

## ממשקי מוח-מכונה: המוח שלכם בפעולה

Jose M. Carmena<sup>1</sup>, José del R. Millán<sup>2</sup>

<sup>1</sup>המחלקה להנדסת חשמל ומדעי המחשב, אוניברסיטת קליפורניה, קליפורניה, ארצות הברית  
<sup>2</sup>המרכז לנוירו-פרוסטטיקה, המכון הפדרלי לטכנולוגיה בלזון, לוזן, שווייץ

### סוקרת צעירה

BHARGAVI

גיל: 13

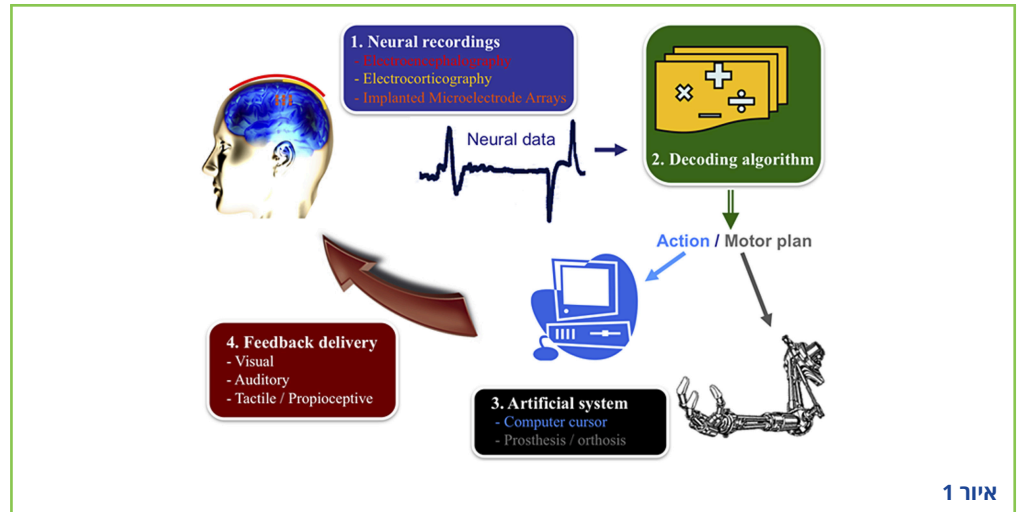


ממשקי מוח-מכונה (Brain-Machine, Interfaces או בקיצור – BMIs), או ממשקי מוח-מחשב, מהווים תחום מחקר מולטי-דיסציפלינרי, המשלב בתוכו כמה תחומי מדע שונים, אשר גדל מאוד בעשור האחרון. על קצה המזלג, BMI עוסק בהמרת מחשבה לפעולה והמרת תחושה לתפיסה. במערכת BMI אותות של תאי עצב נרשמים מהמוח ומוזנים לאלגוריתם פענוח (קוד ממוחשב שמבצע ברצף סדרת פעולות מוגדרת מראש), אשר מתרגם את האותות האלה לפלט תנועתי (מוטורי). למשל, שליטה ישירות מהמוח בעכבר המחשב, נהיגה בכיסא גלגלים או הנעת זרוע רובוטית. לרוב, לולאת בקרה סגורה מתבצעת על-ידי מתן משוב ראייתי של המכשיר המופעל ישירות מהמוח (כמו הזרוע הרובוטית) לאדם שמפעיל אותו. למכשירי BMI יש פוטנציאל עצום בשיפור משמעותי של איכות החיים של מיליוני אנשים אשר סובלים למשל משיתוק כתוצאה מפגיעות בעמוד השדרה, שבץ, טרשת אמיוטרופית צידית (מחלה ניוונית שבה מתים תאי עצב שקשורים לתפקודים תנועתיים) ומצבים אחרים של מגבלות גופניות קשות. [1]

היבט חשוב של BMI הוא היכולת להבחין בין דפוסים שונים של פעילות מוחית, שכל אחת מהן משויכת לכוונה או למטלה מנטלית מסוימת (לדוגמה, פעילות מוחית המייצגת הזזת יד ימינה ופעילות מוחית המייצגת הזזת יד שמאלה). לכן, יכולת הסתגלות היא מרכיב חשוב של

## איור 1

המוח שלכם בפעולה. המרכיבים השונים של ממשקי מוח-מכונה (BMI) כוללים את המערכת הרושמת, (1) את אלגוריתם הפענוח של האותות מהמוח, (2) את המכשיר שבו רוצים לשלוט (3) ואת המשוב שניתן למשתמש כגון משוב ראייתי או שמיעתי (4). ראו פירוט בהפניה השנייה [2].



BMI מאחר שמצד אחד המשתמשים צריכים ללמוד לשלוט על הפעילות העצבית שלהם כדי לייצר תבניות מוחיות ניתנות להבחנה (למשל שמאלה לעומת ימינה), ומהצד האחר שיטות של למידה חישובית צריכות לזהות את התבניות המוחיות הפרטניות שמאפיינות את המטלות המנטליות שהמשתמש מבצע. באופן מהותי, מערכת ה-BMI היא מערכת של שני לומדים – האדם והמכונה.

ממשקי מוח-מכונה קיימים גם בצורות חודרניות וגם בצורות בלתי חודרניות. שיטות חודרניות דורשות ניתוח מוח כדי למקם אלקטרודות ישירות על פני משטח המוח או עמוק בתוך המוח. דוגמאות למיקום ישיר (חודרני) של אלקטרודות בתוך המוח כוללות: (1) מכשירי BMI שמשתמשים במערך רב-אלקטרודות תוך-קורטיקלי (כלומר מערך שמוחדר לתוך קליפת המוח, שהיא השכבה החיצונית של המוח הקרובה לגולגולת). (2) שיטה אחרת קרויה אלקטרוקורטיקוגרפיה (ECoG – Electrocorticography). בשיטה זו הפעילות החשמלית מהמוח נרשמת באמצעות אלקטרודות שממוקמות על פני משטח המוח, מתחת לגולגולת. שיטות בלתי חודרניות כוללות רישומים ברשת מוח חשמלית – EEG (Electroencephalography) מהקרקפת, כלומר מחוץ לגולגולת. (ראו איור 1).

שיטות EEG ו-ECoG מודדות תנודות במתח החשמלי שנובעות מזרמים שזורמים בתוך תאי העצב במוח. במחיר של היותם חודרניים, לאותות של ECoG יש רזולוציה מרחבית טובה יותר (בסקאלה של מילימטרים!) ותכונות אות-לרעש טובות יותר מאשר לאותות EEG, כלומר האות שמקבלים הוא ברור יותר. מערכים רב-אלקטרודיים תוך-קורטיקליים הם החודרניים ביותר בין שלוש השיטות שהוזכרו למעלה.

חוקרים שעובדים עם אותות EEG פיתחו עבור אנשים עם מוגבלויות פיזיות חמורות את האפשרות לשלוט בצורה מנטלית על מגוון מכשירים, החל ממקלדות מחשב וכלה בכיסאות גלגלים (ראו איור 2). כמה אנשים עם מוגבלויות חמורות משתמשים כיום באופן יומיומי במכשירי BMI מבוססי EEG עבור מטרות תקשורת. חלק מהמגבלות העיקריות בשימוש באותות EEG הן שהן דורשות שימוש נרחב בשיטות של למידה חישובית, כמו גם צורך לשלב מערכות ממשק מוח-מחשב (BCI – Brain-Computer Interface) מורכבות לתקשורת חכמה בין האדם למכונה. מחקרים שהשתמשו באותות ECoG סיפקו הוכחות מבטיחות לרעיון של שליטה על

## איור 2

כיסא נגלים שנשלט על-ידי המוח. משתמשים יכולים להסיע את כיסאות הנגלים האלה באופן אמין ובטוח במשך תקופות זמן ארוכות הודות לשימוש בשיטות של שליטה משותפת או מחשוב ער לסביבה. כיסא הנגלים הזה מדגים את עתיד אינטליגנציית הניויר-תותבות (נקרא גם ניויר-פרוטזות), שבדומה לעמוד השדרה שלנו ולמערכת השלד והשרירים, יפעלו באמצעות פקודות תנועתיות שמתקבלות מקליפת המוח של המשתמש ומפוענחות בזו אחר זו. הדבר פוטר את המשתמשים מהצורך להעביר כל הזמן את כל הפרמטרים של השליטה מהרמות הנמוכות, כלומר משליטה על כל פרט בתנועה, ומקטין בכך את העומס הקוגניטיבי שנדרש מהם [3]. צפו בווידיאו.



איור 2

תנועה רובוטית ישירות מהמוח כפתרון למגבלות תנועתיות ולבנייה מחודשת של דיבור דרך קליפת המוח השמיעתית של האדם – צעד משמעותי לאפשר לאנשים לחזור ולדבר שוב על-ידי פענוח של דיבור מדומיין (כלומר דיבור שמתבצע במחשבתם).

התפתחויות אחרונות במחקר של רישום תוך-קורטיקלי (כלומר, שימוש במערכי אלקטרודות כדי לרשום את הפעילות של תאי עצב בודדים) סיפקו "הוכחת היתכנות", והראו שבאופן תאורטי בניית מערכות BMI שיתפקדו בעולם האמיתי היא אפשרית. למעשה, העשור האחרון פרח עם הרבה הדגמות מרשימות של שליטה עצבית על מכשירים תותבים אשר בוצעה על-ידי מכרסמים, קופים ואנשים שהשתתפו בשלב הראשון של ניסיונות קליניים. ההתקדמות הזו תואץ מאוד במהלך 5-10 השנים הבאות, והיא צפויה להוביל לקבוצה מגוונת של פתרונות קליניים יישומיים עבור בעיות עצביות שונות.

גישות אלה מספקות יתרונות משלימים, ושילוב של טכנולוגיות עשוי להיות הכרחי להשגת המטרה הסופית של שחזור תפקוד תנועתי עם מכשיר BMI ברמה שתאפשר למטופל לבצע מטלות יומיומיות ללא כל מאמץ [4]. יתרה מזו, נצטרך לשלב כלי BMI יישומיים עם שיטות חדשות לתקשורת חכמה, כדי לסייע בשימוש של מערכת ה-BMI למשך תקופות זמן ארוכות ולהפחית את העומס הקוגניטיבי על המשתמש [5]. אם כן, הכיוון של BMI השתנה מהשאלה של "האם מערכת כזו תוכל אי פעם להיבנות?" אל השאלה "איך אנו בונים מערכות BMI שהן אמיןות, מדויקות, חסינות ויישומיות מביחינה קלינית?"

שאלה זו תדרוש התייחסות לאתגרים העיקריים האלה: האתגר הראשון הוא לתכנן ממשקים פיזיים שיכולים לפעול באופן קבוע ולהחזיק במשך תקופת חיים שלמה. לשם כך נדרשת חומרה חדשה שמתפרשת מאלקטרודות EEG יבשות הצמודות באופן קבוע לגולגולת; ממשקים עצביים שמתאימים לתנאים הביולוגיים במוח

וניתנים להשתלה במלואם, כולל ECoG. מרכיב יסודי בכל אלה הוא תשדורת אלחוטית מהאלקטרודות למכשיר שיקלוט ויעבד את האותות ותצרוכת חשמל נמוכה מאוד (סוללה יעילה). חשוב לציין שחומרה זו דורשת פתרונות תוכנה חדשים. שימוש רצוף ב-BMI גורם, מעצם הגדרתו, לשינויים במעגלים החשמליים במוח כתוצאה מלמידה. זה מוביל לשינויים בתבניות של האותות העצביים אשר מקודדים את כוונותיו של המשתמש. ה-BMI, ובפרט אלגוריתם הפענוח של האותות המוחיים המשתנים תוך כדי הלמידה, יצטרך להמשיך להתפתח גם אחרי הטמעתם הראשונית. שיטות של למידה חישובית, שהן דרכים מתמטיות מתקדמות לפענח אותות מהמוח, יצטרך לאתר את השינויים האלה באופן שקוף בעוד המשתמש מפעיל את המכשיר הנשלט על-ידי המוח. הסתגלות הדדית זו בין המשתמש לבין מכשיר ה-BMI היא לגמרי לא פשוטה.

האתגר השני הוא לפענח ולשלב במערכת את המידע על מצבו הקוגניטיבי של המשתמש, שהוא הכרחי עבור תקשורת רצונית (מכוונת). זה יכול לכלול מודעות לטעויות שנעשו על-ידי המכשיר, צפייה מראש של נקודות החלטה חשובות, רגעים של חוסר תשומת לב ותשישות. זה יהיה קריטי עבור הפחתת עומס העבודה הקוגניטיבי על המשתמש, ויקל על פעולה ארוכת-טווח של המכשיר. מידע קוגניטיבי חייב להיות משולב עם זיהוי היבטים מגוונים של התנהגות תנועתית רצונית, מתנועות רציפות ועד לכוונות נקודתיות (לדוגמה, סוגים שונים של אחיזות; התחלת ביצוען של תנועות וכדומה), כדי להשיג הפעלה טבעית וחסרת מאמץ של מכשירים תותביים.

האתגר העיקרי השלישי הוא לספק למשתמש משוב תחושתי מתאים, שיעביר אליו מידע "מלאכותי", אשר ידמה את התחושה שהמשתמש היה מרגיש באמצעות הגוף שלו, כמו מגע או המודעות למיקום ולתנועה של המכשיר התותב. אחרי הכול, כשאנו נוגעים בעצם כלשהו באמצעות היד (למשל בכוס) אנו מקבלים מידע חושי על החומר שממנו הוא עשוי (אם הכוס היא מזכוכית או מפלסטיק; חלקה או מחוספסת) וכדומה. לסוג הזה של מידע חושי שיתקבל באמצעות המכשיר (כגון זרוע מלאכותית) יש פוטנציאל לשפר בצורה משמעותית את השליטה על המכשיר התותב, בכך שלמשתמש מתאפשר לחוש את הסביבה במקרים שבהם המידע החושי הטבעי שלו אינו מתפקד בצורה תקינה. זאת באמצעות חושים אחרים (למשל, מערכת הראייה יכולה להחליף את המגע כדי לזהות אם הכוס היא מזכוכית או מפלסטיק), או על-ידי גירוי של הגוף (למשל היד) במטרה לשחזר את התחושה שאבדה. מאמצים עכשוויים מתמקדים בעיקר בגירויים חשמליים נרחבים של נוירונים באזורי חישה במוח (כדי להחזיר את תחושת המגע או הראייה שהפסיקו לתפקד). גישות אופטוגנטיות (כלומר כיבוי והדלקה של תאי עצב באמצעות אור) יאפשרו בעתיד גירוי ממוקד יותר של תאי העצב הרצויים. ישנן אפשרויות אחרות כמו גירוי חשמלי של עצבים היקפיים (למשל סיבי העצב הנמצאים לאורך היד ומגיעים לאצבעות) וגירוי של תחושת מגע דרך תנודות באזורי גוף שבהם למטופלים נותרה יכולת חישה של גירויים.

לבסוף, טכנולוגיית BMI היא בעלת פוטנציאל גדול ככלי למחקר במדעי המוח מאחר שהיא מאפשרת לחוקרים שליטה ישירה בקשר הסיבתי שבין פעילות מוחית, קלט חושי ופלט התנהגותי [6]. לכן, טכנולוגיה זו תוכל לספק תובנות חדשות על המנגנונים השונים הפועלים במוח באשר למנגנונים העומדים בבסיס פעולה ותפיסה.



## מקורות

1. Nicolelis, M. A. 2001. Actions from thoughts. *Nature* 409:403–7. doi: 10.1038/35053191
2. Héliot, R., and Carmena, J. M. 2010. Brain-machine interfaces. In *Encyclopedia of Behavioral Neuroscience*, eds. G. F. Koob, M. Le Moal, and R. F. Thompson, 221–5. Oxford: Academic Press.
3. Carlson, T. E., and Millán, J. d. R. 2013. Brain-controlled wheelchairs: a robotic architecture. *IEEE Robot. Automat. Mag.* 20:65–73. doi: 10.1109/MRA.2012.2229936
4. Millán, J. d. R., and Carmena, J. M. 2010. Invasive or noninvasive: understanding brain-machine interface technology. *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.* 29:16–22. doi: 10.1109/MEMB.2009.935475
5. Millán, J. d. R., Rupp, R., Müller-Putz, G. R., Murray-Smith, R., Giugliemma, C., Tangermann, M. et al. 2010. Combining brain-computer interfaces and assistive technologies: state-of-the-art and challenges. *Front. Neurosci.* 4:161. doi: 10.3389/fnins.2010.00161
6. Carmena, J. M. 2013. Advances in neuroprosthetic learning and control. *PLoS Biol.* 11:e1001561. doi: 10.1371/journal.pbio.1001561

פורסם אונליין: 11 בינואר 2019

נערך על ידי: Robert T. Knight, University of California, Berkeley, USA

**ציטוט:** Carmena JM and Millán JdR (2019) ממשקי מוח-מכונה: המוח שלכם בפעולה. doi: 10.3389/frym.2013.00007-he *Front. Young Minds*.

### תורגם והותאם:

Carmena JM and Millán JdR (2013) Brain-machine interfaces: your brain in action. *Front. Young Minds.* 1:7. doi: 10.3389/frym.2013.00007

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

**COPYRIGHT** © Carmena and Millán 2013. 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.

## סוקרת צעירה

**BHARGAVI, גיל: 13**

אני אוהבת לקרוא ולהקשיב למוזיקה, ויש לי תשוקה רבה ל-Bharatanatyam – ריקוד הודי קלאסי עתיק. מגיל צעיר השאיפה שלי היא להיות מנתחת מוח, ומכאן התעניינותי במדעי המוח ובמוח עצמו. יש לי גם



שאיפה סודית (או אולי כבר לא כל כך סודית בעצם) להיות מנחה בטלוויזיה. באופן עקרוני, אני רוצה להשאיר חותם משמעותי בעולם.

## הכותבים

### JOSE M. CARMENA

פרופסור משנה בהנדסת חשמל ובמדעי המוח באוניברסיטת קליפורניה, ברקלי, ומנהל שותף של המרכז להנדסה עצבית ופרותזה באוניברסיטת ברקלי ובאוניברסיטת סן פרנסיסקו. הוא מתעניין בדרך שבה המוח שולט בתנועה, ובעיצוב של מערכות ניוו-פרותטיות (כלומר מערכות של איברים תותבים שאפשר לשלוט בהן באמצעות המוח) עבור אנשים שסובלים משיתוק או מבעיות עצביות אחרות.

### JOSÉ DEL R. MILLÁN

פרופסור במרכז לניויר-פרוסטיקה במכון הפדראלי לטכנולוגיה בלזון (EPFL). הוא קיבל את הדוקטורט שלו במדעי המחשב מהאוניברסיטה הטכנית של קטלוגיה בברצלונה, ועבד באיטליה, בארצות הברית ובשווייץ. קיבל כמה פרסים בנין עבודתו על ממשקי מוח-מכונה ורובוטים שנשלטים מהמוח.



Hebrew version  
provided by

מזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים (ער.)  
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس  
Bloomfield Science Museum Jerusalem

