

מוח אינטראקטיבי תלת-ממדי מסייע ללמוד כיצד המוח מאורגן

Paul S. Scotti^{1*}, Arman P. Kulkarni^{2*}, Matan Mazor³, Eduard Klapwijk⁴, Alexander Huth^{5,6}

¹המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת אוהיו, קולומבוס, אוהיו, ארצות הברית
²המחלקה להנדסה ביו-רפואית, אוניברסיטת ויסקונסין-מדיסון, מדיסון, ויסקונסין, ארצות הברית
³מרכז וולקם לדימות מוחי אנושי, קולג' אוניברסיטאי לונדון, לונדון, בריטניה
⁴בית ספר אקסמוס למדעי החברה ומדעי ההתנהגות, אוניברסיטת ארסמוס, רוטרדם, הולנד
⁵המחלקה למדעי המוח, אוניברסיטת טקסס אוסטיין, אוסטיין, טקסס, ארצות הברית
⁶המחלקה למדעי המחשב, אוניברסיטת טקסס אוסטיין, אוסטיין, טקסס, ארצות הברית

סוקרים צעירים

CLAUDIO
גיל: 13



ELLIOT
גיל: 11



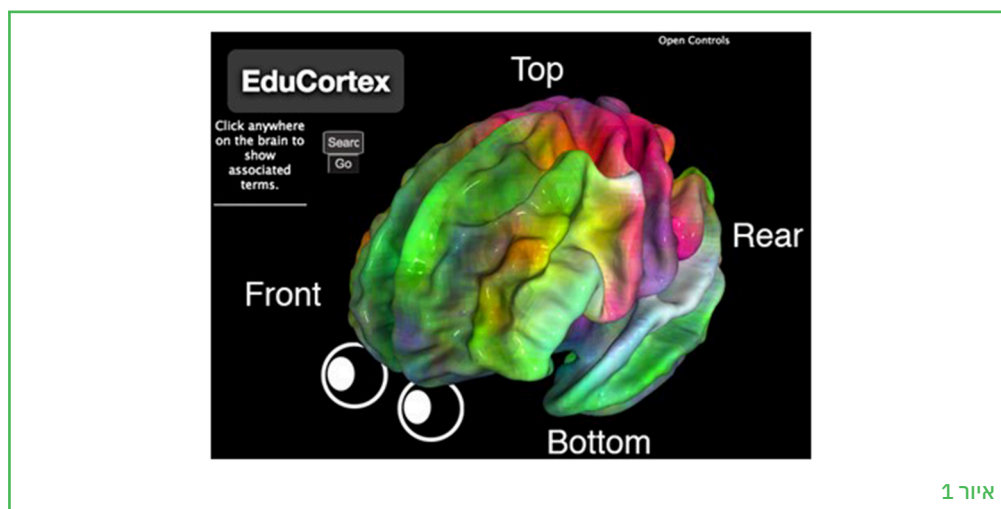
TOBY
גיל: 12



אילו אזורים במוח מסייעים לכם לדבר ולהבין אחרים? ומה לגבי זיהוי פני חברים? או זיכרון של הפעם האחרונה שאכלתם את הקינוח האהוב עליכם? במאמר זה נתאר את EduCortex-כלי חינוכי חינוכי המאפשר לכם לשחק עם מוח תלת-ממדי, במטרה לגלות כיצד אזורים שונים במוחכם פועלים יחד כדי לסייע לכם לבצע דברים שונים. בלחיצה על המוח התלת-ממדי, יוצגו בפניכם המילים שהכי מקושרות לאזור המוח הנבחר. כמו כן, בהקלדת מילה דוגמת 'שפה', תוכלו לראות את חלקי המוח שקשורים לשפה. פעילותו של EduCortex מבוססת על שימוש במאגר מידע מקוון. מאגר זה בודק באופן אוטומטי יותר מ-14,000 מאמרים מדעיים, על מנת לבחון כיצד התוכן של כל מאמר קשור לאזורים שונים במוח.

מהו EduCortex?

EduCortex הוא כלי חינוכי שמסייע לאנשים ללמוד על אודות המוח. כלי זה מאפשר למשתמשים בו לשחק עם מוח תלת-ממדי, כדי ללמוד אילו חלקים במוח מבצעים אילו תפקודים [1].¹ כשתבקר באתר האינטרנט של EduCortex בפעם הראשונה, יקבל את פניכם מוח אנושי צבעוני (איור 1). המוח האנושי האמיתי הוא איבר אפרפר בעל גוון אדמדם בשל זרימת דם, אך המוח שתראו ב-EduCortex הוא צבעוני באופן שאינו משקף את המציאות, כדי לסייע לכם ללמוד. המוח ב-EduCortex מציג את **קליפת המוח**, שהיא פני השטח החיצוני של המוח. זהו החלק בראש שהייתם רואים לו העור והגולגולת היו מוסרים. שימו לב לכך שהמוח המוצג בכלי זה הוא ממוצע של הרבה מוחות בוגרים, אך מוחות פרטניים מתאפיינים בצורות ובגדלים שונים.



איור 1

בעת השימוש ב-EduCortex תוכלו ללחוץ על המוח ולגרור אותו כדי לסובב אותו. כמו כן באפשרותכם להשתמש בגלגל הגלילה בעכבר המחשב שלכם (או ללחוץ על הלחצן הימני ולגרור) כדי להקטין את המוח ולהגדילו. כלי מצלמה אחרים ניתן למצוא באמצעות לחיצה על "Open Controls" בחלק הימני העליון.² בחלק הימני התחתון של המסך מופיע ענן מילים. צבעי המילים תואמים לצבעים שאתם רואים במוח. לדוגמה, המילה "motor" שמייצגת כישורי תנועה (motor skills-תפקודים שקשורים לתנועה פיזית), צבועה באדום בענן המילים, והאזור המוחי שמעורב בתנועה פיזית צבוע גם הוא באדום. המילים בענן המילים מייצגות את המונחים שמסבירים באופן המיטבי את הפעילות המוחית בכל אזור. מידע זה נאסף מאלפי מאמרים מדעיים.³

אם תלחצו על מקומות שונים במוח התלת-ממדי, תוצג בצד שמאל של המסך רשימת מילים מודגשות. מילים אלה מבטאות את המונחים המקושרים ביותר עם אזור המוח שלחצתם עליו (בטווח של 6 מילימטרים). נסו ללחוץ על אחד המונחים האלה, והמוח ישנה את צבעו. אזורים אדומים במוח הם אזורים שמקושרים עם המונח שלחצתם עליו. צבע אדום כהה יותר מצביע על קשר חזק יותר-אלה האזורים שהכי מעורבים בתפקודים המתוארים על ידי המילה שלחצתם עליה. ייתכן שהבחנתם בכך כי מרבית מונחי החיפוש אינם ממופים לאזור אחד בלבד במוח. הסיבה לכך היא שעבור מרבית המטלות, המוח פועל ברשתות של אזורים ש"מדברים" זה עם זה.

¹תוכלו להשתמש ב-EduCortex בלחיצה כאן.

קליפת המוח (Cerebral cortex)

השכבה החיצונית ביותר של המוח.

איור 1

צילומי מסך ערוכים

של EduCortex. החלק השמאלי של המוח מוצג, בעוד שהחלק הימני מוסתר בעיקרו. תגיות וקריקטורה של עיניים מציגות את מיקום המוח וכיוונו. צבעי המוח מותאמים לצבעי המילים בענן המילים שלנו (איור 2). כך, אזורי מוח הצבועים באדום הם אלה שמבצעים תפקודים הקשורים בכישורים תנועתיים (תנועה פיזית), ואזורים הצבועים בירוק מבצעים תפקודים הקשורים בזיכרון.

²כדי להמחיש את המוח באופן חזותי ולתקשר עימו, השתמשו בספריית תוכנה שנקראת PyCortex [2].

³תהליך זה מבוצע אוטומטית על ידי מאגר הנתונים המקוון Neurosynth [3].

בצד שמאל של המסך מופיעה גם תיבת חיפוש. נסו להקליד מילים כמו "language" (שֵׁפָה), "face" (פְּנִים), או "memory" (זיכרון). אם אתם מכירים מילים אנטומיות, תוכלו להקליד גם אותן, כמו למשל "occipital" (אוקסיפיטלי) – האונה המוחית שמעבדת מידע המתקבל מהעיניים. בלחיצה על "Go", המוח שוב ישנה את צבעו, ואזורי המוח המקושרים במידה הרבה ביותר למילת החיפוש יופיעו באדום.

מפות מוח

מפות מוח הן אחד הרכיבים של EduCortex. מפת מוח דומה למפת עולם. מפת עולם מציגה מידע על יבשות ומדינות שונות, ומפת מוח מציגה מידע על אזורים שונים במוח. כשתקלידו ב-EduCortex את המילה "language" (שפה), תוצג מפת מוח שבה האזורים האדומים יותר, מעורבים יותר בעיבוד שפה. מפות המוח של EduCortex נוצרו על בסיס 14,371 מאמרים מדעיים על אודות המוח!

כיצד כל המאמרים המדעיים האלה נהפכו למפת מוח יחידה עבור כל מונח? ראשית, כל מאמר תויג עם קבוצת מונחים שהופיעה במאמר לעיתים תכופות. שנית, עבור כל מונח, נרשמו המיקומים במוח שדווחו בכל מאמר. שלישית, עבור כל מיקום במוח, חושבה ההסתברות של הופעת כל מונח בתוך כל המאמרים. לבסוף, מפת המוח עבור כל מונח נוצרה כך שהסתברויות גבוהות יותר יוצגו על ידי מיקומים מוחיים אדומים יותר. EduCortex לוקח את כל מפות המוח ומציג אותן בדפדפן אינטרנטי תלת-ממדי אינטראקטיבי.

ענן מילים

ענן המילים הוא רכיב חשוב נוסף של EduCortex. יצרנו קבוצת מונחים שהסבירה הכי טוב את הפעילויות המוחיות שתוארו בכל המאמרים המדעיים. למה הכוונה? דַמְיִנו שהייתם צריכים לבחור שלושה פריטי מזון בלבד שניתן לערבב יחד ליצירת ארוחותיכם. מה היה מופיע ברשימה שלכם? לדוגמה, תוכלו לשים ברשימתכם לחם, עגבניות וגבינה, כדי ליצור פיצה. אך פריטי מזון אלה לא יאפשרו לכם להכין דגני בוקר, גלידה, או סלט פירות. במקום זאת, אתם עשויים לרצות שכל אחד משלושת פריטי המזון שלכם יהיה רכיב בסיסי יותר כמו קמח, ביצים וחלב. כשמשלבים אותם בכמויות שונות, רכיבים בסיסיים יכולים ליצור הרבה יותר מנות. זה בערך מתאר את השיטה שהשתמשנו בה, שנקראת **ניתוח גורמים ראשיים** [4], אלא שאנו השתמשנו במונחים הקשורים למוח, במקום לארוחות.

התחלנו עם 950 מונחים שקשורים למוח, אשר נאספו מהמאמרים המדעיים, ויצרנו מפות של המיקומים במוח שמקושרים למונחים האלה. לאחר מכן, השתמשנו בשיטת ניתוח גורמים ראשיים כדי לפשט את 950 המפות לשלוש מפות מוח בלבד, אשר שילובן במגוון דרכים יכול ליצור באופן סביר את 950 מפות המוח המקוריות. לאחר מכן, שאלנו לאילו מתוך 950 המפות הייתה ההשפעה הגדולה ביותר על שלוש מפות המוח המפושטות. אלה הם המונחים שמוצגים בענן המילים (איור 2).

ניתוח גורמים ראשיים (Principal components analysis)

שיטה לפישוט נתונים
לקבוצות קטנות, המכילות
את החלקים החשובים ביותר.

איור 2

יצירת ענן המילים באמצעות שיטת ניתוח גורמים ראשיים. הצבעים של המוח באיור 1 קשורים לצבעים של המילים בענן המילים של EduCortex. לדוגמה, האזורים האדומים במוח קשורים לתנועה פיזית ("motor"). ענן המילים נוצר באמצעות שיטה שנקראת ניתוח גורמים ראשיים, שבה מוצגים המונחים בעלי ההשפעה הגדולה ביותר על שלוש מפות המוח המפושטות.



המוח מצביע על התמחות תפקודית

שימוש חינוכי חשוב של EduCortex נועד לסייע לכם להבין טוב יותר כיצד חלקים שונים במוח מעורבים בתפקודים שונים. במשך מאות שנים, חוקרים ורופאים רבים חקרו ותייגו מבנים במוחות של חיות ובני אדם באמצעות חיתוך מוחות מגופות וניתוחם. הודות לשיטות מודרניות לדימות מוחי, כיום ביכולתנו לחקור את המוח של בני אדם חיים. לְשֵׁם כֵךְ, חוקרים מבקשים מאנשים להיכנס לסורק מוח, ובזמן שהותם שָׁם לבצע מטלות מסוימות. המטרה היא לבדוק אילו אזורים במוח נעשים פעילים במהלך ביצוע המשימות. חיבור רַאֲיוֹת ממחקרים רבים יכול ללמדנו אילו אזורים במוח מתמחים בביצוע תפקודים מסוימים. דבר זה נקרא **התמחות תפקודית**, וקל לראותו באמצעות EduCortex.

התמחות תפקודית (Functional specialization)

הרעיון שלפיו אזורים שונים במוח מעורבים בביצוע תפקודים שונים.

לדוגמה, החלק האחורי של המוח מעורב מאוד בעיבוד מידע חזותי, מה שמאפשר לכם לראות ולהבין את מה שאתם רואים. לעומת זאת החלק העליון של המוח מעורב מאוד בחיִשָּׁה ובתנועה פיזיות, כמו למשל חִישָׁת חום השמש בגבכם כשאתם הולכים לבית הספר. המוח גם יכול להתמחות בהתנהגויות מסוימות מאוד. לדוגמה, אזור בקליפת המוח שנקרא כִּישוֹר אזור הפְּנִים (fusiform face area, FFA) נדמה כמתמחה בעיבוד פנים אנושיים [5]. נסו להקליד ב-EduCortex את המילה "face" (פְּנִים), ותראו היכן האזור הזה ממוקם.

למרות ההתמחות התפקודית, המוח האנושי לא יכול להיות מתואר כאלפי אזורים תפקודיים נפרדים. אזורים שונים במוח תמיד "מדברים" זה עם זה, ויוצרים רשת בקנה מידה גדול [6]. כשתחקרו את EduCortex, תראו שאזור יחידי במוח כמעט אף פעם לא פועל לבד בביצוע תפקוד מסוים. יתרה מזו אזורים מוחיים הם מצוינים בביצוע כמה מטלות במקביל (מולִּטִי-טֶסְקִינִג), ולעיתים קרובות מעורבים בתפקודים רבים שונים!

מסקנות

המוח הוא האיבר המורכב ביותר בגוף האדם. מורכבות זו עשויה להקשות על הלמידה על אודות מבנה המוח, ועל אופן פעולתו. אנו מקווים ש-EduCortex יוכל לסייע! אם אתם תוהים "איזה חלק במוח מְעַבֵּד פְּנִים?", תוכלו להשתמש ב-EduCortex, ולחפש בכלי זה את

המילה "face". תגלו כי הפעילות מתרחשת בעיקר בכינשור אזור הפנים [5], לצד פעילות מופחתת באזורים אחרים במוח. תוכלו גם לבצע את התהליך ההפוך באמצעות לחיצה על אזור במוח כדי לראות את המונחים שמקושרים לאותו אזור. יכולת זו מאפשרת לכם לחקור בחופשיות את האופן שבו המוח מאורגן, כדי להבין התמחות תפקודית. אם ברצונכם ללמוד עוד על השמות המדעיים של מבנים במוח, EduCortex יכול לסייע גם בזה! לסיכום, אנו סבורים כי EduCortex הוא כלי יעיל עבור ילדים ומבוגרים שמבקשים להבין טוב יותר כיצד המוח נראה, וכיצד הוא מתפקד. אנו מקווים שתיהנו להשתמש ב-EduCortex ללמידה על המוח!

מקורות

1. Scotti, P. S., Kulkarni, A., Mazor, M., Klapwijk, E., Yarkoni, T., and Huth, A. G. 2020. EduCortex: browser-based 3D brain visualization of fMRI meta-analysis maps. *J. Open Source Educ.* 3:75. doi: 10.21105/jose.00075
2. Gao, J. S., Huth, A. G., Lescroart, M. D., and Gallant, J. L. 2015. Pycortex: an interactive surface visualizer for fMRI. *Front. Neuroinform.* 9:23. doi: 10.3389/fninf.2015.00023
3. Yarkoni, T., Poldrack, R. A., Nichols, T. E., Van Essen, D. C., and Wager, T. D. 2011. Large-scale automated synthesis of human functional neuroimaging data. *Nat. Methods* 8:665. doi: 10.1038/nmeth.1635
4. Pearson, K. 1901. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Philos. Mag.* 2:559–72. doi: 10.1080/14786440109462720
5. Kanwisher, N., McDermott, J., and Chun, M. M. 1997. The fusiform face area: a module in human extrastriate cortex specialized for face perception. *J. Neurosci.* 17:4302–11. doi: 10.1523/JNEUROSCI.17-11-04302.1997
6. Bellec, P., Perlberg, V., Jbabdi, S., Péligrini-Issac, M., Anton, J. L., Doyon, J., et al. 2006. Identification of large-scale networks in the brain using fMRI. *Neuroimage.* 29:1231–43. doi: 10.1016/j.neuroimage.2005.08.044

פורסם אונליין: 23 במאי 2023

נערך על ידי: Caroline A. Niziolek

מנחות מדעיות: Elisabetta C. del Re and Karen Lander

ציטוט: Scotti PS, Kulkarni AP, Mazor M, Klapwijk E and Huth A (2023) מוח אינטראקטיבי תלת-ממדי מסייע ללמוד כיצד המוח מאורגן. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2021.575131-he

תורגם והותאם מ: Scotti PS, Kulkarni AP, Mazor M, Klapwijk E and Huth A (2021) Interactive 3D Brain Helps You Learn How the Brain Is Organized. *Front. Young Minds* 9:575131. doi: 10.3389/frym.2021.575131

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

© 2021 © **COPYRIGHT** Scotti, Kulkarni, Mazor, Klapwijk and Huth 2023. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחבר(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

CLAUDIO, גיל: 13

אני אוהב לשחק כדורסל ולרכוב על סקייטבורד, ונהנה ממדע ומקריאת ספרים.



ELLIOT, גיל: 11

אֶלְיוֹט בן 11. הוא נהנה ללמוד על מדע ומתעניין בספורט! אוהב לרוץ ולשחק כדורגל, ואוהד של קבוצת מנצ'סטר יונייטד. הוא גם אוהב משחקי מחשב ושיחות עם חבריו. אליוט נהנה לטייל, ומקווה ללמוד עוד על מדע כשילך לחטיבת ביניים.



TOBY, גיל: 12

טוֹבִי בן 12. הוא מתעניין במדע, אך בעיקר אוהב כדורגל ושחייה. הוא משחק כדורגל פעמיים בשבוע ושוחה שש פעמים בשבוע! הוא גם אוהב לצפות בכדורגל, ואוהד נלהב של קבוצת מנצ'סטר יונייטד. טוֹבִי נהנה לטייל ולגלות דברים חדשים.



הכותבים

PAUL S. SCOTTI

פֹּאֵל סְקוֹטִי מגיע מניו-יורק, וכיום הוא סטודנט לפסיכולוגיה קוגניטיבית באוניברסיטה של מדינת אוהיו. הוא אוהב לשחק משחקי קופסה ולהתבונן בתמונות יפות של מוחות. שאיפתו היא שכל המאמרים המדעיים ייכתבו באופן המעורר עניין בקרב ילדים צעירים. *scottibrain@gmail.com



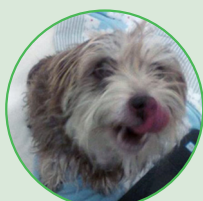
ARMAN P. KULKARNI

אַרְמָן קוּלְקַרְנִי הוא מאירווין, קליפורניה, וכיום הוא דוקטורנט להנדסה ביו-רפואית באוניברסיטת ויסקונסין, מדיסון. הוא נהנה ממשחקים, מאומנות וממרבית הדברים שקשורים למיסתורין. אַרְמָן מאמין שהוראה צריכה להיות מבוססת על הסברים פשוטים וְלְשֵׁלֵב שימוש בעזרים חזותיים ובהנפשה (אנימציות). *apkulkarni2@wisc.edu



MATAN MAZOR

מתן מזור הוא דוקטורנט במכון לנוירולוגיה, בקולג' האוניברסיטאי לונדון. יש לו תשוקה לפילוסופיה של המדע ושל הנפש, והוא מתעניין בהיבטים אתיים של מדע יישומי, כמו למשל אתיקה של ניסויים בבעלי



חיים עבור חקר הנפש, או חשיבותו של שיתוף נתונים בתהליך המדעי. הוא גם נהנה לצייר, ולאכול גלידה ללא מוצרי חלב (שוקולד < פיסטוק < אגוזי לוז).



EDUARD KLAPWIJK

אדוארד קלאפּוויק גר ועובד בליידן, הולנד. הוא פסיכולוג וחוקר התפתחות מוחית בילדים ובמתבגרים. יש לו שני ילדים צעירים, והוא מקווה שכשיגדלו, יהנו לקרוא מאמרים של פרונטירז-מדע לצעירים. פרט לעריכת מחקר ובילוי זמן עם משפחתו, אדוארד אוהב לרכוב על אופניו, לבשל ולקרוא ספרים.



ALEXANDER HUTH

אני עוזר פרופסור למדעי המוח ולמדעי המחשב באוניברסיטת טקסס באוסטין. המחקר שלי משתמש בשיטות חישוביות שמטרתן למדל את האופן שבו המוח מעבד שפה ומייצג משמעות.

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