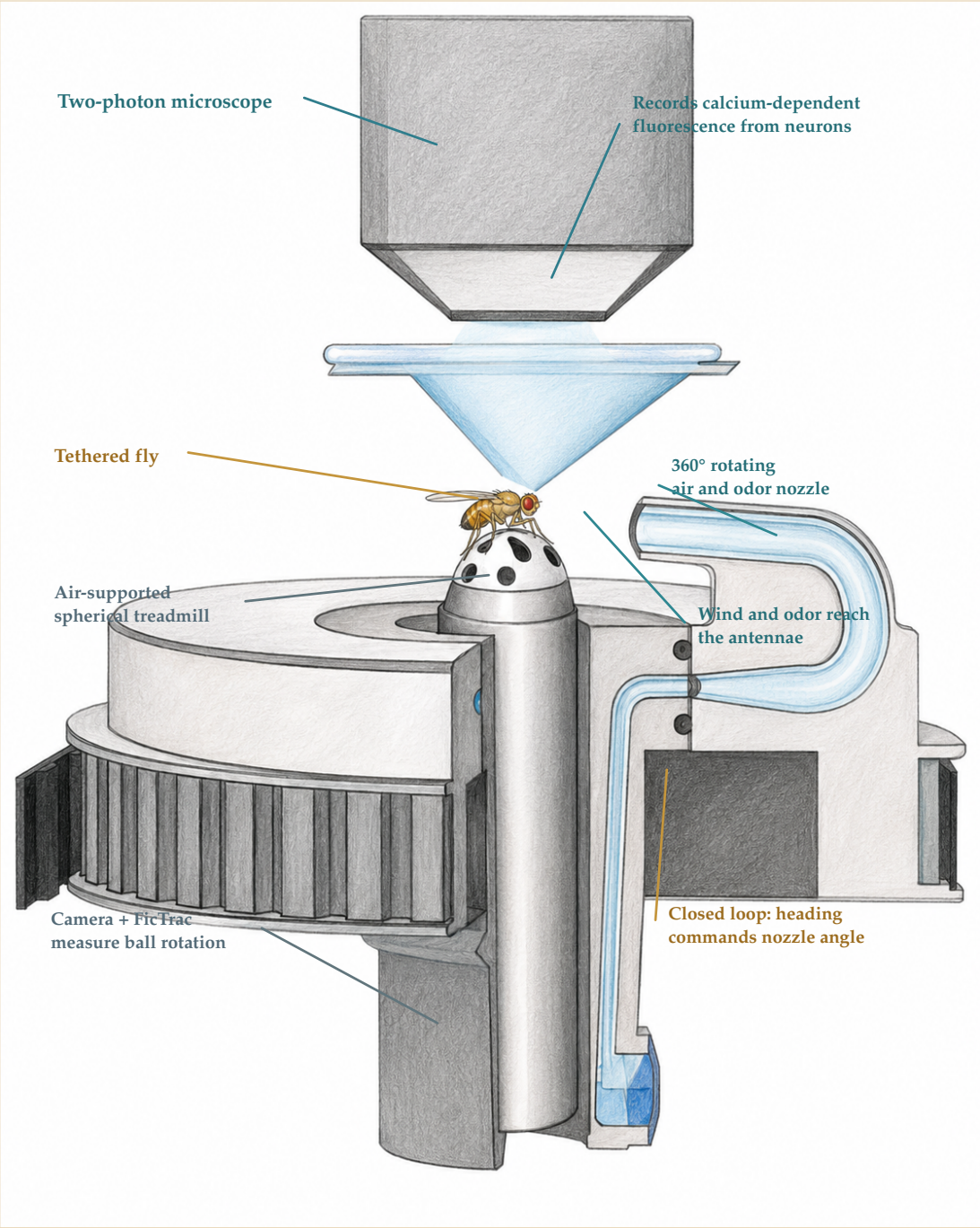
অদৃশ্য করিডরটি তৈরি করছেলি সফটওয়্যার

গন্ধ প্লুম হলো বাতাসে বহন হওয়া গন্ধের চলমান অঞ্চল। বাইরে বাতাস বদলালে প্লুম বাঁক নেয়, ভেঙে যায় এবং আবার যুক্ত হয়। তাই কোনো প্রাণী ঠিক কোন মুহূর্তে কী গন্ধ পেয়েছেলি তা জানা কঠিন।

গবেষকেরা **বন্ধ-লুপ ভার্চুয়াল reality** ব্যবহার করে সমস্যাটিকে নিয়ন্ত্রণযোগ্য করছেনে। মাছির শরীর একটি হালকা, বাতাসে ভাসমান বলের ওপর স্থিরভাবে বাঁধা ছিল। মাছি হাঁটলে ক্যামেরা প্রতি সেকেন্ডে প্রায় 60 বার বলের ঘূর্ণন মাপত। সফটওয়্যার সেই ঘূর্ণনকে ভার্চুয়াল দ্বিমাত্রিক অবস্থান ও মুখের দিক হিসেবে অনুবাদ করত।

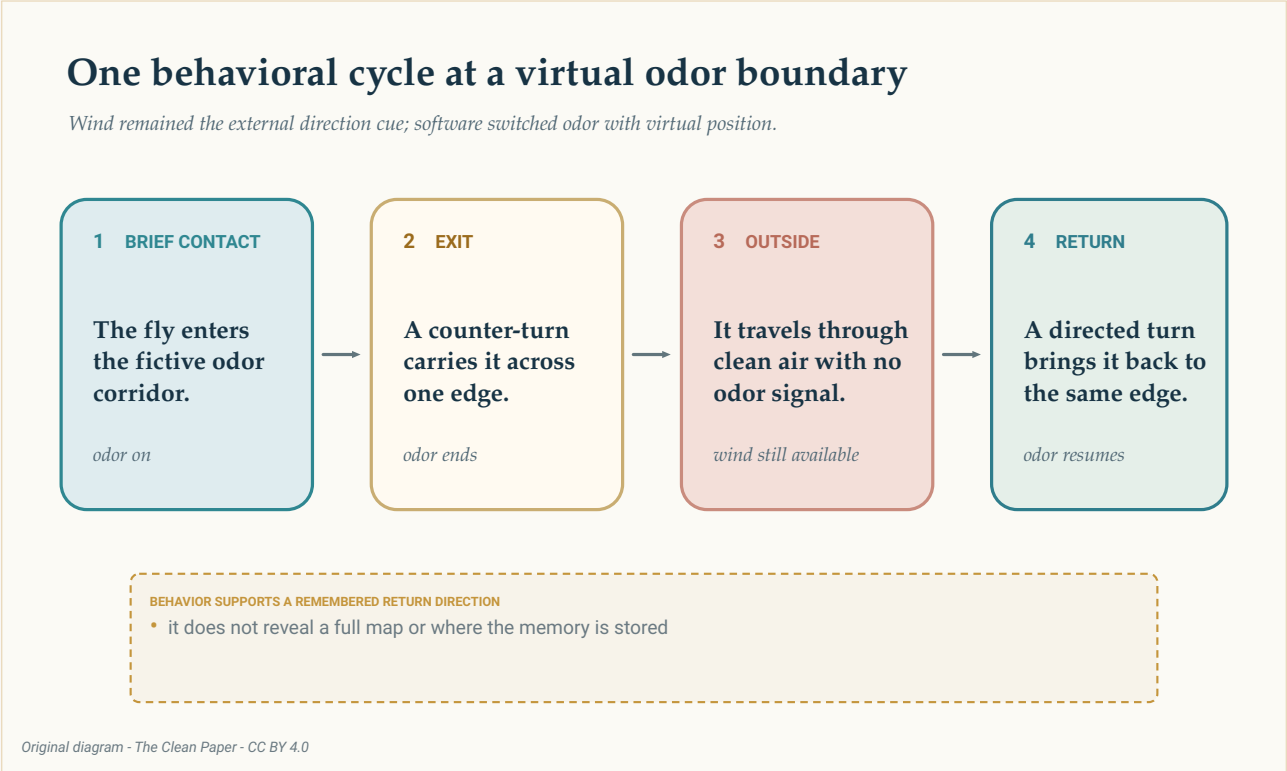
এই দিকের তথ্য 360 ডিগ্রি ঘুরতে সক্ষম motorized নোজল নিয়ন্ত্রণ করত। মাছির ভার্চুয়াল শরিনাম বদলালে নোজল তার চারদিকে ঘুরে বাতাসকে ভার্চুয়াল জগতের একটি স্থির দিকের সঙ্গে মিলিয়ে রাখত। একই সঙ্গে ভর-প্রবাহ নিয়ন্ত্রক মাছির ভার্চুয়াল অবস্থান অনুযায়ী অ্যান্টেনা-তে কতটা পরিষ্কার বাতাস বা apple-cider-vinegar গন্ধ পৌঁছাবে তা বদলাত। ফলে সফটওয়্যার-নির্ধারিত সীমানা পেরোলেই গন্ধ চালু বা বন্ধ হতো। এভাবে 50 মিলিমিটার প্রশস্ত ও একটি মিটার দীর্ঘ কাল্পনিক করিডর তৈরি হয়, যদিও মাছি কখনো বল ছাড়েনি।

যন্ত্রটি প্রতিটি মুহূর্তে মাছির ভার্চুয়াল অবস্থান, শরিনাম, গন্ধ চালু/বন্ধ থাকা এবং airflow নিয়ন্ত্রণ একসঙ্গে নথিবদ্ধ করত। সেই তথ্য থেকে গবেষকেরা গতিপথ পুনর্গঠন করেন, প্রতিটি প্রবেশ ও বেরিয়ে যাওয়ার মুহূর্ত চিহ্নিত করেন এবং মাছি কত সরাসরি ফিরেছে তা মাপেন। বাতাস বাইরের দিকনির্দেশক ইঙ্গিত দিয়েছেলি; আর মাছির নিজের চলাচল ঠিক করছেলি সে কখন ভার্চুয়াল গন্ধ সীমানার কোন পাশে পৌঁছাবে।



মাছটি বাতাসে ভাসমান বলরে ওপর বাঁধা ছলি। ক্যামরো ও FicTrac বলরে ঘূর্ণনকে ভারচুয়াল চলাচল ও শরিে নামে রূপ দয়ে; সফটওয়্যার এরপর বায়ুতবেং-গন্ধ নে াজল ঘুরয়িে ভার্চুয়াল অবস্থান অনুযায়ী গন্ধ চালু বা বন্ধ করে। আলাদা স্নায়বকি-ইমজেংি পরীক্ষায় মাছরি ওপর থাকা দুই-ফে াটন অণুবীক্ষণযন্ত্র EPG বা FC2 নউিরনরে ক্যালসয়িাম-নর্িভরশীল ফ্লুরে াসন্েস নথবিদ্ধ করে, ফলে স্নায়বকি কার্যকলাপকে আচরণরে সঙ্গে মলিয়িে দখো যায়। প্রতটিি আচরণগত পরীক্ষায় অণুবীক্ষণযন্ত্র ব্যবহার করা হয়নি।

The Clean Paper CC BY 4.0



নয়িন্ত্রতি পরীক্ষায় একটি মাছি অল্প সময় ভার্চুয়াল গন্ধ করডিরে ঢোকে, বরেয়িে যায়, গন্ধহীন বাতাসে কছিুটা দূর যায় এবং তারপর লক্ষ্যভদেীভাবে ফরিে আসে। আচরণটি মনে রাখা ফরোর দকিরে পক্ষে প্রমাণ দয়ে; তথ্যটি কোথায় সঞ্চতি থাকে তা দখোয় না।

The Clean Paper CC BY 4.0

মূল **vertical-করডির** পরীক্ষায় **40টি মাছি** বারবার গন্ধরে মধ্যে ঢুকছে, বপিরীত দকিে ঘুরে বরেয়িছে এবং একই প্রান্তে ফরিে এসছে। “Vertical” হলো গবষেণাপত্রে 0-ডগ্রি জ্যামতিরি নাম: করডিররে দীর্ঘ অক্ষ বাতাসরে উজানে দকিরে সমান্তরাল ছলি। এর মানে যন্ত্রটি খাড়াভাবে দাঁড়ানো ছলি না।

লখেকরো এই আচরণকে **প্রান্ত অনুসরণ** বলছেনে। একটি **bout** হলো সীমানা দুবার অতক্রিম করার মাঝরে একটানা পর্ব: ভতেররে bout শুরু হয় প্রবশেে এবং শষে হয় বরেয়িে আসায়; বাইররে bout শুরু হয় বরেয়িে যাওয়ার পরে এবং শষে হয় আবার ফরিে আসায়। মোট 755টি ভতেররে bout-এ একটি গন্ধ-সাক্ষাৎ গড়ে **4.9 second** স্থায়ী হয়। ফরিে আসার সময় সীমানা থকেে গড় দূরত্ব ছলি **10.4 millimetre**। 793টি bout-এর 4%-এরও কম corridor-এর একবোরে বপিরীত প্রান্তে পৌঁছছেলি।

শষেরে দুটি সংখ্যা bout-এর, শত শত স্বাধীন মাছরি নয়। কারণ একটি মাছি অনকেগুলো bout দতিে পারে।

ফরোগুলো শুধু স্থরি বাতাসরে উজানে reflex ছলি না

গবষেকরো আরও সরল ব্যাখ্যাগুলো পরীক্ষা করছেনে।

প্রথমে করডির ধরে মাছি বাতাসরে উজানে হাঁটলে কী ঘটে, তা বদলানো হয়। ভার্চুয়াল উৎসরে দকিে গলেে গন্ধরে ঘনত্ব বাড়তে পারে, স্থরি থাকতে পারে বা কমতওে পারে। তনি ক্ষত্রেইে মাছরি পথ কাছাকাছি ছলি। তাই “যদেকিে গন্ধ বাড়ে সদেকিে চল” ধরনরে সরল নয়িম এই যন্ত্রপাতিতে প্রান্ত অনুসরণ ব্যাখ্যা করতে পারে না।

এরপর করডিররে পাশরে ধারটকিে একটি গাউসীয় প্রোফাইলরে মতো ধীরে বদলানো হয়, যখোনে ঘনত্ব হঠাৎ চালু/বন্ধ না হয়ে ক্রমে বদলায়। মাছগিুলো গন্ধ সবচয়েে বশেি এমন কন্দ্রেররে কাছে নয়, বরং যখোনে ঘনত্ব সবচয়েে দ্রুত বদলাচ্ছে সইে পাশরে অংশে জমা হয়। অর্থাৎ এখানে

গুরুত্বপূর্ণ ইঙ্গিত ছিল কার্যকর সীমানা চিহ্নিত করা পাশের পরিবর্তন, করিডর ধরে উৎসের দিকে গন্ধ বাড়তেই হবে এমন নয়।

এর মানে প্রকৃতিতে ঘনত্ব gradient কখনোই গুরুত্বপূর্ণ নয়—তা নয়। শুধু পরীক্ষিত অবস্থায় এই আচরণের জন্য উৎসের দিকে গন্ধ বাড়া দরকার ছিল না।

গবেষকেরা করিডরের অভিমুখ-ও বদলান। আলাদা দল vertical, 45-ডিগ্রি ও 90-ডিগ্রি করিডর অনুসরণ করে; আরেকটি দল এমন করিডর পায় যা মাছি বেরিয়ে গেলে পাশে সরে যায়। দলগুলোর আকার ছিল যথাক্রমে 40, 21, 20 ও 24টি মাছি। জ্যামিতি বদলালে বাইরে হাঁটার পথও বদলেছে। তাই “সবসময় বাতাসের উজানে ঘুরে যাও” ধরনের সাধারণ নিয়ম এই নমনীয়তা ব্যাখ্যা করে না।

এই বিন্যাসে দুই antenna-তে গন্ধ পৌঁছানোর সময়ের পার্থক্য ছিল প্রায় দুই millisecond। বাতাসের সঙ্গে দুই পাশে সমান optogenetic activation দিলেও প্রান্ত-অনুসরণ-সদৃশ আচরণ তৈরি করা গেছে। **Optogenetics**-এ আলো-সংবেদনশীল protein ব্যবহার করে নির্বাচিত cell-এর activity বদলানো হয়। ফলটি ইঙ্গিত করে যে এই নির্দিষ্ট আচরণের জন্য বাম ও ডান antenna-তে গন্ধ পৌঁছানোর ক্ষুদ্র সময়পার্থক্য অপরিহার্য ছিল না। তবে অন্য plume-এ মুক্তভাবে চলা প্রাণীর ক্ষেত্রে দুই পাশের তুলনা অপ্রাসঙ্গিক—এমন দাবি এটি করে না।

একটি ভেক্টর পূর্ণ মানচিত্রের চেয়ে ছোট

ভেক্টর-এ দিক ও আকার—দুটোই থাকে। এখানে সংরক্ষিত উপযোগী তথ্যটি মূলত দিকসংক্রান্ত: প্লুম সীমানা-তে পৌঁছাতে মাছিকে কোন দিকে ঘুরতে হবে? মাছি পুরো প্লুমের বিন্যাস বা তার ভেতরে নিজের সঠিক অবস্থান মনে রাখে—এমন প্রমাণ গবেষণাটি পায়নি।

প্রথমে লেখকেরা বাস্তব মাছির চলাফেরার উপাদান এলোমেলো করে কৃত্রিম পথ বানান। দেখা চালনা দৈর্ঘ্য ও turn কোণ এলোমেলোভাবে নিয়ে সেগুলো জোড়া হয়। কিছু কৃত্রিম walker শেষে পর্যন্ত গন্ধ সীমানা-তে ফিরে আসে, কিন্তু বাস্তব মাছির তুলনায় বেশি ঘোরে এবং কম সরাসরি পথে যায়। মাছির সাধারণ বাতাসের উজানে ঘোরার প্রবণতা যোগ করলেও ছোট, লক্ষ্যভেদী ফেরোগুলো পুনরুৎপাদিত হয়নি। অর্থাৎ একই চলাচলের এলোমেলো remix-এর চেয়ে বাস্তব আচরণে বেশি দিকনির্দেশ ছিল।

এরপর গবেষকেরা দুটি ধরন-সহ একটি মডেল তৈরি করেন: **সীমানা ছেড়ে যাওয়া** এবং **সীমানা-তে ফিরে আসা**। এগুলো গন্ধের ভেতর বা বাইরে প্রতিটি মুহূর্তের স্থায়ী লেবেল নয়; চলার সময় বদলাতে পারে এমন বিকল্প steering নিয়ম।

প্রতিটি সীমানা ছেদবিন্দু মডেলকে মনে রাখার জন্য একটি দিক দেয়। বের হওয়ার সময় “ছেড়ে যাওয়া” পর্যায়ে ব্যবহৃত একটি দিক update হয়। ঢোকার সময় আলাদা একটি return দিক update হয়—মোটামুটি, “সীমানা খুঁজে পাওয়ার সময় আমি এই দিকে চলছিলাম।” পরে ফিরতে গেলে সেই মনে রাখা দিক সিমুলেটেড মাছির চলাচলকে সীমানার দিকে পক্ষপাত করে।

গবেষকেরা 0-, 45- ও 90-ডিগ্রি করিডরের গতিপথ-তে মডেলটি মানানসই করেন। সারাংশ-তুলনায় 72টি বাস্তব মাছি ও 75টি সিমুলেশন কাছাকাছি পথ পরিসংখ্যান দিয়েছে। প্রবেশের সময় শেখা return দিক বাদ দিলে সব করিডর অভিমুখে অনুসরণ কম দক্ষ হয়। এতে প্রবেশ-দিক স্মৃতি উপকারী—এই ধারণা সমর্থিত হয়; মাছির মস্তিষ্ক আক্ষরিকভাবে মডেলের সমীকরণ চালায়, তা প্রমাণ হয় না।

> **এই গবেষণায় “স্মৃতি” বলতে কী বোঝানো হয়েছে?**
>
> গবেষকেরা মাছির মস্তিষ্ক থেকে সংরক্ষিত কোনো তীর সরাসরি পড়েননি। “দিকনির্দেশক স্মৃতি” হলো আচরণ, একটি মডেল এবং স্নায়বিক পরিমাপ থেকে করা অনুমিত সিদ্ধান্ত। মডেলটি দেখায়, অল্প কয়েকটি বদলাতে থাকা দিক গুরুত্বপূর্ণ পথ পরিসংখ্যান পুনরুৎপাদন করতে পারে। এতে প্রমাণ হয় না যে মাছি আক্ষরিকভাবে সমীকরণগুলো বাস্তবায়ন করে, বা কোনো একটি নামকরা নিউরন দল-ই স্মৃতির সংরক্ষণ স্থান।

বিপরীত অভিমুখের 45-ডিগ্রি অংশের অতিরিক্ত অভিজ্ঞতা 10টি মাছির পরের আচরণ বদলেছে; তুলনায় ছিল 29টি মডেল সিমুলেশন। এতে দিকভিত্তিক ব্যাখ্যাটি কেবল পরে বানানো বর্ণনার চেয়ে বেশি নির্দিষ্ট হয়, যদিও এটি এখনও মডেলনির্ভর ব্যাখ্যা।

মুখরে দকিরে রফোরন্সে এবং বর্তমান লক্ষ্য

এরপর গবষেণাটি মাছরি **কন্দ্রেীয় জটলি**-এর কার্যকলাপ মাপে ও ব্যাহত করে। এটি দকিনর্িণয়ে জড়তি একটি মস্তষ্কি অঞ্চল।

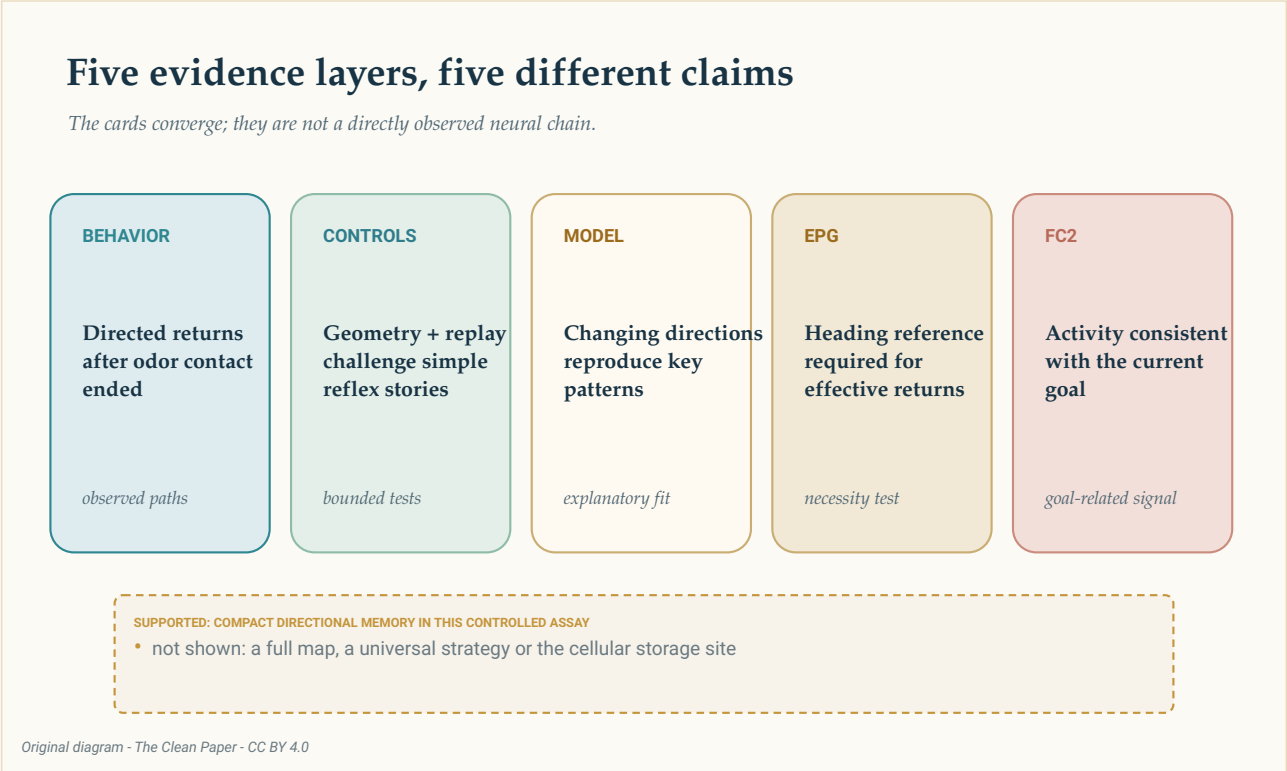
> **ভন্নি কাজরে দুটি সংকতে**
>
> EPG ও FC2 হলো কন্দ্রেীয় জটলিরে দুটি নউিরন জনসংখ্যার নাম। EPG কার্যকলাপ compass পাঠরে মতো: বাতাসরে তুলনায় মাছি বর্তমানে কোন দকিে মুখ করে আছে তা অনুসরণ করে। FC2 কার্যকলাপ মাছি কোন দকিে যতেে চাইছে—সইে লক্ষ্যদকিরে সঙ্গে সম্পর্কতি। নচিরে steering circuit বর্তমান শরিোনামরে সঙ্গে ওই লক্ষ্য তুলনা করতে পারে। গবষেণাটি দুই জনসংখ্যা-ই পরীক্ষা করছে; কোনো একটইি পুরো স্মৃতি একা সংরক্ষণ করে তা দখোয়নি।

EPG নউিরন একটি শরিোনাম সংকতে বহন করে: তাদরে কার্যকলাপ ধরন বাইররে ইঙ্গতিরে তুলনায় মাছি কোন দকিে মুখ করে আছে তা অনুসরণ করে। স্নায়বকি কার্যকলাপর পরোক্ষ আলোকীয় রডিআউট ক্যালসয়িাম ইমজেংি ব্যবহার করে গবষেকরো দখেছেনে, প্রান্ত অনুসরণরে সময় EPG কার্যকলাপ ধাপ বাতাসরে তুলনায় শরিোনাম অনুসরণ করে। এই বশি্লষেণে 9টি মাছরি 16টি পরীক্ষা ছলি।

EPG নউিরন দমন করতে গবষেকরো সগেুলোতে **GtACR1** expression করান—এটি সবুজ আলোয় চালু হওয়া অ্যানায়ন চ্যানলে। পরীক্ষা পরীক্ষা জুড়ে একটি LED জ্বলছেলি, চ্যানলে সক্রয়ি করে নর্িবাচতি নউিরন দমন করছে; একই আলো জনিগত-নয়িন্ত্রণ মাছরি আচরণ নষ্ট করনে।

এভাবে EPG নউিরন দমন করলে 12টি পরীক্ষামূলক মাছি 6টি জনিগত-নয়িন্ত্রণ মাছরি তুলনায় কম কার্যকর লক্ষ্যভদেী ফরোর পথ নয়িছে। সীমতি সদ্ধিান্তটি হলো, EPG কার্যকলাপ যে শরিোনাম রফোরন্সে বহন করে তা পরীক্ষতি অবস্থায় কার্যকর প্রান্ত অনুসরণরে জন্য দরকার ছলি। EPG নউিরন একাই সীমানা দকিে সংরক্ষণ করে—এটি তার প্রমাণ নয়।

FC2 নউিরন-এর সম্পর্ক আলাদা। জনসংখ্যা কার্যকলাপ বর্তমান দকিনর্িণয় লক্ষ্যরে সঙ্গে সম্পর্কতি ছলি এবং পরীক্ষায় turn নওেয়ার আগে প্লুম সীমানার দকিে নর্িদশে করত। ইমজেংি 6টি মাছি ছলি; নষ্কিরয়িকরণ তুলনায় বশি্লষেণ অনুযায়ী 9 থকেে 14টি মাছরি দল ব্যবহৃত হয়ছে। নষ্কিরয়িকরণ প্রান্ত অনুসরণ দুর্বল করছে।



আচরণ, প্লুম জ্যামতি বিদলানো, ফটি-করা মডলে এবং দুটি স্নায়বিক perturbation দকিস্মৃতি-ভত্তিকি ব্যাখ্যার আলাদা অংশকে সমর্থন করে। একসঙ্গে এগুলো এই নয়িন্ত্রতি পরীক্ষায় একটি সংক্ষপ্তি লক্ষ্য দকিরে পক্ষে প্রমাণ দয়ে; পূর্ণ মানচত্রি বা প্রমাণতি কোষীয় সংরক্ষণ স্থানরে নয়।

The Clean Paper CC BY 4.0

এটি বভিন্নি দকি থকেে মলো প্রমাণ, causation-এর ছবি তোলা সম্পূর্ণ শৃঙ্খল নয়। EPG কার্যকলাপ একটি প্রয়োজনীয় শরিোনাম রফোরন্সে দয়িছে। FC2 কার্যকলাপ লক্ষ্য দকিরে সঙ্গে সামঞ্জস্যপূর্ণ ছলি এবং কার্যকর আচরণরে জন্য দরকার ছলি। পরীক্ষাগুলো একক কোনো স্মৃতি “engram” খুঁজে পায়নি বা FC2 synapse-এই দকিটি শারীরকিভাবে সঞ্চতি থাকে তা প্রমাণ করনে।ি

মানুষরে মাপে একটি মোটামুটি তুলনা হসিবে ভাবুন: স্থরি বাতাসরে মধ্যে সরু কুয়াশার স্তর থকেে বরেয়িে এলনে। Compass আপনাকে বলে আপনি কোন দকিে মুখ করে আছনে; কন্তিু কুয়াশায় ফরিতে হলে তার প্রান্তরে দকিে মনে রাখা একটি bearing-ও দরকার। বর্তমান শরিোনামরে সঙ্গে কাঙ্ক্ষতি bearing তুলনা করলে কোন দকিে ঘুরতে হবে বোঝা যায়। এখানে EPG ও FC2 সংকতেরে জন্য প্রস্তাবতি কাজরে বভিাজনটি এমন। এটি বোঝানোর উপমা; মানুষ একই কোষ বা অ্যালগরদিম ব্যবহার করে তার প্রমাণ নয়।

স্মৃতটিি শুধু গন্ধরে সময়রে ওপর নয়, কাজরে সঙ্গে সম্পর্করে ওপর নর্িভর করছেলি

পুনরাবৃত্ত পিরীক্ষায় মাছগিুলো আগরে মতো একই সময়ক্রমে গন্ধ পয়েছেলি, কন্তিু সময়বন্যিাস তাদরে বর্তমান কাজরে সঙ্গে আর যুক্ত ছলি না। পুনরাবৃত্ত bout-এর সঙ্গে শখো দকিনর্িদশেক পক্ষপাত দুর্বল হয়ছে। এতে একটি **আচরণ-শক্ষিণমূলক**, ক্রয়িা-সম্পর্কতি update-এর পক্ষে প্রমাণ মলে: শুধু নষ্কিরি্য়িভাবে একই গন্ধ ক্রম পাওয়া নয়, গন্ধ ও মাছরি চলাচলরে সম্পর্কটাই গুরুত্বপূর্ণ ছলি।

এই বশি্লষেণগুলোর হর বদলে যায়। Extended তথ্য প্যানলেে তুলনা অনুযায়ী 8 বা 9টি মাছি আছ; ক্রমকি-bout ধারায় 8টি; গতপিথ প্যানলেে অন্তত 10টি কার্যকর প্রবশে দরকার; আর paired মডলে প্যানলেে একই প্রবশে সীমা পূরণ করা 21টি সমিুলটেডে গতপিথ আছ। এগুলো আটটি মাছরি একটি সম্মলিতি নমুনা নয়।

আরও অনিয়মিত প্লুম উপকারী পরীক্ষা ছিল, কিন্তু সেটিও ভার্চুয়াল

গবেষকেরা আগে নথিবদ্ধ আরও অনিয়মিত একটি প্লুম পুনরাবৃত্তি করেছেন। Tethered মাছিরা যাতে যথেষ্টবার সেটির মুখোমুখি হতে পারে, স্থান ও সময়ে প্লুম-টিকে পাঁচগুণ বড় করা হয়। **12টির মধ্যে 10টি মাছি** উৎসের 50 ভার্চুয়াল মিলিমিটারের মধ্যে পৌঁছায়।

এটি খোলা বাতাসে বাস্তব উৎস খুঁজে পাওয়া 10টি মাছি নিয়। এটি নিয়ন্ত্রিতভাবে পুনরাবৃত্তি করা naturalistic প্লুমের কর্মক্ষমতা।

প্রতিটি dynamic-প্লুম ধরনের জন্য মডেল 2,000টি গতিপথ তৈরি করে। বড় করলে-প্লুম তুলনায় ওই 2,000টির মধ্যে 1,850টি বিশ্লেষণে রাখা হয়, কার্যকর প্রবেশ থাকার শর্ত এবং উৎসের খুব কাছে শুরু করা গতিপথ বাদ দিয়ে। উৎসের কাছে স্মৃতি বেশি সাহায্য করেছে, যেখানে পরপর সাক্ষাৎের দিকনির্দেশক কাঠামো বেশি সুসংগত ছিল; আরও অশান্ত downwind অঞ্চলে সাহায্য কম ছিল।

এই qualification-টিও ফলের অংশ। সংক্ষিপ্ত দিকি তখনই সাহায্য করতে পারে, যখন পরিবেশ যথেষ্ট সুসংগত থাকে যাতে আগের সাক্ষাৎ পরেরটির জন্য উপযোগী তথ্য বহন করে।

গবেষণাটি কী দেখায় না

- মাছি একটি পূর্ণ স্থানিক মানচিত্র বানায়—এটি দেখায় **না**।
- পরিবর্তন না করা স্বাভাবিক প্লুমে মুক্ত উড্ডয়ন দেখায় **না**।
- সব গন্ধ-নির্দেশিত দিকনির্ণয় এই কৌশল ব্যবহার করে—এটি প্রতিষ্ঠা করে **না**।
- EPG বা FC2 নিউরন-ই স্মৃতির একমাত্র ভৌত সংরক্ষণ স্থান—এটি দেখায় **না**।
- ফিটি-করা মডেল-ই মাছির আক্ষরিক জৈবিক অ্যালগরিদম—এটি দেখায় **না**।
- ফলটি সরাসরি মানব দিকনির্ণয়ে সাধারণীকরণ করে **না**।

গবেষণাটি সবচেয়ে শক্ত যেখানে দাবি সবচেয়ে নির্দিষ্ট। Closed-loop control গবেষকদের প্রতিটি গন্ধ-সাক্ষাৎ নিখুঁতভাবে নিয়ন্ত্রণ করতে দিয়েছে। Geometry বদল, পুনরাবৃত্তি, modeling, calcium imaging ও inactivation একই ব্যাখ্যার বিভিন্ন অংশ পরীক্ষা করেছে। তবে behavioral, imaging ও inactivation cohort আলাদা ছিল; sample size আগে থেকে নির্ধারিত ছিল না; data collection ও analysis randomize বা blind করা হয়নি; এবং tethered fly-এর 10%-এর কম acclimation, response বা tracking সমস্যায় বাদ পড়েছে।

এই সীমাগুলো ঘটনা-টিকে বাতিল করে না। বরং কোথায় ফলটি প্রযোজ্য, তা নির্ধারণ করে।

সংক্ষিপ্ত সারাংশ

ভার্চুয়াল গন্ধ করিডরের মধ্যে বাঁধা ফলমাছি গন্ধ ছেড়ে পরিষ্কার বাতাসে যাওয়ার পরও বারবার সীমানা-তে ফিরে এসেছে। ঘনত্ব ও করিডর জ্যামিতি বিদলানো, ফিটি-করা বারবার বদলানো মডেল, স্নায়বিক ইমেজিং ও optogenetic নিষ্ক্রিয়করণ—সব মিলিয়ে এমন একটি ব্যাখ্যাকে সমর্থন করে যেখানে মাছি পূর্ণ মানচিত্র নয়, দিকের সংক্ষিপ্ত স্মৃতি ব্যবহার করে। EPG নিউরন প্রয়োজনীয় শিরোনাম রেফারেন্স দিয়েছে; FC2 কার্যকলাপ বর্তমান লক্ষ্য দিকের সঙ্গে সামঞ্জস্যপূর্ণ ছিল। ফলটি নিয়ন্ত্রিত walking অ্যাসের মধ্যে সীমাবদ্ধ; স্মৃতি কোন কোষে জমা থাকে বা মুক্ত স্বাভাবিক উড্ডয়নে একই গণনা হয়—তা দেখায় না।

সরাসরি যাচাই

গবেষণাপত্রটি কী দেখায়: বন্ধ-লুপ tethered অ্যাসেতে মাছি এমন ভার্চুয়াল গন্ধ সীমানা-তে লক্ষ্যভেদীভাবে ফিরেছে, যা তখন আর সরাসরি অনুভব করতে পারছিল না। একাধিক আচরণগত নিয়ন্ত্রণ, মডেলিং ও স্নায়বিক perturbation ভেক্টর-ভিত্তিক কৌশলকে সমর্থন করে।

কী অনুমিত সিদ্ধান্ত: আচরণটি সংক্ষিপ্ত দিকনির্দেশক স্মৃতি ব্যবহার করে এবং FC2 জনসংখ্যা কার্যকলাপ বর্তমান দিকনির্ণয় লক্ষ্য প্রতিনিধিত্ব করে। স্মৃতি বিষয়বস্তু সরাসরি পড়া হয়নি।

কী দেখায় না: পূর্ণ মানসিক মানচিত্র, সর্বজনীন olfactory কৌশল, স্বাভাবিক প্লুমে মুক্ত উড়ানের একই আচরণ, স্মৃতি সঞ্চয়ের একক স্থান বা মানুষের সমতুল্য কোনো প্রক্রিয়া।

প্রধান সীমাবদ্ধতা: একটি প্রজাতি ও নিয়ন্ত্রিত যন্ত্রপাতি; পরীক্ষাভেদে আলাদা fly কোহর্ট ও বিশ্লেষণ একক; পরোক্ষ ক্যালসিয়াম সংকেত; আবশ্যকতা পরীক্ষা পর্যাপ্ততা প্রমাণ করে না; এবং naturalistic প্লুম পুনরাবৃত্তি ও পরিসর করা হয়েছিল।

সাধারণ পাঠকের কতটা আস্থা রাখা উচিত? এই যন্ত্রপাতিতে লক্ষ্যভেদী ফেরোর ঘটনা বাস্তব এবং শিরোনাম ও লক্ষ্য-সম্পর্কিত কেন্দ্রীয়-জটিল কার্যকলাপ গুরুত্বপূর্ণ—এ বিষয়ে উচ্চ আস্থা। সংক্ষিপ্ত ব্যাখ্যা হিসেবে মডেলে মাঝারি আস্থা। খোলা বাতাসে অপরিবর্তিতভাবে একই ফল ঘটবে বা এটি পূর্ণ মানচিত্র—এমন দাবিতে কম আস্থা।

উৎস

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