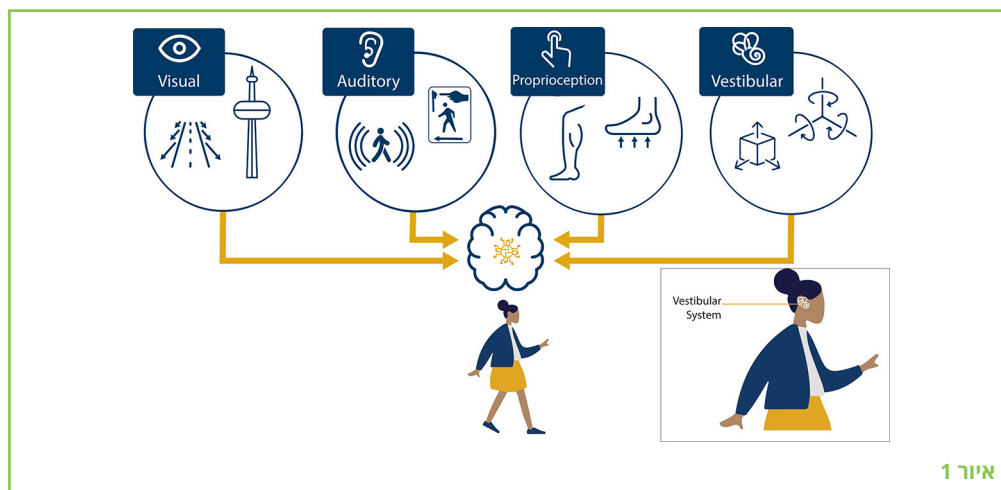




## איור 1

המוח משתמש בשילוב בין קלטי חושים; ראייה; שמיעה; פרופריוספציה (שרירים ומפרקים) ושיווי משקל (מהירות ותאוצה), כדי לבצע תנועה עצמית. התיבה מצד ימין למטה מראה את מיקומה של מערכת שיווי המשקל, שנמצאת באוזן הפנימית.



איור 1

## החושים שלנו עוזרים לנו לדעת שאנו זזים

אנחנו מבצעים סוגי תנועות שונים עם הגוף שלנו. לעיתים התנועות שאנו מבצעים קטנות ועדינות מאוד, כמו למשל ניסיון לעמוד בצורה דוממת מאוד. לעיתים התנועות שלנו גדולות, כמו למשל ריצה אחרי כדור. אולם בין אם הן גדולות או קטנות, אנו תמיד משתמשים בכמה חושים (מערכות החישה שלנו) כדי לפרש את התנועות האלה ולהדריך אותן. מערכות החישה כוללות את מערכת הראייה; את מערכת השמיעה; את **מערכת הפרופריוספציה** (שרירים ומפרקים); את מערכת המישוש (מגע) ואת **מערכת שיווי המשקל** (מהירות ותאוצה) (איור 1). כיצד מערכות החושים האלה פועלות יחד כצוות כדי לסייע לנו לזוז ביעילות ובבטחה?

## קלטים חושיים בפעולה

בואו ננסה תנועה קטנה כניסוי. ראשית, עמדו במקום אחד ונסו להישאר ללא תנועה. אפילו המטלה הפשוטה הזו דורשת מהמוח שלכם לחבר מידע מהרבה מקורות חושיים שונים. מערכת אחת שממלאה תפקיד חשוב היא מערכת הראייה. כשאתם זזים, מערכת הראייה שלכם משתמשת ברמזים של סימני נוף (כמו מגדל גדול במרכז העיר) ובתנועה ויזואלית משתנה (כמו למשל פסים בכביש מהיר שנעים במהירות כשאתם חולפים על פניהם) כדי לדעת כמה אתם זזים. בזמן שאתם עומדים במקום, סגרו את עיניכם וראו מה קורה. ככל הנראה נהיה לכם קשה יותר להישאר יציבים, מה שאומר שמערכת הראייה תומכת בשיווי משקל. כעת, נסו להרים רגל אחת מהרצפה. המידע מחיישני המישוש (מגע) ברגל שלכם אומר לכם אם הרצפה שטוחה, והשרירים והמפרקים שלכם מספקים מידע על המיקום שבו חלקי הגוף שלכם נמצאים בחלל, ואחד ביחס לשני. אנו קוראים לקלטים האלה בשם מערכת הפרופריוספציה שלכם. לבסוף, עמדו על משהו רך. זה יאתגר עוד יותר את מערכת הפרופריוספציה שלכם, ואתם עשויים לזוז יותר מאשר קודם, כאשר עמדתם על משטח קשיח. מערכת שיווי המשקל ממוקמת באוזן הפנימית (איור 1), והיא משמשת כ"מד התאוצה" של המוח שלנו. האם כבר נפלתם? אנו מקווים שלא, מאחר שברגע שהמוח שלכם מאתר שיצאתם מאיזון, הוא שולח הודעות לשרירים שלכם כדי שיכווננו את הגוף שלכם כך שלא תיפלו.

## מערכת הפרופריוספציה (Proprioceptive System)

חשה את השרירים והמפרקים שלנו.

## מערכת שיווי המשקל (Vestibular System)

חשה מהירות ותאוצה, ומסייעת ליידיע תנועות עיניים. היא ממוקמת בחלק הפנימי של האוזן (איור 1).

עבור תנועה גדולה, כמו למשל כשאתם משחקים כדורגל או רצים אחרי כדורסל, חשוב לתאם קלטים חושיים, כך שהעולם לא יראה קופצני או מטושטש. בזמן שהראש שלכם נע שמאלה וימינה, אותות ממערכת שיווי המשקל מעובדים תוך אלפיות שנייה בודדות כדי לומר לעיניים שלכם באיזה כיוון אתם נעים, מה שידוע כ"רפלקס איזוני-עיני" (vestibular-ocular reflex). באופן הזה, מערכת שיווי המשקל מסייעת לכם לשמור על העיניים שלכם במבט יציב על הכדור, בזמן שהראש שלכם נע מעלה ומטה, בלי שהתמונה של הכדור תיעשה מטושטשת... ג-ו-ל!

אף על פי שמערכות החושים בדרך כלל פועלות יחד כדי לסייע לנו עם **תנועה עצמית**, לעיתים קלטים חושיים מסוימים אמינים יותר מאחרים. לדוגמה, בלילה או כאשר יש ערפל בחוץ, המידע הראייתי שלנו פחות אמין, ולכן המוח סומך יותר על קלטים חושיים אחרים, כמו למשל קלטים של פרופוריוספציה ו/או של שיווי משקל. מחקרים עדכניים חקרו את האופן שבו ראייה, פרופוריוספציה, שמיעה ומידע של שיווי משקל תורמים לחוויה של תנועה עצמית [1].

## ניסויי תנועה עצמית

כדי להבין כיצד כל קלט חושי תורם לחוויה של תנועה עצמית, מועיל להסיר קלטים חושיים אינדיבידואליים במטרה לראות מה קורה. לדוגמה, כיצד הסרת הראייה, למשל באמצעות כיסוי עיניים, משפיעה על היכולת לשפוט את המרחק שזזנו, את מהירות התנועה שלנו, או את כיוון התנועה שלנו? מתברר שאנו עדיין יכולים לתפקד די טוב כאשר אחד החושים שלנו חסר! אולם אם אנו רוצים לדעת כיצד כל קלט חושי תורם כשכל הקלטים זמינים, כמו כשקורה באינטראקציות ברוב היום, נעשה קשה להשפיע על כל קלט באופן עצמאי. טכנולוגיות מודרניות של מציאות מדומה (VR) הפכו את האתגר הזה לקל יותר (קראו על כך עוד בכתבת פרונטייר - מדע לצעירים; הפיכת המציאות לווירטואלית: איך VR "מתעתעת" במוחכם! [2]). כדי לראות סרטונים של ניסויי VR שהמחברים השתמשו בהם בניסויים שלהם, הסתכלו על הקישורים [3, 4].

באמצעות VR, המחברים חקרו את התרומה של מידע ראייתי ומידע של שיווי משקל עבור קביעת **כיוון התנועה** (איור 2A), כשהכוונה היא לדעת באיזו דרך אתם הולכים. משתתפים ישבו על פלטפורמה נעה שהזיזה אותם קדימה ושמאלה, או קדימה וימינה, בזוויות מזויקות מאוד [5]. משתתפים גם צפו בהקרנה על מסך שגרמה להם להרגיש כאילו שהם בחלל, עפים דרך ענני כוכבים. מטלת המשתתפים הייתה פשוט לקבוע אם הם נעו שמאלה או ימינה. לעיתים הפלטפורמה הזיזה אותם בזוויות גדולות וברורות מאוד, ולעיתים הזוויות היו קטנות מאוד. מדדנו את הזווית הקטנה ביותר שמשתתפים יכלו לחוש. מטלת כיוון התנועה בוצעה באמצעות ראייה בלבד; תנועה בלבד (מערכת שיווי המשקל), ועם ראייה ותנועה יחד. התוצאות הראו שמשתתפים היו טובים באותה המידה במטלת כיוון התנועה כשהם השתמשו במערכת הראייה שלהם או במערכת שיווי המשקל שלהם, אולם הם היו טובים יותר כשהם השתמשו בשתייהן יחד.

כדי לחקור עוד אם משתתפים סמכו יותר על הערכות של ראייה או של שיווי משקל כאשר שתי המערכות היו זמינות, השתמשנו בתכסיס של ניסוי VR (שקשה מאוד לבצע בעולם האמיתי). בפרט, הצגנו למשתתפים מידע ראייתי על כיוון תנועה קדימה עם זווית של 5 מעלות שמאלה, אולם מידע של שיווי משקל על כיוון תנועה קדימה עם זווית של 5 מעלות ימינה! זה נקרא

### תנועה עצמית (Self-motion)

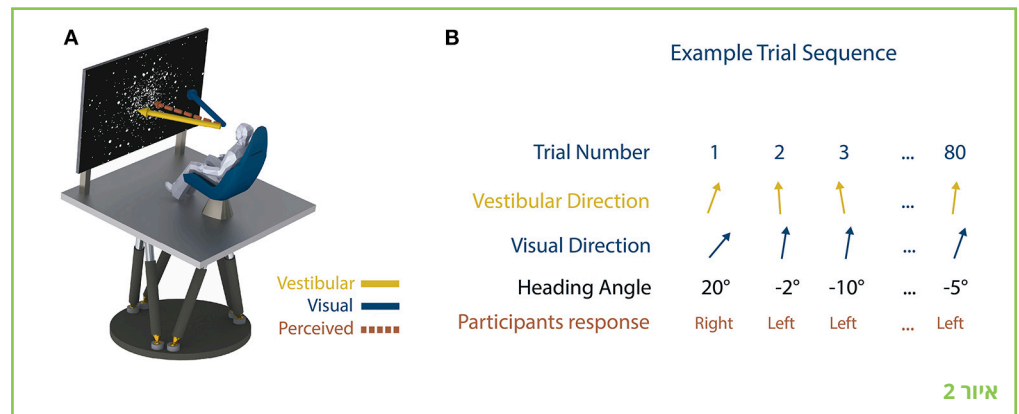
כשמישהו זז, כמו בהליכה;  
בריצה; ברכיבה על אופניים;  
בנהיגה, או אפילו בישיבה  
במטוס שטס.

### כיוון התנועה (Heading Direction)

הכיוון שאליו אתם זזים.

## איור 2

(A) מערך הניסוי; פלטפורמת תנועה ותצוגה ויזואלית. המשתתפים זזו קדימה ושמאלה או ימינה, אולם קלטי הראייה ושיווי המשקל נעו בזוויות מעט שונות ויצרו קונפליקט חושי. משתתפים התבקשו לומר אם הם הרגישו שהם נעו ימינה או שמאלה. (B) תוצאות לדוגמה מאחד המשתתפים. הניסוי כלל 80 נסיונות (חזרות). השורה העליונה היא מספר הניסוי, השורות השנייה והשלישית מראות את זווית הכיוון עבור גירוי שיווי המשקל והגירוי הראייתי, והשורה הרביעית מראה את כיוון התנועה האמיתי. השורה החמישית מראה את תגובתו של המשתתף. בסך הכול, תוצאות הניסוי הן שהראו שמשתתפים השתמשו במידע של שיווי משקל יותר מאשר במידע ראייתי.



איור 2

**קונפליקט חושי (איור 2A,B)**, ומרבית המשתתפים לא היו ערים לכך שהקונפליקט התרחש. שיטה זו יכולה לשמש כדי להעריך כיצד כל מידע חושי "משוקלל" על ידי המוח. על ידי ניתוח התגובות של משתתפים, הראינו שמשתתפים התייחסו יותר לרמזים של שיווי משקל מאשר לרמזים ראייתיים, כלומר הם השתמשו במידע של שיווי משקל יותר מאשר במידע ראייתי כשהם החליטו על כיוון התנועה שלהם.

## אשליות תנועה עצמית

במרבית הזמן אנו לגמרי לא ערים לכך שהמוח משלב באופן חלק קלטים מהחושים שלנו, בזמן שאנו מתנהלים בחיי היומיום שלנו. אולם לעיתים אנו יכולים לחוות אשליות של תנועה עצמית. דוגמה טובה לכך היא "אשליית הרכבת". אשליה זו נחווית כאשר אתם יושבים ברכבת שלא זזה, והרכבת שלידכם מתחילה לזוז – המוח שלכם מתבלבל לרגע וחושב שזו הרכבת שלכם שזזה. הסיבה לכך היא שכאשר מרבית שדה הראייה שלנו זז, זה בדרך כלל אומר שאתם זזים בעולם, ולא שהעולם זז ואתם נשארים במקום. המונח המדעי לאשליה ראייתית שגורמת לחשוב שאתם זזים הוא **אשליית תנועה עצמית** (vection באנגלית).

מפתחים של משחקי וידאו ומפיקי סרטים לעיתים קרובות משתמשים באשליית תנועה עצמית כדי להעצים את התחושה שאתם זזים בזמן שאתם משחקים במשחק הרפתקאות בווידיאו או צופים בסרט. ככל שהתנועה הראייתית תופסת חלק גדול יותר משדה הראייה, וככל שהחוויה מְגֵרָה את מרבית מערכות החושים שלכם, כך תרגישו אשליית תנועה עצמית חזקה יותר. אולם צריך לשים לב שלא לגרום לסוג מיוחד של מחלה תנועתית שנקראת "מחלה תנועתית שנגרמת על ידי ראייה", או מחלת סייבר.

## תפיסת תנועה עצמית יכולה להיות שונה עבור אנשים שונים

האופן שבו אנו תופסים תנועה עצמית משתנה מלידה לבגרות. כשאנו מתבגרים, לעיתים קרובות אנו חווים ירידה בתפקוד מערכות החושים שלנו, כמו למשל ראייה פחות טובה; חולשה שרירית ואובדן שמיעה. הירידות האלה בתפקוד משמעותן שחשוב מאוד שהמוח יבצע אינטגרציה של מידע חושי כשאנו מתבגרים. לדוגמה, אם אתם מקבלים אותות חזקים ממערכת שיווי המשקל בזמן שאתם הולכים במורד הרחוב, האותות האלה עשויים להיות טובים בלקבוע

### קונפליקט חושי

#### (Sensory Conflict)

כאשר שני חושים מספקים מידע שונה, כמו למשל במקרה שהמערכת הוויזואלית אומרת שאתם נעים ימינה ומערכת שיווי המשקל אומרת שאתם נעים שמאלה.

### אשליית תנועה עצמית

#### (vection)

תחושת האשליה של תנועה עצמית.

את תנועות הגוף שלכם עם מעט סיוע ממערכות החושים האחרות שלכם; אולם אם אותות שיווי המשקל חלשים, קבלת ראיות נוספות ממערכת הראייה או השמיעה תהיה מועילה. זה חשוב מאחר שכאשר אנשים חווים ירידה בתפקוד חושי הקשורה לגיל ו/או הבדלים באופן שבו הם משלבים מידע חושי, עשויות להיות לכך השלכות רציניות, כולל נפילות ותאונות. מסיבה זו, אנו חוקרים עוד את השאלות האלה אצל אנשים מבוגרים, במטרה לסייע למנוע את סוגי התאונות האלה [6].

לקיוות רפואיות אחרות יכולות להשפיע על תפיסה של תנועה עצמית ועל תנועתיות. לדוגמה, מחלת פרקינסון היא לקות של המוח שגורמת לאדם לחוות קשיים בשליטה על התנועות שלו, למשל במהלך הליכה. חלק מהקשיים האלה עשויים להיות כתוצאה מבעיות של תיאום קלטים חושיים שבדרך כלל תומכים בתנועתיות בטוחה (ראו כתבת פרונטירז מדע-לצעירים על מחלות ניווניות של המוח) [7]. ככל שנערוך יותר מחקר במטרה להבין מחלות כמו מחלת פרקינסון, כך נהיה מסוגלים יותר לסייע בעתיד לאנשים עם המחלות האלה [8].

## מסקנות

מחקרים עדכניים הראו שתפיסה יעילה של תנועה-עצמית תלויה באינטגרציה מוצלחת של מידע ראייתי; פרופריוצפטיבי; שמיעתי ווסטיבולרי (שקשור לשיווי המשקל), כדי לתמוך בתנועתיות בטוחה בזמן הליכה, רכיבה ונהיגה. לכשלים בתיאום של כל הקלטים החושיים יכולות להיות תוצאות חמורות, כולל הליכה לאיבוד, התנגשות עם אובייקטים, או נפילה. על ידי הבנת האופן שבו המוח מחבר את הקלטים החושיים האלה, אפשר לפתח טיפולים חדשים ולתמוך בהזדקנות בריאה, כדי לטפל בלקויות תנועה, ואפילו לפתח טכנולוגיות מציאות מדומה חדשות עבור חינוך ובידור.

## מאמר המקור

Butler, J. S., Smith, S. T., Campos, J. L., and Bühlhoff, H. H. 2010. Bayesian integration of visual and vestibular signals for heading. *J. Vis.* 10:23. doi: 10.1167/10.11.23

## מקורות

1. Campos, J. L., and Bühlhoff, H. H. 2012. "Multisensory integration during self-motion in virtual reality," in *Frontiers in the Neural Bases of Multisensory Processes*, eds M. M. Murray and M. Wallace (Boca Raton, FL: CRC Press; Taylor & Francis). p. 603–28.
2. Penn, R., and Hout, M. 2018. Making reality virtual: how VR "tricks" your brain. *Front. Young Minds* 6:62. doi: 10.3389/frym.2018.00062
3. iDAPT Young Innovators. 2018. *CEAL Mini Tour*. Available online at: <https://www.idaptyouth.com/blank> (retrieved November 26, 2019).
4. Bühlhoff, H. H. 2013. *The MPI CyberMotion Simulator*. Retrieved from: <https://www.youtube.com/watch?v=ThkymYRP1g8>

5. Butler, J. S., Smith, S. T., Campos, J. L., and Bühlhoff, H. H. 2010. Bayesian integration of visual and vestibular signals for heading. *J. Vis.* 10:23. doi: 10.1167/10.11.23
6. Ramkhalawansingh, R., Keshavarz, B., Haycock, B., Shahab, S., and Campos, J. L. 2017. Examining the effect of age on visual-vestibular self-motion perception using a driving paradigm. *Perception* 46:566–85. doi: 10.1177/0301006616675883
7. Berman, T., and Bayati, A. 2018. What are neurodegenerative diseases and how do they affect the brain? *Front. Young Minds* 6:70. doi: 10.3389/frym.2018.00070
8. Fearon, C., Butler, J. S., Newman, L., Lynch, T., and Reilly, R. B. 2015. Audiovisual processing is abnormal in Parkinson's disease and correlates with freezing of gait and disease duration. *J. Parkinsons Dis.* 5:925–36. doi: 10.3233/JPD-150655

פורסם אונליין: 24 בפברואר 2022

נערך על ידי: Gideon Poul Caplovitz

מנחה מדעי: Taissa Lytchenko

**ציטוט:** Campos JL, Pandi M and Butler JS (2022) "מרגישים" את עצמנו זזים: מאמץ קבוצתי של החושים שלנו. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2020.00009-he

**תורגם והותאם:** Campos JL, Pandi M and Butler JS (2020) "Feeling" Ourselves Move: A Team Effort by Our Senses. *Front. Young Minds* 8:9. doi: 10.3389/frym.2020.00009

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

**COPYRIGHT** © 2020 © Campos, Pandi and Butler 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 (ים) 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

### VERDI ELEMENTARY SCHOOL, גיל: 11-14

כיתה ה של גברת מאיר, שידועה גם בתור "החמישית המופלאה", בבית הספר היסודי Verdi, נהנית מאוד ללמוד על המוח! 25 התלמידים האינטליגנטים והנלהבים שלה באמת אוהבים מדע. עם סיוע ממורתם ומהמנטורים שלהם גרנט וטאסה, הם התמודדו עם תהליך סקירת המאמר בקלילות. הם גם בחרו צבי בתור האוטר שללהם, מאחר שהם מכירים די טוב את היצורים היפהיים האלה, שאותם הם רואים באופן יומיומי בשכונה שלהם.



## הכותבים



### JENNIFER L. CAMPOS

אני יושבת ראש של מחקר קנדי באינטגרציה רב-חושית והזדקנות; המנהלת הראשית ומדענית בכירה במכון השיקום KITE-טורונטו, באוניברסיטת רשת הבריאות בטורונטו קנדה. המחקר שלי מתמקד בהעצמת תנועתיות בטוחה במהלך הליכה ונהיגה, תחת תנאים ריאליסטיים ומאתגרים. זה כולל הבנה של האופן שבו הגיל משפיע על תנועה עצמית, וכיצד כשלים חושיים שקשורים לגיל (בראייה, בשמיעה וכדומה) ותפקוד מוחי ירוד, יכולים להגדיל את הסיכון לנפילות ולהתנגשויות בין רכבים.



### MARYAM PANDI

אני חוקרת אנליסטית במכון שיקום KITE-טורונטו, באוניברסיטת רשת הבריאות. הרקע שלי הוא בפסיכולוגיה, שם למדתי אינטגרציה רב-חושית בהקשר של נהיגה. חוץ ממחקר, אני מובילה תוכנית STEM (מדע, טכנולוגיה, חינוך ומתמטיקה) שנקראת "KITE Young Innovators", שדרכה אנו מעוררים השראה באנשים צעירים לחקור ולשקול נתיבי קריירה מגוונים בתחומי המדע.



### JOHN S. BUTLER

אני מרצה למתמטיקה באוניברסיטה הטכנולוגית של דבלין, אירלנד. אני משתמש ברקע הכפול שלי במתמטיקה ובמדעי המוח כדי לעצב ניסויים ושיטות ניתוח בשביל לחקור אינטגרציה של מידע חושי אצל אנשים עם אוטיזם וקוצר ראייה, ומוזלים שיאפשרו לנו להבין כיצד המוח משלב מידע ויזואלי ומידע ממערכת שיווי המשקל עבור תנועה עצמית. \*jslbutler@gmail.com

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



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל  
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK