

איך מצליח התמנון לשלוט ביעילות על גופו הגמיש ומרובה הזרועות?

Nir Neshet*, Tal Shomrat

הפקולטה למדעי הים, המרכז האקדמי רופין, מכמורת, ישראל

הגמישות העצומה וריבוי הזרועות המאפיינים את גופו של התמנון, מאפשרים לו לבצע מגוון רחב של פעולות. התמנונים משתמשים בזרועותיהם כדי לבצע כמה דפוסי תנועה כמו הליכה, זחילה ושחייה. הם עושים שימוש בעצמים שונים דוגמת קליפות קוקוס וצדפות ריקות כדי לעצב מחסה, נוסף על יכולתם המופלאה לשנות את צבע עורם ומרקם גופם במטרה להסתוות ולהיטמע בסביבתם. בד בבד מבנה גופו הגמיש של התמנון מהווה בעיה עבור מערכת השליטה המוטורית (תנועתית) שלו, בשל הצורך לשלוט במספר כמעט אינסופי של מצבי גוף, ולנהל אותם. במאמר זה נסקור בקצרה כמה מאפיינים ומנגנוני שליטה מוטורית מתוך מגוון הפתרונות שפיתח התמנון כדי לאפשר שליטה בגופו הייחודי.

התמנון - יכולות ביצוע מרשימות ואפשרויות תנועה כמעט אינסופיות

התמנונים הם בעלי חיים טורפים החיים בבדידות במערות ובגומחות בינות לסלעים. לתמנון מְנַעַד התנהגותי עשיר, גמישות מחשבתית ויכולות קוגניטיביות ומוטוריות גבוהות. להלן כמה דוגמאות: לתמנונים כמה דפוסי תנועה כמו הליכה, זחילה וטיפוס. הם שוחים בעזרת זרועותיהם, וכדי להתרחק במהירות מאזור סכנה מזרימים סילון מים חזק, לעיתים מעורב בדגים,

סוקרים צעירים

EXCELLENCE
PROGRAM,
BRENNER
HIGH
SCHOOL
גיל: 14-13

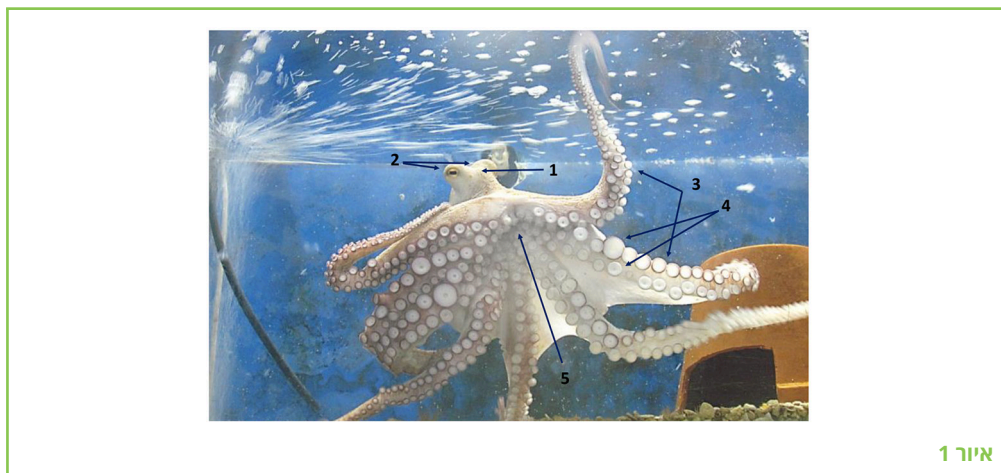


איור 1

התמנון המצוי

(Octopus vulgaris)

1. מיקום המוח. 2. עיניים.
3. זרועות. 4. כפתורי הצמדה.
5. מיקום הפה וסביבו נקודת התלכדות הזרועות. שימו לב לגמישות הרבה ולמגוון התנוחות של זרועות התמנון.



איור 1

סיפון

(Siphon)

מבנה אנטומי דמוי צינור הקיים בחלק מהרכיכות הימיות. הסיפון הוא חלק מהגלימה של התמנון. זרימת המים בסיפון מופנית אל או מחלל הגלימה, והיא משמשת למטרות כגון נשימה, ניקוי המחילה ולתנועה. בתמנון, הסיפון הוא מעין משפך הנמצא בבסיס הזרועות.

כפתורי הצמדה

(Suckers)

מעין כפתורים/ כריות הבולטים מהחלק התחתון של זרועות התמנון ומסייעים לו לאחוז בעצמים שונים ולבצע מגוון פעולות. ההצמדה מתבצעת בפעולה של יניקה ושאיבת מים ליצירת ואקום. לתמנון עד 2,000 כפתורי הצמדה.

וידאו 1

Octopus vulgaris פותר בעיה. הוא פותר מכסה של צנצנת כדי לקחת חתיכה מדג. <https://www.youtube.com/watch?v=0ViVeQAafVk>

מהסיפון שלהם – כך הם מערפלים את ראייתו של "הרוזדף" המופתע, ומפחידים אותו. מהסיפון הם גם מתיזים סילוני מים כדי למשוך תשומת לב, למשל מהמטפל, בזמן שהוא מאכיל תמנונים אחרים. התמנון משתמש בעצמים שונים כמו קליפות קוקוס וצדפות ריקות לבניית מחסה, והוא בעל יכולת מופלאה לשנות את צבע עורו ומרקם גופו במטרה להסתוות ולהיטמע בסביבה.

מלבד קופסה סחוסית שעוטפת את המוח ומקור עשוי לוחות כיטין (רב-סוכר) קשיחים בפיו, כל שאר חלקי גופו של התמנון נטולים רקמה קשיחה. שמונה זרועותיו גמישות, עטורות בכ-300 **כפתורי הצמדה** כל אחת, ועל דפנותיהן, בעיקר בחישוקי הכפתורים, פרושים מיליוני קולטנים המסוגלים לחוש במרקם ובטעם (איור 1).

התמנון טועם את סביבתו ואת העצמים השונים שבהם הוא נתקל על ידי כפתורי ההצמדה שבזרועות. השילוב של זרועות גמישות וכפתורי ההצמדה מאפשר לו לתפוס ולבדוק כל עצם הנמצא בסביבתו ביעילות רבה. התמנון משתמש בזרועותיו לתפיסת מזון והבאתו אל פיו; לפתיחת צדפות; ללכידת בעלי חיים המסתתרים בין האלמוגים והאבנים ומתחתיים וכן לצורות תנועה מגוונות. מיני תמנונים מסוימים מעצבים את זרועותיהם לצורה דמוית אצות כדי לבלבל טורפים.

במעבדה, מצליחים התמנונים בעזרת זרועותיהם להסיר את המכסים הכבדים של האקווריום ולחמוק החוצה; פותחים מכסה של צנצנת כדי להוציא מתוכה סרטן (וידאו 1), או משחילים את הזרועות במבוכים מפותלים כדי לשלוף מקצותיהם חתיכת מזון. שלל הפעולות המורכבות שאותן מבצע התמנון בעזרת זרועותיו, דורשות מערכת שליטה מוטורית מפותחת. מערכת שיכולה לשלב ביעילות למידה וזיכרון של חוויות עבר עם עיבוד כמות עצומה של מידע חושי כמו ראייה, טעם ומגע, המגיע ממאות מיליוני החיישנים שבגוף התמנון.

מערכת השליטה של התמנון לעומת זו של האדם

שליטה על גוף בעל שמונה זרועות גמישות מהווה אתגר אדיר עבור מערכת השליטה. לא לחינם בקרב רבים מבעלי החיים הרב-תאיים התפתח שלד קשיח שאומנם מגביל את אפשרויות התנועה, אך בד בבד מוריד את מספר התנוחות והמצבים האפשריים של הגוף, וכך

מקל מאוד על השליטה. באדם יש שלד עצמות עם כמה מפרקים שמפחית באופן משמעותי את מספר האפשרויות לשינוי מצב הגוף. היד שלנו, לדוגמה, בנויה מזרוע ואמה המכילות עצם לכל אורכן, לכן הן כמעט לא יכולות לשנות את צורתן. ביניהן ישנו מפרק אחד – המרפק – שמאפשר תנועה של האמה, ביחס לזרוע, בנקודה אחת בלבד. גם תנועה זו מוגבלת יחסית, בהתאם לתכונות המפרק – המרפק לדוגמה מאפשר בעיקר תנועה אנכית. אף אם נחשיב את מפרק הכתף, מפרק כף היד ומפרקי האצבעות, עדיין כמות התנוחות השונות שאנו מסוגלים לייצר ביד קטנה מאוד ביחס לכמות התנוחות השונות האפשריות בזרוע הגמישה של התמנון, ויש לו כאמור שמונה זרועות כאלה!

הסיבה לכך היא שבזרוע התמנון אין שלד קשיח, כלומר, כל מקטע ומקטע לאורך הזרוע כולה יכול להתכווץ, להסתובב ואפילו לשנות אורך ועובי. מכאן שמספר התנוחות ומצבי הגוף האפשריים שמערכת השליטה צריכה לעבד ולנהל בגוף שכזה, שואף לאינסוף. כמות התנוחות המוגבלת בגוף האדם מאפשרת שליטה ישירה וייצוג של מצב איברי הגוף במוח בכל עת ועת. כך אנו מסוגלים לבצע פעולות רבות גם בלי שנראה את גופנו, למשל למחוא כף מאחורי הגב. המוח פשוט יודע איפה הגפיים נמצאות גם בלי לראותן. פתרון זה אינו מעשי בתמנון, כיוון שלא ניתן לייצג במוח מספר כה גדול של מצבים ותנוחות.

איך שולט התמנון על גופו הגמיש ומרובה הזרועות?

לתמנון מערכת עצבים גדולה יחסית, המכילה כחצי מיליארד תאי עצב, בדומה למערכת העצבים של ארנבת. במערכת שלושה מרכזים עיקריים: מוח מרכזי; שתי **אונות אופטיות** המרכזות מידע שמגיע מהעיניים, ו**מערכת העצבים ההיקפית** של הזרועות, המכילה שני שלישים מכלל תאי העצב שבגוף התמנון. מספר מועט יחסית של תאי עצב מקשרים בין שלושת המרכזים האלה. מבנה זה של מערכת העצבים מרמז שהמידע העובר מהזרועות אל המוח כבר עבר עיבוד מסוים, בזרועות, ושחלק גדול מהפעילויות המוטוריות נשלטות ברמת הזרועות. המוח כנראה בעיקר מפעיל **תוכניות מוטוריות** שכבר נמצאות בזרועות [1].

אם קוטעים מתמנון זרוע היא ממשיכה לחיות לכמה שעות, ומגיבה בנסיגה מגירוי מכאיב כמו צביטה וביצוע **תנועות סטריאוטיפיות** כמו פשיטת הזרוע בתגובה לגירוי. באמצעות כפתורי ההצמדה הזרוע הקטועה מסוגלת להוביל מזון או עצם כלשהו מהקצה לבסיס (הבאה לכיוון הפה) או מהבסיס לקצה (הרחקה מהפה), ויכולה אפילו להחליט כמה חזק לתפוס גופים שונים, למשל, היא תתפוס דג טרי חזק יותר מסרטן מבושל [2]. מכאן אנו למדים שפעולות ובקורות שגרתיות רבות נשלטות ברמת הזרוע עצמה, ובכך מופחתת עבודה רבה מהמוח. מנגנון זה הוא יתרון ברור בחיה כמו תמנון, שמבנה גופה הגמיש ומרובה הגפיים מהווה מעמסה חישובית כבדה ביותר.

תנועת פשיטת הזרוע מודגמת בסדרת התמונות העליונה של איור 2 (משמאל לימין) ובסרטון זה (וידאו 2).

באמצעות פקודה אחת לכיוון השרירים, שמתקדמת לאורך הזרוע מבסיס לקצה ומביאה להקשחה ויישור, מממש התמנון שתי אסטרטגיות פעולה המקלות על השליטה המוטורית: ראשית, הפעולה מתקבלת גם בעקבות גירוי בזרוע מנותקת מתמנון, מכאן שתוכנית הפעולה

אונות אופטיות (Optical lobes)

האונות האופטיות משמשות כמערכת לקידוד מידע ויזואלי, לאחסונו ולפענוחו על מנת לייצר תגובה מוטורית מסוימת.

מערכת העצבים ההיקפית

(Peripheral nervous system (PNS))

חלק ממהערכת העצבים הממוקם מחוץ למערכת העצבים המרכזית (בבני אדם, מחוץ למוח לעמוד השדרה).

תוכנית מוטורית (Motor program)

סדרת פקודות קבועה שמביאה לביצוע פעולה מוגדרת. את התוכנית הבסיסית ניתן להתאים בדרך כלל לצורכי השעה, לדוגמה, להשפיע על מהירות הפעולה, חוזקה, משכה וכדומה.

תנועה סטריאוטיפית (Stereotypical movement)

תנועה שמבוצעת כל פעם באותה צורה טיפוסית.

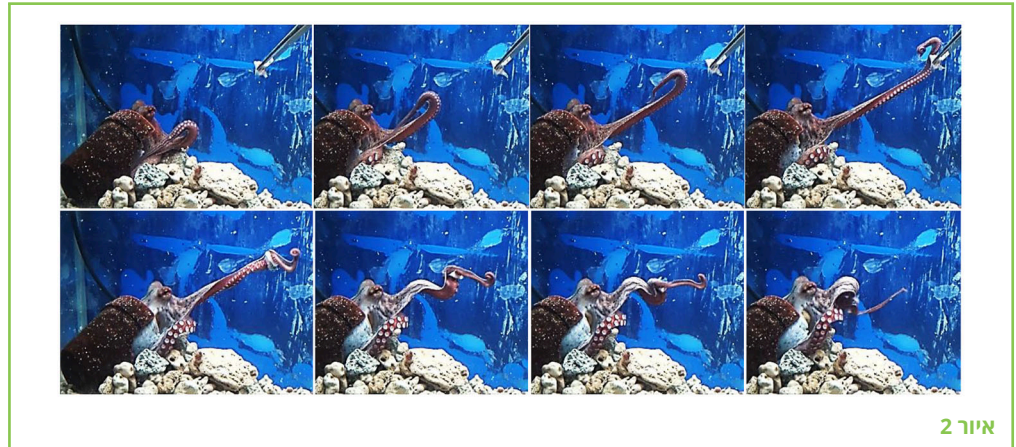
וידאו 2

Octopus vulgaris מבצע תנועת פשיטה לעבר חתיכת דג. הוא מביא אותו לפיו ע"י שינוי הזרוע שלו למעין איבר שדומה לזה של בן אדם, במטרה לשלוט בתנועות זרוע מדויקות. <https://www.youtube.com/watch?v=RoAetEziikw>

איור 2

תנועות זרוע סטריאוטיפיות של התמנון המצוי

(*Octopus vulgaris*). פאנל עליון משמאל לימין – רצף מצבי זרוע המבצעת תנועת פשיטה סטריאוטיפית. סדרת התמונות תואמת לסדרת תמונות ממאמר [3]. פאנל תחתון משמאל לימין – רצף מצבי זרוע המבצעת תנועת הבאה סטריאוטיפית. סדרת התמונות תואמת לסדרת תמונות ממאמר [4].



איור 2

לפשיטת הזרוע נשלטת ברמת הזרוע. האצלת השליטה לזרוע מורידה כאמור עומס חישובי מהמוח. שנית, כיוון שפעולת ההקשחה סטריאוטיפית, המוח צריך לשלוט על שלושה משתנים בלבד: אחד לקביעת מהירות ההקשחה (מהירות פשיטת הזרוע), ושניים נוספים לכוונון זווית בסיס הזרוע מהגוף, שתקבע את כיוון תנועת הפשיטה [3].

תנועת פשיטת זרוע מוצלחת שהביאה לתפיסת טרף מחייבת תנועה עוקבת להבאת הטרף אל הפה. חשוב לציין שכל נקודה לאורך הזרוע יכולה להיות הנקודה שבה נתפס הטרף. מחקר שהוביל G. Sumbre [4] הראה, כפי שמוצג בסדרת התמונות באיור 2 ובסרטון זה (וידאו 2), כי התמנון משתמש בדרך כלל בתנועה סטריאוטיפית המחלקת את המקטע שבין בסיס הזרוע לנקודה שבה מוחזק הטרף לשלושה מקטעים: פרוקסימלי (קרוב לבסיס הזרוע); מדיאלי (אמצעי) ודיסטלי (רחוק מבסיס הזרוע). המקטע הדיסטלי תופס את האובייקט ומשמש ככף יד בעוד שבמקטעים הפרוקסימלי והמדיאלי מתכווצים השרירים ליצירת שני מקטעים קשיחים, דומים באורכם, וביניהם אזור גמיש המדמה מפרק. עיצוב הזרוע דומה לגף האנושי המחולק במפרקים לזרוע, אמה וכף יד. כמו בתנועת הבאת המזון אל הפה בבני אדם, התמנון מביא את האוכל לפיו בעיקר על ידי כיפוף האזור הגמיש המדיאלי ("מקביל למרפק") בתנועה סטריאוטיפית הדורשת רק שלושה משתנים שניתנים לשליטה.

חשוב להדגיש שהתמנון אומנם מעצב את זרועו לתצורה הדומה לגף בעל שלד קשיח, אך בניגוד לגף, זרוע התמנון יכולה לקבוע מחדש את חלוקת הזרוע ומיקום המפרקים בכל תנועה ותנועה. כך התמנון "תופס שתי ציפורים במכה אחת": מוריד כמה משתנים חישוביים, אבל שומר על גמישות ועילות שמאפשרות תפיסה של עצם בכל נקודה לאורך הזרוע, ולא רק בכף היד כמו אצל בני האדם.

כיצד התמנון שולט ביעילות על זרועותיו כך שלא יתפסו זו את זו, או את הגוף?

כאמור, כל זרוע מזרועות התמנון מצוידת לכל אורכה בכ-300 כפתורי הצמדה. לכפתורי הצמדה נטייה להיצמד כמעט לכל גורם שבא איתן במגע, ולתפוס אותו. תופעה זו עלולה להוות בעיה משמעותית כיוון שגופו הגמיש של התמנון מאפשר לכל זרוע לגעת בשאר חלקי גופו ולתפוס אותם. פיקוח ישיר של המוח על הזרועות יהווה מעמסה חישובית יוצאת מן הכלל.

תחושה פרופריוצפטיבית (Proprioceptive sensation)

תחושה עצמית של הגוף שמעבירה למוח מידע על תחושת מגע עמוק, ועל מיקום איברי הגוף ביחס למרחב וביחס לאיברים אחרים.

מבנה מבוזר

מבנה מבוזר בהקשר של שליטה על גוף הוא מבנה של מערכת שליטה שמפזרת את סמכויות השליטה בין האיברים השונים. שלא כמו השליטה של מערכת עצבים מרכזית, במערכת שליטה מבוזרת חלק גדול מהשליטה המוטורית של כל איבר מתבצעת באיבר עצמו. זרוע התמנון למשל מבצעת פעילויות מוטוריות רבות גם אם נותקה מהתמנון (ומהמוח שלו).

בעיה זו אף מועצמת היות שהתמנון כנראה חסר **תחושה פרופריוצפטיבית**, ואינו מודע למצב זרועותיו כאשר הוא לא רואה אותן.

במעבדה מצאנו שכפתורי ההצמדה של זרוע המנותקת מתמנון לעולם לא יתפסו זרוע או אביזר שמכוסה בעור של תמנון. יתר על כן, הצלחנו להראות שניתן למצות מעור התמנון חומר שמעכב את פעולת ההיצמדות של כפתורי ההצמדה. מנגנון העיכוב פועל כנראה ברמת כפתור ההצמדה, מאחר שכפתורים סמוכים יתנהגו הפוך זה לזה אם רק אחד משניהם נוגע בעור (כלומר ימנע מלתפוס זרוע אחרת או אביזר מכוסה בעור תמנון). המוח המרכזי יכול לבטל את התופעה במקרים ייחודיים כמו קרוב עם תמנון אחר או הזדווגות. גם מנגנון זה מדגים אסטרטגיה יעילה שחוסכת עבודת בקרה למוח, ומאפשרת שליטה על הזרועות הגמישות "והדביקות" אפילו כאשר התמנון אינו רואה את זרועותיו.

לסיכום

מבנה גופו הגמיש ומרובה הזרועות של התמנון מאפשר לו לבצע התנהגויות מגוונות ומורכבות, אך מהווה אתגר גדול עבור מערכת השליטה המוטורית שלו. כדי להתמודד עם האתגר התפתחה בתמנון מערכת שליטה ייחודית המשלבת **מבנה מבוזר** שמאפשר עיבוד נתונים ושליטה נרחבת ברמת הזרועות עם אסטרטגיות מגוונות להפחתת כמות המשתנים המוטוריים והפשטה של מנגנוני השליטה. המחקר בתמנונים חושף פעם אחר פעם דרכים מפתיעות לפתרון בעיות סבוכות. אנו, חוקרי התמנונים, מאמינים שמנגנונים רבים שכאלה עדיין מחכים להתגלות.

מקורות

1. Levy, G., and Hochner, B. 2017. Embodied organization of Octopus vulgaris morphology, vision, and locomotion. *Front. Physiol.* 8:164. doi: 10.3389/fphys.2017.00164
2. Nesher, N., Levy, G., Grasso, F. W., and Hochner, B. 2014. Self-recognition mechanism between skin and suckers prevents octopus arms from interfering with each other. *Curr. Biol.* 24:1271–5. doi: 10.1016/j.cub.2014.04.024
3. Gutfreund, Y., Flash, T., Yarom, Y., Fiorito, G., Segev, I., and Hochner, B. 1996. Organization of octopus arm movements: a model system for studying the control of flexible arms. *J. Neurosci.* 16:7297–307. doi: 10.1523/JNEUROSCI.16-22-07297.1996
4. Sumbre, G., Fiorito, G., Flash, T., and Hochner, B. 2006. Octopuses use a human-like strategy to control precise point-to-point arm movements. *Curr. Biol.* 16:767–72. doi: 10.1016/j.cub.2006.02.069

פורסם אונליין: 22 בפברואר 2022

נערך על ידי: Idan Segev

מנחה מדעי: Idan Segev

ציטוט: Nesher N and Shomrat T (2022) איך מצליח התמנון לשלוט ביעילות על גופו הגמיש ומרובה הזרועות? *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2021.752728-he

Nesher N and Shomrat T (2021) How Does the Octopus Efficiently Control Its Flexible, Multi-Armed Body? Front. Young Minds 9:752728. doi: 10.3389/frym.2021.752728

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

COPYRIGHT © 2021 © Nesher and Shomrat 2022. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים (המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה). השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרים צעירים

14-13, EXCELLENCE PROGRAM, BRENNER HIGH SCHOOL

תלמידי חוג המצוינות (כיתות ז, ח) של תיכון ברנר, גבעת ברנר, מבתי הספר "בית אור" ו"בראשית".



הכותבים

NIR NESHER

גדלתי בקיבוץ בית זרע. כילד וכנער בן קיבוץ העברתי את רוב זמני בטבע ובעבודות חקלאיות. אחרי השירות הצבאי נסעתי לטיול בעולם שנמשך כמעט עשור, ועורר בי עניין רב בנושאים הקשורים למדעי הים ולמדעי כדור הארץ. כששבתי, למדתי מדעי הים וכיום אני דוקטור בתחום, חוקר ומרצה בכיר בפקולטה למדעי הים של המרכז האקדמי רופין. במעבדתנו, דוקטור טל שמרת ואני חוקרים יחד פיזיולוגיה של אחת החיות המעניינות בטבע, התמנון. אנו מתמקדים בהתנהגות, זיכרון ולמידה, ובמערכת השליטה המוטורית הייחודית שהתפתחה ביצור נמיש ורב-זרועות זה. [*nir.nesher@mail.huji.ac.il](mailto:nir.nesher@mail.huji.ac.il)

TAL SHOMRAT

אני חוקר בפקולטה למדעי הים במכללת רופין. במעבדה על שפת הים התיכון אני מגדל תמנונים, דיונונים ותולעים שטוחות הנקראות פלנריות. באמצעות מבחני התנהגות ובחינה של הפעילות העצבית במוחותיהן של שלוש חיות המודל, אני מעוניין להבין את הבסיס הניורוביולוגי להתנהגות מורכבת, למידה וזיכרון. אני צולל מגיל צעיר מאוד, וההיכרות שלי עם התמנון נוצרה עוד בילדותי, הרבה לפני שידעתי שיום אחד אהיה דוקטור חוקר של היצורים המופלאים הללו.

מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטייה מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK