



The CLEAN PAPER

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

זבוב יכול לאבד ריח ועדיין לפנות חזרה. בפלומה וירטואלית, כיוון זכור עזר

זבובי פירות מקובעים חזרו שוב ושוב לגבול ריח לאחר שהלכו אל אוויר נקי. התנהגות, מידול והפרעות עצביות תומכים בזיכרון קומפקטי של כיוון, לא במפה מלאה. התוצאה מגיעה ממבחן מציאות מדומה מבוקר ועדיין אינה מראה את אותה אסטרטגיה בתעופה טבעית חופשית.

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

זבוב יכול לאבד ריח ועדיין לפנות חזרה אליו

הזבוב כבר השאיר את הריח מאחור.

הוא המשיך ללכת באוויר נקי, לפעמים במשך עשרות שניות ומאות מילימטרים וירטואליים. ואז הוא פנה לעבר הגבול שחצה ומצא שוב את הריח. באותו רגע, הריח עצמו כבר לא היה יכול להראות את הדרך חזרה.

זו התצפית המרכזית במחקר חדש ב-Nature על ניווט בזבובי פירות. החוקרים טוענים שהזבובים השתמשו בזיכרון כיווני קומפקטי: לא במפה של כל פלומת הריח, ולא בזיכרון של המרחק שעברו, אלא בכיוון זכור אל גבול שכבר לא היה ניתן לחישה.

התוצאה מרשימה מפני שהיא מראה עד כמה מעט מידע שמור יכול להספיק. קל גם להפריז בה. הזבובים האלה לא עפו בחופשיות בנוף טבעי. הם הלכו כשהם מקובעים מעל כדור הנתמך באוויר, בתוך עולם וירטואלי מבוקר היטב. המחקר תומך באסטרטגיה מבוססת-וקטור במתקן הזה; הוא אינו מראה שזבובים בונים מפות מנטליות, אינו מסביר כל דרך שבה בעלי חיים עוקבים אחר ריחות ואינו מזהה את התאים שבהם הזיכרון נשמר פיזית.

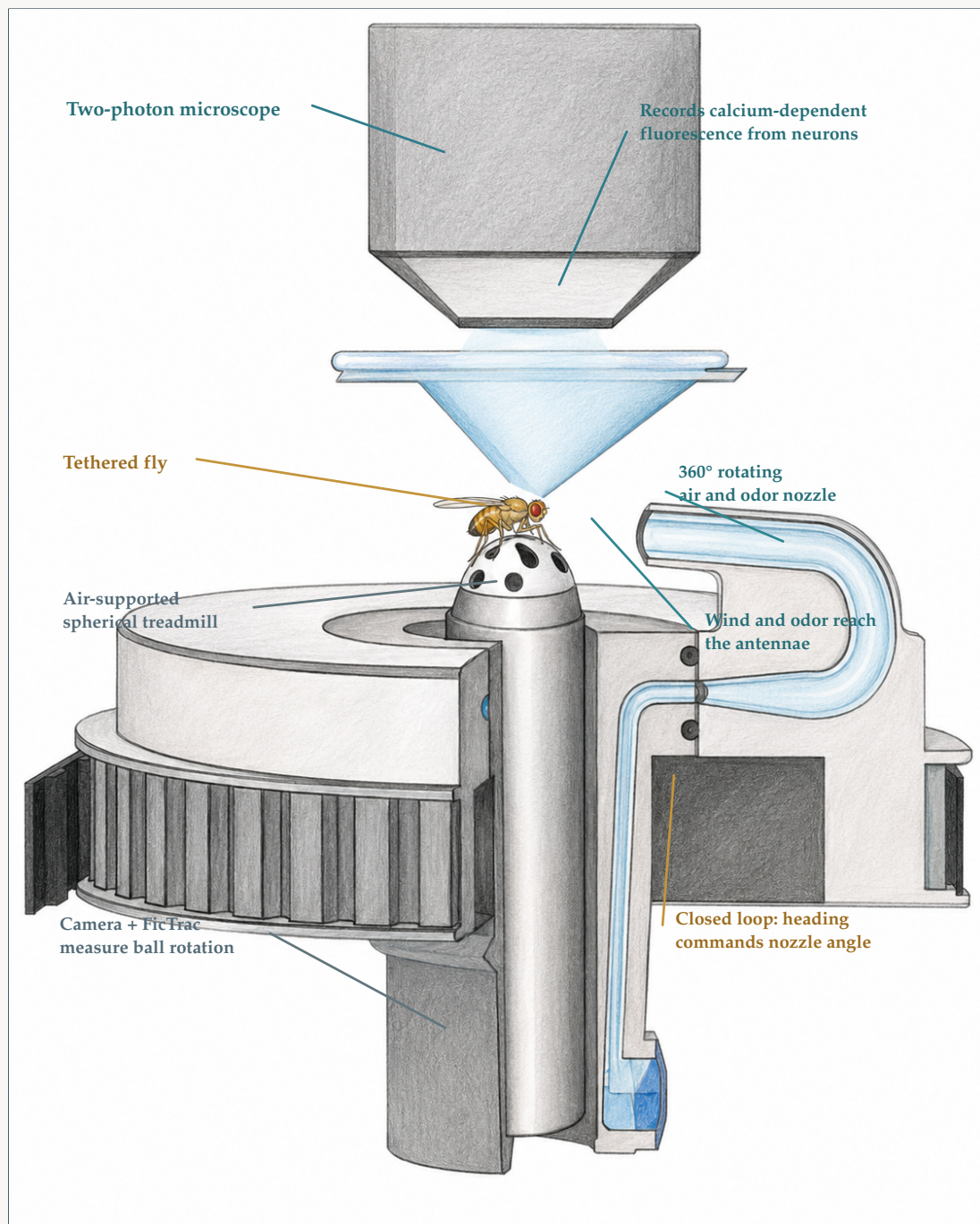
המסדרון הבלתי נראה נוצר בתוכנה

פלומת ריח היא האזור הנע של חומר ריח הנישא באוויר. בחוץ, פלומה מתעקמת, מתפרקת ומתחברת מחדש כאשר הרוח משתנה. לכן קשה לדעת בדיוק מה בעל חיים הריח בכל רגע.

החוקרים הפכו את הבעיה לניתנת לשליטה באמצעות מציאות מדומה בלולאה סגורה. גוף הזבוב קובע במקום מעל כדור קל הצף על אוויר. כאשר הזבוב הלך, מצלמה מדדה את סיבוב הכדור בערך 60 פעמים בשנייה. התוכנה תרגמה את הסיבוב למיקום וכיוון וירטואליים דו-ממדיים.

הכיוון הזה שלט בפיה ממונעת שיכלה להסתובב 360 מעלות. כשהזבוב שינה את כיוונו הווירטואלי, הפייה נעה סביבו כדי להשאיר את הרוח מיושרת לכיוון יציב בעולם הווירטואלי שלו. במקביל, בקרי זרימת מסה שינו את כמות האוויר הנקי או ריח חומץ התפוחים שהגיעה למחוששים בהתאם למיקומו הווירטואלי של הזבוב. חציית גבול שהוגדר בתוכנה הפעילה או כיבתה לכן את הריח, ויצרה מסדרון מדומה ברוחב 50 מילימטר ובאורך מטר אחד, אף שהזבוב מעולם לא עזב את הכדור.

המתקן הפיק רישום מסונכרן של המיקום הווירטואלי של הזבוב, כיוונו, מצב הריח ובקורות זרימת האוויר בכל נקודת זמן. מן הרישום הזה שחזרו החוקרים מסלולים, סימנו כל כניסה ויציאה ומדדו עד כמה ישירות הזבוב חזר. הרוח סיפקה את רמז הכיוון החיצוני; תנועת הזבוב עצמו קבעה מתי פגש כל אחד משני צדי גבול הריח הווירטואלי.

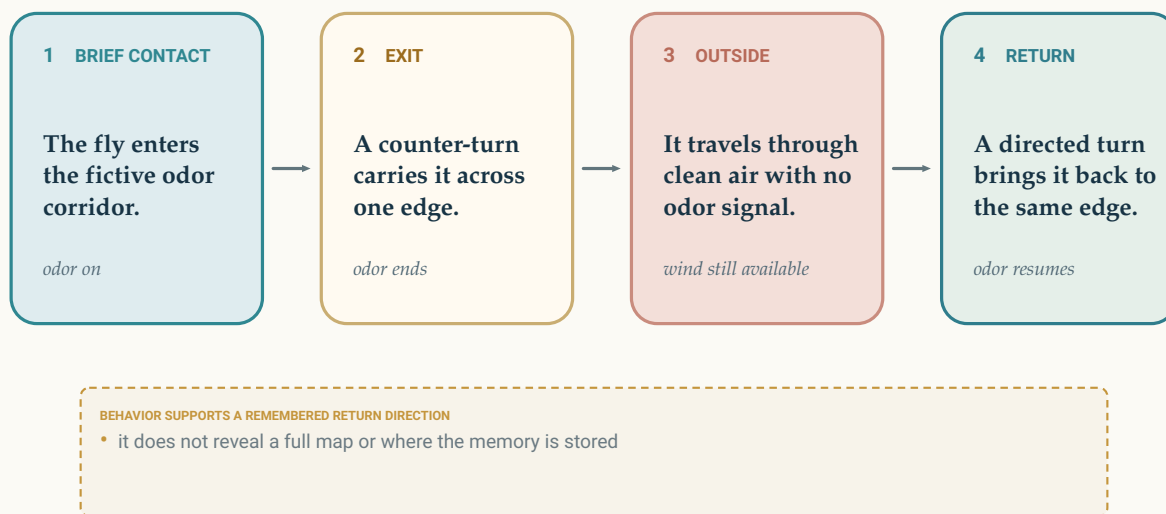


הזבוב נשאר מקובע מעל כדור הנתמך באוויר. מצלמה ו-FicTrac המירו את סיבוב הכדור לתנועה ולכיוון וירטואליים; התוכנה סובבה לאחר מכן את פיית האוויר והריח והפעילה את הריח בהתאם למיקום הווירטואלי. בניסויי דימות עצבי נפרדים, מיקרוסקופ דו-פוטוני מעל הזבוב תיעד פלואורסצנציה תלויה בסידן מנוירוני EPG או FC2, וכך אפשר ליישר פעילות עצבית עם ההתנהגות. המיקרוסקופ לא נדרש בכל ניסוי התנהגותי.

The Clean Paper CC BY 4.0

One behavioral cycle at a virtual odor boundary

Wind remained the external direction cue; software switched odor with virtual position.



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

במבחן המבוקר, זבוב נכנס לזמן קצר למסדרון הריח הווירטואלי, יצא ממנו, התקדם באוויר נטול ריח וביצע חזרה מכוונת. ההתנהגות תומכת בכיוון חזרה שנזכר; היא אינה מגלה היכן המידע הזה נשמר.

The Clean Paper CC BY 4.0

בניסוי המרכזי של המסדרון האנכי, 40 זבובים נכנסו שוב ושוב לריח, ביצעו פנייה נגדית החוצה ממנו וחזרו לאותו קצה. "אנכי" הוא השם שבו משתמש המאמר לגאומטריה של 0 מעלות: הציר הארוך של המסדרון עבר במקביל לכיוון נגד הרוח. אין פירושו שהמתקן עמד זקוף.

המחברים מכנים את הדפוס הזה מעקב אחר הקצה. Bout, או מקטע התנהגותי רציף, הוא פרק אחד בין חציות גבול: מקטע פנימי נמשך מכניסה עד יציאה, ומקטע חיצוני מן היציאה עד שהזבוב חוזר. על פני 755 מקטעים פנימיים, ביקור נמשך בממוצע 4.9 שניות. בזמן החזרות, המרחק הממוצע מן הגבול היה 10.4 מילימטרים. פחות מ-4% מתוך 793 מקטעים חצו את כל הדרך עד לקצה הנגדי של המסדרון.

שני המספרים האחרונים מתארים מקטעים, לא מאות זבובים עצמאיים. ההבחנה חשובה מפני שבעל חיים אחד יכול לתרום מקטעים רבים.

החזרות לא היו רק רפלקס קבוע נגד הרוח

כמה ניסויים בדקו הסברים פשוטים יותר.

החוקרים שינו תחילה את מה שקרה לאורך המסדרון כאשר זבוב הלך נגד הרוח. הריח יכול היה להתחזק לכיוון המקור הווירטואלי, להישאר קבוע או להיחלש. הזבובים יצרו מסלולים דומים בכל שלושת המקרים. לכן כלל פשוט כמו "להמשיך לכל מקום שבו הריח מתחזק" אינו יכול להסביר את מעקב הקצה במתקן הזה.

לאחר מכן הם ריכזו את הקצה הצדי של המסדרון לפרופיל גאומי, שבו הריכוז השתנה בהדרגה במקום להידלק

ולהיכבות בחדות. הזבובים התקבצו סמוך לאגף שבו הריכוז השתנה במהירות הגדולה ביותר, לא במרכז שבו הריח היה החזק ביותר. הרמז הרלוונטי היה אפוא השינוי הצדי שסימן גבול אפקטיבי, ולא עלייה נדרשת בכיוון המקור לאורך המסדרון.

אין פירוש הדבר שמפלי ריכוז אינם חשובים לעולם בטבע. פירושו שעלייה בכיוון המקור לא נדרשה להתנהגות הזאת בתנאים שנבדקו.

החוקרים שינו גם את כיוון המסדרון. קבוצות נפרדות עקבו אחר מסדרונות ב-0, 45 ו-90 מעלות, וקבוצה נוספת פגשה מסדרון שקפץ הצדה אחרי יציאות. גודל הקבוצות היה 20, 21, 40 ו-24 זבובים בהתאמה. המסלולים החיצוניים שלהם השתנו עם הגאומטריה. כלל כללי כמו "תמיד לפנות נגד הרוח" אינו יכול להסביר את הגמישות הזאת.

במתקן הזה, הריח הגיע לשני המחשבים בהפרש של כשתי אלפיות השנייה. שילוב של הפעלה אופטוגנטית דו-צדדית עם רוח הצליח לשחזר דפוס דמוי מעקב קצה. אופטוגנטיקה משתמשת בחלבונים רגישים לאור כדי לשנות את פעילותם של תאים נבחרים. כאן התוצאה מרמזת שהבדל בין צד שמאל לצד ימין בזמן הגעת הריח לא היה הכרחי להתנהגות הזאת. היא אינה הופכת השוואה דו-צדדית לחסרת חשיבות אצל בעלי חיים הנעים בחופשיות בפלומות אחרות.

וקטור קטן יותר ממפה

וקטור הוא כיוון יחד עם גודל. הכמות השמורה המועילה כאן הייתה בעיקר כיוונית: לאיזה כיוון צריך הזבוב לפנות כדי להגיע לגבול הפלומה? המחקר לא מצא ראיות לכך שהזבוב שמר פריסה מלאה של הפלומה או את מיקומו בתוכה.

המחברים יצרו תחילה מסלולים מלאכותיים באמצעות ערבוב המרכיבים של תנועת זבובים אמיתית. הם דגמו באקראי אורכי ריצה וזוויות פנייה שנצפו וחיברו אותם יחד. חלק מן ההולכים הסינתטיים הגיעו לבסוף שוב לגבול הריח, אך נדדו רחוק יותר ובמסלולים פחות ישירים מן הזבובים האמיתיים. אפילו הוספת הנטייה הרגילה של הזבובים לפנות נגד הרוח לא שחזרה את החזרות הקצרות והמכוונות. לכן ההתנהגות האמיתית כללה יותר מידע כיווני מערבוב אקראי של אותן תנועות.

לאחר מכן בנו החוקרים מודל עם שני מצבים: עזיבת הגבול וחזרה לגבול. המצבים האלה לא היו תוויות לכל רגע בתוך הריח או מחוצה לו. הם היו כללי היגוי חלופיים שיכלו להתחלף בזמן תנועת הזבוב.

כל חציית גבול נתנה למודל כיוון לזכור. ביציאה הוא עדכן כיוון ששימש בעת ההתרחקות. בכניסה הוא עדכן כיוון חזרה נפרד: למעשה, "כאשר מצאתי את הגבול, נעתי בכיוון הזה". במהלך חזרה מאוחרת יותר, הכיוון הזכור הטה את תנועת הזבוב המדומה בחזרה לעבר הקצה.

החוקרים התאימו את המודל למסלולים במסדרונות של 0, 45 ו-90 מעלות. בהשוואת הסיכום, 72 זבובים אמיתיים ו-75 סימולציות יצרו סטטיסטיקות מסלול דומות. כאשר הסירו את כיוון החזרה שנלמד בעת הכניסה, המעקב נעשה פחות יעיל בכל כיווני המסדרון. הדבר תומך בתועלת של זיכרון כיוון הכניסה; הוא אינו מוכיח שמוח הזבוב ממש מריץ את משוואות המודל.

מה פירוש "זיכרון" במאמר הזה?

במודל בהתנהגות, הנתמכת הסקה הוא כיווני "זיכרון זבוב. של ממוחו ישירות מאוחסן חץ קראו לא החוקרים אינו הוא חשובות. מסלול סטטיסטיקות לשחזר יכולים משתנים כיוונים שכמה אומר המודל עצביות. ובמידות האחסון. אתר היא ידוע ששמה אחת נזירונים שקבוצת או מילולי, באופן המשוואות את מיישם שהזבוב מוכיח

חווייה נוספת עם קטע של 45 מעלות בכיוון מנוגד שינתה את ההתנהגות המאוחרת של 10 זבובים, לצד 29 סימולציות של המודל. הדבר הופך את ההסבר הכיווני לספציפי יותר מתיאור בדיעבד, אך הוא נשאר פרשנות מבוססת-מודל.

ייחוס כיוון ומטרה נוכחית

בשלב הבא מדד המחקר ושיבש פעילות בקומפלקס המרכזי של מוח הזבוב, אזור המעורב בניווט.

שני אותות עם תפקידים שונים

קריאת כמו פועלת EPG פעילות המרכזי. בקומפלקס נזירונים אוכלוסיות שתי של שמות הם EPG FC2-1 הזבוב שאליו לכיוון קשורה FC2 פעילות לרוח. ביחס כרגע פונה הזבוב שאליו הכיוון אחר עוקבת היא מצפן: שתי את בודק המחקר הזאת. למטרה הנוכחי הכיוון את להשוות יכול הזרם במורד היגוי מעגל לנוע. מנסה כולו. הזיכרון את שומרת לבדה מהן שאחת מראה אינו אך האוכלוסיות,

נוירוני EPG נושאים אות כיוון: דפוס הפעילות שלהם עוקב אחר הכיוון שאליו פונה הזבוב ביחס לרמז חיצוני. באמצעות דימות סידן, קריאה אופטית עקיפה של פעילות עצבית, מצאו החוקרים שפאזה של פעילות EPG עקבה אחר הכיוון ביחס לרוח בזמן מעקב הקצה. הניתוח הזה השתמש ב-16 ניסויים מ-9 זבובים.

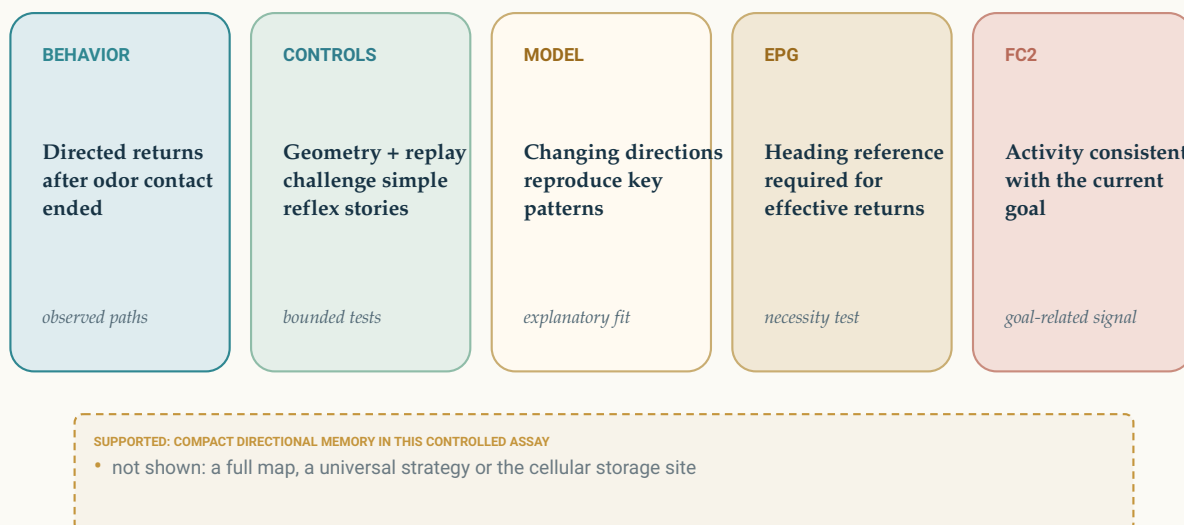
כדי לעכב נוירוני EPG, החוקרים הנדסו אותם לבטא GtACR1, תעלת אניונים המופעלת באור ירוק. נורית LED נשארה דולקת לאורך ניסוי הבדיקה, הפעילה את התעלה ודיכאה את הנוירוני הנבחרים; אותה הארה לא פגעה בזבובי ביקורת גנטיים.

כאשר נוירוני EPG עוכבו כך, 12 זבובים ניסיוניים ביצעו חזרות מכוונות פחות יעילות מ-6 זבובי ביקורת גנטיים. המסקנה המוגבלת היא שייחוס הכיוון שנישא בפעילות EPG היה נחוץ למעקב קצה יעיל בתנאים שנבדקו. אין זו ראיה שנוירוני EPG לבדם שמרו את כיוון הגבול.

נוירוני FC2 הציגו קשר אחר. פעילות האוכלוסייה שלהם הייתה קשורה למטרת הניווט הנוכחית והצביעה לעבר גבול הפלומה לפני פניות במבחן. הדימות השתמש ב-6 זבובים, והשוואות ההשתקה השתמשו בקבוצות של 9 עד 14 זבובים, בהתאם לניתוח. ההשתקה פגעה במעקב הקצה.

Five evidence layers, five different claims

The cards converge; they are not a directly observed neural chain.



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

התנהגות, שינוי גאומטריית הפלומה, מודל מותאם ושתי הפרעות עצביות תומכים בחלקים שונים של הסבר הזיכרון הכיווני. יחד הם תומכים בכיוון מטרה קומפקטי במבחן המבוקר הזה, לא במפה מלאה ולא באתר אחסון תאי מוכת.

The Clean Paper CC BY 4.0

אלה ראיות מתכנסות, לא שרשרת סיבתית שצולמה. פעילות EPG סיפקה ייחוס כיוון נדרש. פעילות FC2 התאימה לכיוון מטרה והייתה נחוצה להתנהגות יעילה. הניסויים לא איתרו "אנגרם" יחיד של זיכרון ולא הוכיחו שסינפסות FC2 שמרו פיזית את הכיוון.

כאנלוגיה גסה בקנה מידה אנושי, דמיינו שאתם יוצאים מתוך רצועת ערפל צרה בעוד רוח יציבה עדיין אומרת לכם איפה הצפון. מצפן יכול לומר לכם לאיזה כיוון אתם פונים, אבל כדי לחזור אל הערפל צריך גם לזכור את הכיוון אל שוליו. השוואת הכיוון הנוכחי לכיוון הרצוי אומרת לאיזה צד לפנות. זו חלוקת העבודה שהמחקר מציע עבור אותות EPG ו-FC2. זו אנלוגיה מסבירה, לא ראייה שבני אדם משתמשים באותם תאים או באותו אלגוריתם.

הזיכרון היה תלוי בפעולה, לא רק בתזמון הריח

בניסוי, replay הזבובים קיבלו אותה סדרה של זמני ריח כמו קודם, אבל התזמון נותק ממה שהם עשו באותו רגע. ההטיה הכיוונית שנלמדה נחלשה לאורך מקטעי replay. הדבר תומך בעדכון אופרנטי, הקשור לפעולה: מה שהיה חשוב לא היה חשיפה פסיבית בלבד לרצף ריחות, אלא הקשר בין הריח לתנועת הזבוב.

המכנה משתנה בין הניתוחים האלה. לוחות Data Extended כוללים 8 או 9 זבובים בהתאם להשוואה; סדרת המקטעים הרצופים משתמשת ב-8 זבובים; לוחות המסלולים דורשים לפחות 10 כניסות אפקטיביות; ולוחות המודל המקבילים משתמשים ב-21 מסלולים מדומים שגם הם עומדים בסף הכניסה הזה. אין מדובר במדגם מאוחד אחד של שמונה.

פלומה לא סדירה יותר הייתה שימושית, אך עדיין וירטואלית

החוקרים גם הקרינו מחדש פלומה לא סדירה יותר שהוקלטה קודם לכן. הם הגדילו אותה פי חמישה במרחב ובזמן כדי שזבובים מקובעים יוכלו לפגוש אותה בתדירות מספקת. עשרה מתוך 12 זבובים הגיעו למרחק של עד 50 מילימטרים וירטואליים מן המקור שלה.

אין מדובר בעשרה זבובים שמצאו מקור אמיתי באוויר הפתוח. זו ביצועיות בתוך replay מבוקר של פלומה בעלת מאפיינים טבעיים.

לכל סוג פלומה דינמית, המודל יצר 2,000 מסלולים. השוואת הפלומה המוגדלת ניתחה 1,850 מתוך 2,000 לאחר דרישה לכניסה אפקטיבית והוצאת מסלולים שהתחילו קרוב מדי למקור. הזיכרון עזר יותר ליד המקור, שם מפגשים עוקבים שמרו על מבנה כיווני קוהרנטי, ופחות באזור הסוער יותר בהמשך הרוח.

ההסתייגות היא חלק מן התוצאה. כיוון קומפקטי יכול לעזור רק כאשר העולם נשאר קוהרנטי מספיק כדי שמפגש קודם יאמר משהו שימושי על הבא.

מה המחקר אינו מראה

- הוא אינו מראה זבוב שבונה מפה מרחבית מלאה.
- הוא אינו מראה תעופה חופשית בתוך פלומה טבעית שלא שונתה.
- הוא אינו מבסס שכל ניווט מונחה-ריח משתמש באסטרטגיה הזאת.
- הוא אינו מראה שניירוני EPG או FC2 הם אתר האחסון הפיזי הבלעדי של הזיכרון.
- הוא אינו הופך את המודל המותאם לאלגוריתם הביולוגי המילולי של הזבוב.
- הוא אינו ניתן להכללה ישירה לניווט אנושי.

המחקר חזק ביותר דווקא במקום שבו הוא ספציפי ביותר. השליטה בלולאה סגורה נתנה לחוקרים גישה מדויקת לכל מפגש עם הריח. שינויי גאומטריה, replay מידול, דימות סידן והשתקה בדקו לאחר מכן חלקים שונים של הסבר אחד. אבל קבוצות ההתנהגות, הדימות וההשתקה היו נפרדות; גודל המדגם לא נקבע מראש; איסוף הנתונים והניתוח לא עברו רנדומיזציה או סמיות; ופחות מ-10% מן הזבובים המקובעים הוצאו בשל בעיות הסתגלות, תגובה או מעקב.

המגבלות האלה אינן מוחקות את התופעה. הן מגדירות אותה.

בקצרה

זבובי פירות מקובעים שהלכו במסדרון ריח וירטואלי חזרו שוב ושוב לגבול לאחר שהשאירו את הריח מאחור. שינויים בריכוז ובגאומטריית המסדרון, מודל מתחלף מותאם, דימות עצבי והשתקה אופטוגנטית תומכים בהסבר שלפיו הזבוב משתמש בכיוון זכור קומפקטי ולא במפה מלאה. ניוירוני EPG סיפקו ייחוס כיוון נדרש, ואילו פעילות FC2 התאימה לכיוון המטרה הנוכחי. התוצאה מוגבלת למבחן הליכה מבוקר; היא אינה מזהה את אתר האחסון התאי של הזיכרון ואינה מראה את אותו חישוב בתעופה טבעית חופשית.

בדיקה מפוכחת

מה המאמר מראה: במבחן מקובע בלולאה סגורה, זבובים ביצעו חזרות מכוונות לגבולות ריח וירטואליים שכבר לא יכלו לחוש. בקרות התנהגותיות מרובות, מידול והפרעות עצביות תומכים באסטרטגיה מבוססת-וקטור.

מה מוסק: שההתנהגות משתמשת בזיכרון כיווני קומפקטי, ושפעילות אוכלוסיית FC2 מייצגת מטרות ניווט נוכחית. תוכן הזיכרון לא נקרא ישירות.

מה הוא אינו מראה: מפה מנטלית מלאה, אסטרטגיית ריח אוניברסלית, ביצוע בתעופה חופשית בתוך פלומה טבעית, אתר אחסון יחיד של זיכרון או מקבילה אנושית.

המגבלות העיקריות: מין אחד ומתקן מבוקר; קבוצות זבובים ויחידות ניתוח שונות בין הניסויים; אותות סידן עקיפים; מבחני הכרח שאינם מוכיחים מספיקות; ופלומה בעלת מאפיינים טבעיים שהוקרנה מחדש והוגדלה.

כמה ביטחון צריך להיות לקורא כללי? ביטחון גבוה שתופעת החזרה המכוונת אמיתית במתקן הזה ושפעילות הקומפלוקס המרכזי הקשורה לכיוון ולמטרה חשובה. ביטחון בינוני במודל כהסבר קומפקטי. ביטחון נמוך בכל טענה שמרחיבה אותו ללא שינוי לאוויר הפתוח או מכנה אותו מפה מלאה.

מקורות

(2026) Nature Drosophila, in navigation olfactory for strategy vector-based A al., et Siliciano
<https://doi.org/10.1038/s41586-026-10827-7>

Drosophila in navigation olfactory for strategy vector-based A for archive data al., et Siliciano
<https://doi.org/10.5281/zenodo.20751812>

Edge-Tracking-Model Laboratory, Ruta
<https://github.com/rutalaboratory/Edge-Tracking-Model>