



הבנה של מחשבות במוח האדם ופענוחן

Stephanie Martin^{1,2*}, Christian Mikutta^{2,3}, Robert T. Knight^{2,4}, Brian N. Pasley²

¹המרכז לניורופרוסתטיקה (Neuroprosthetics), המכון הפדרלי לטכנולוגיה בלזון, לוזן, שוויץ

²מכון Helen Wills לחקר המוח, אוניברסיטת קליפורניה, ברקלי, קליפורניה, ארצות הברית

³אוניברסיטת ברן לשירותים פסיכיאטריים, בית חולים אוניברסיטאי לפסיכיאטריה, מחלקת מחקר ותמיכה קליניים, מרכז רב-תחומי לחקר ביו-רפואה יישומית, אוניברסיטת ברן

⁴המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת קליפורניה, ברקלי, קליפורניה, ארצות הברית

סוקרים צעירים

BHARGAVI

גיל: 14

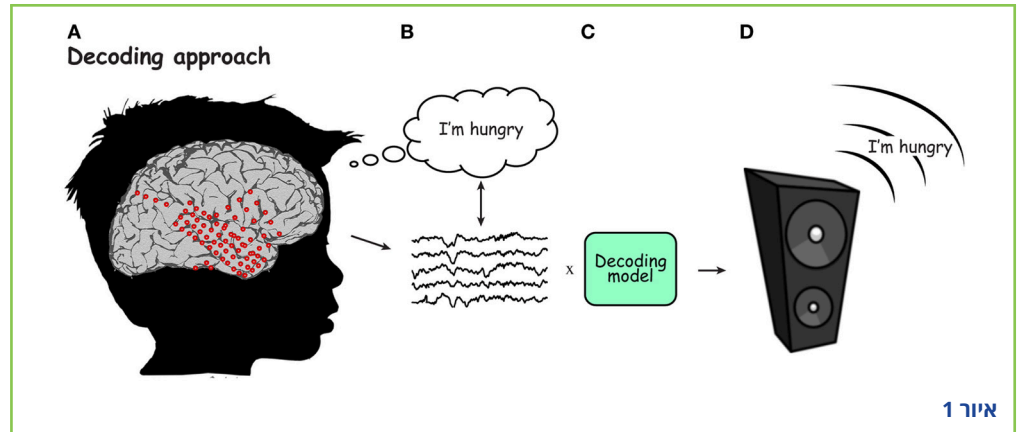


אנשים רבים אינם יכולים לתקשר בגלל בעיות פיזיות, כמו למשל שיתוק. מטופלים כאלה אינם מסוגלים לדבר עם חבריהם, אבל המוחות שלהם עדיין עובדים בצורה תקינה. הם יכולים לחשוב בעצמם, והיו יכולים להפיק תועלת ממכשיר שקורא את מוחם ומתרגם את מחשבותיהם לכדי דיבור שאפשר לשמוע. במחקר שלנו, מיקמנו אלקטרודות מתחת לגולגולת של המטופלים, ישירות על שטח הפנים של המוח, ומדדנו את פעילות המוח בזמן שהמטופלים חשבו. אחרי כן ניסינו לפענח את המילים שהם דמיינו, לתרגמן ולהפוך אותן לצלילים. הראינו שאנו יכולים לפענח חלק מהצלילים מבין אלה שהמטופלים חשבו עליהם. זה היה הניסיון הראשון שלנו לתרגם מחשבות לדיבור, ואנו מקווים להשתפר בעתיד, מאחר שהרבה מטופלים שאינם יכולים לדבר אבל כן יכולים לחשוב באופן תקין עשויים להפיק תועלת מ'מפענח דיבור'.

אנשים רבים סובלים משיתוק חמור, שזו בעיה בהזזת הידיים והרגליים שלהם, וחלק מהם אינם יכולים לתקשר את מה שהם רוצים לומר למרות שהם מודעים לחלוטין ובעלי יכולת לחשוב במוחם על המילים. האנשים האלה הם אסירים בתוך הגוף שלהם. המוח שלהם מתפקד

איור 1

שיטת פענוח. **A.** הפעילות החשמלית של המוח נרשמת תוך שימוש באלקטרודות (עיגולים אדומים) שמונחות ישירות על פני השטח של המוח, מתחת לגולגולת. **B.** מחשבות ממופות לפעילות של המוח (כלומר, מקשרים בין המחשבה לבין הפעילות שהמוח מבצע בזמן שחושבים אותה). **C.** משתמשים בכלים מתמטיים כדי לפענח את הפעילות החשמלית של המוח ולתרגם אותה לכדי דיבור שאפשר להבין. **D.** הדיבור המפוענח משודר בקול רם.



איור 1

באופן מלא והם יכולים לחשוב בצורה רגילה, אבל הגוף שלהם אינו מגיב. המטופלים האלה היו נהנים ממכשיר שהיה יכול לקרוא את המוח שלהם, לתרגם את הפעילות המוחית שלהם ולהשמיע בקול רם את המילים שאין ביכולתם לומר. במחקר הזה ניסינו לפענח מה אנשים חשבו, כצעד ראשון לקראת בנייה של מכשיר קורא-מוחות שיכול "לדבר" את המילים שאנשים רוצים לבטא. מגניב, נכון?

אבל... בניית מכשיר כזה היא מאתגרת מאוד עבור מדענים, מאחר שיש צורך לפתור תחילה כמה אלמנטים מורכבים. ראשית, אנו צריכים להקליט את הפעילות המוחית של אנשים תוך שימוש בטכנולוגיות המתקדמות ביותר שזמינות עבורנו (איור 1A). שנית, אנו גם צריכים להבין איך דיבור מאוחסן במוח ומעובד בו (איור 1B). כדי להבין איך עובד הדיבור במוח אנו צריכים כלים מתמטיים (איור 1C) שיתרגמו את פעילות המוח לפעילות החשמלית, לדיבור, שיהיה מובן ושכולם יכולים לשמוע (איור 1D).

הגישה שלנו היא קצת כמו תרגום של שפה זרה לשפת האם. לדוגמה, אם אינכם מדברים צרפתית, אבל אתם רוצים להבין מה שחבר שלכם אומר בצרפתית, מה אתם צריכים? אתם צריכים מתרגם. לאחר שנים רבות של מחקר של שתי השפות האלה, אנו יודעים איך לקשר אותן אחת לשנייה. בעזרתם של חוקי דקדוק, מתרגם יכול למפות מילים בצרפתית למילים באנגלית, מה שבסופו של דבר מאפשר לכם להבין את מה שהחבר שלכם אומר. במחקר שלנו, אנו רוצים לתרגם את הפעילות החשמלית שהמוח מייצר בזמן מחשבה, לצילי דיבור שאפשר לשמוע ולהבין.

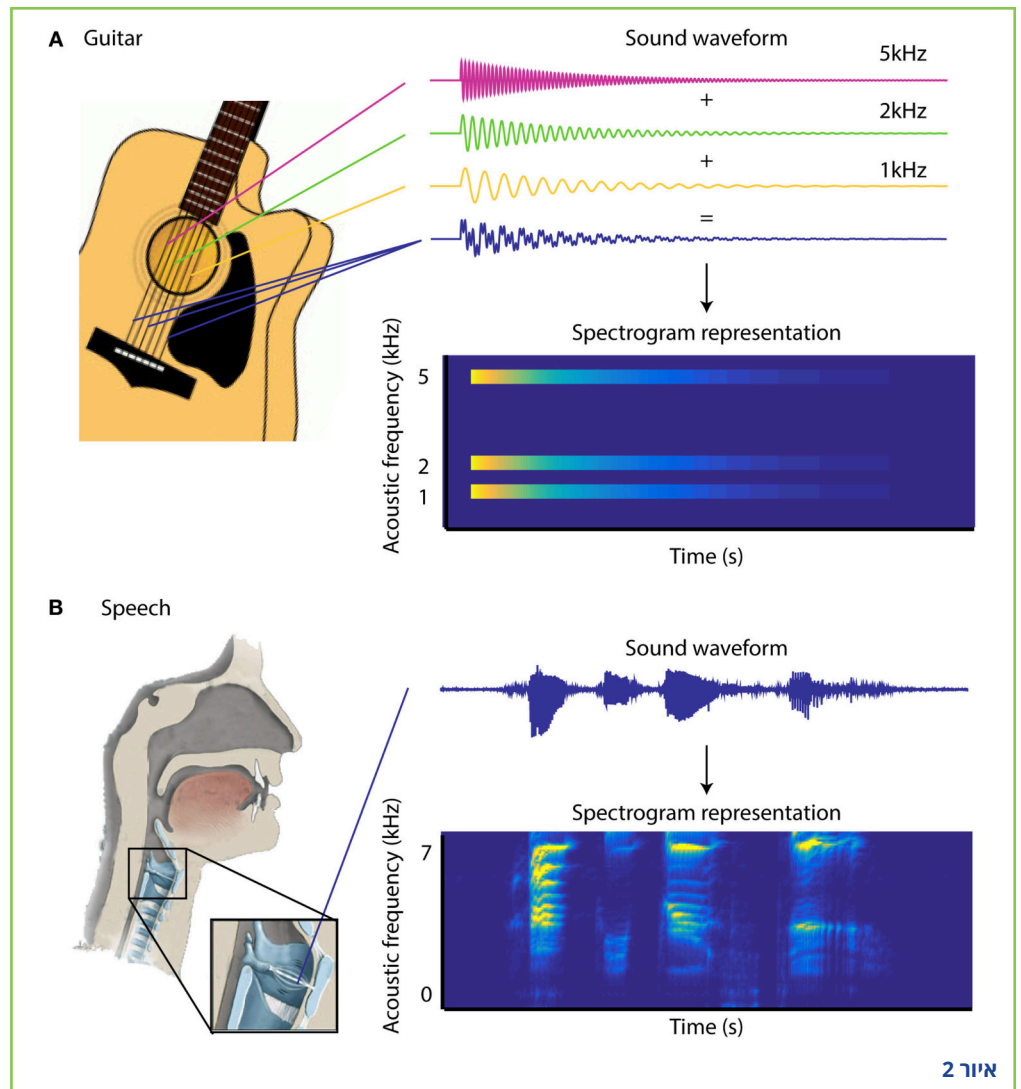
מהם בדיוק צילי דיבור?

בחיי היומיום, אנו מחליפים בינינו מחשבות ורעיונות באמצעות שפה ותקשורת. במהלך השיחות האלה אנו מקשיבים לאנשים, אנו חושבים על הנושא המדובר ואנו מייצרים דיבור כדי לענות ולתקשר איתם. התהליך הזה מורכב מאוד, וחוקרים עבדו שנים רבות כדי להבין איך שפה מקודדת במוח [1].

כשאנו מדברים בקול רם אנו מפיקים צלילים. צליל הוא גל, וגלי קול יכולים להיות מיוצרים על-ידי הרבה מקורות, כמו למשל נביחה של כלב, נפילה של עץ, רעם בסופה או דיבור של

איור 2

A. פירוק של צלילים לתדרים דוגמאות לגלי קול שונים שמופקים כאשר פורטים על מיתרי גיטרה שונים, כמו גם כשכמה מיתרים שונים נפרטים באותו הזמן. לוח תחתון: ייצוג ספקטוגרמה של גל הקול הכחול. **B.** דוגמה לגל קול של דיבור וייצוג הספקטוגרמה שלו.



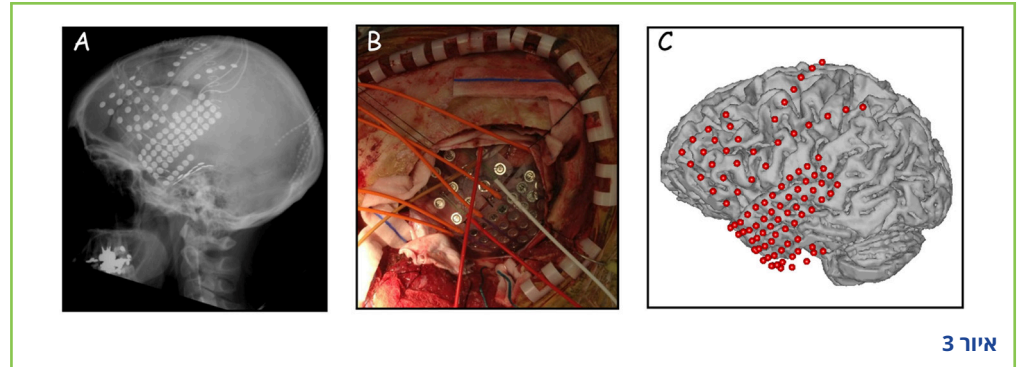
איור 2

בן אדם. גל קול מתפשט באוויר, ואתם שומעים אותו כשהוא מגיע לאוזניכם ומרטיט את עור התוף. לדוגמה, כשפורטים על גיטרה, גל קול מיוצר ומתפשט באוויר. העובדה שאנו קולטים צלילים בטונים שונים נובעת מכך שלגלי קול יש תדרים שונים (איור 2). כשפורטים על מיתר "לה" של הגיטרה, מיוצר צליל בטון נמוך. זה קורה בגלל שהמיתר מתנווד בתדר נמוך. לעומת זאת, כשפורטים על המיתר "רה" של הגיטרה, מקבלים צליל בטון גבוה. כשפורטים על שלושה מיתרים באותו הזמן, הצליל שמתקבל הוא סכום של כל שלושת גלי הקול הבודדים. הפקת דיבור היא דומה. כשמישהו מדבר בקול רם שומעים צליל מסוים. אבל, הצליל הזה מורכב מכמה תדרים שמשתנים בזמן. בִּפְרָט, נְבֵר שֶׁמְדַבֵּר בְּקוֹל נִמְוֹךְ מֵיִצֵר גְּלִי קוֹל שֶׁמּוֹרְכָבִים מֵתְדָרִים נִמּוּכִים, בְּעוֹד שֶׁאִישֵׁה הַמְדַבֵּר בְּקוֹל גְּבוּהָ מֵיִצֵר גְּלִי קוֹל שֶׁמּוֹרְכָבִים מֵתְדָרִים גְּבוּהִים יוֹתֵר. לְכָל אֶחָד מֵאֵיתָנוּ יֵשׁ 'תִּיבַת קוֹל' שׁוֹנָה, שֶׁהִיא בְּעֵלֵת תְּכוֹנֹת מְכִנּוּת מְסוּיְמוֹת וּמֵיִצֵרַת דִּיבּוּר בְּטוֹנִים שׁוֹנִים.

חשיבה היא הפעולה של שימוש במוח לצורך הפקה של רעיונות, קבלת החלטות, שחזור זיכרונות ויצירת תקשורת עם אחרים. כולנו חושבים במהלך היום, ויש לנו את הקול הקטן הזה בתוך הראש שלנו שמנחה אותנו. כשאנו חושבים, אנו יכולים לשמוע מילים בראשנו; אנו יכולים

איור 3

מיקום של אלקטרודות במוח
A. צילום רנטגן של מיקום
 האלקטרודות. **B.** מיקום
 כירורגי (בעת ניתוח) של
 אלקטרודות על פני המוח. **C.**
 מיקום האלקטרודות על פני
 מודל תלת-ממדי על המוח.



איור 3

לקלוט טונים שונים, קולות שונים וצלילים שונים בתוך הראש שלנו, בלי לשמוע את הצלילים מבחוץ. עובדה זו מציעה שיש לנו ייצוגים פנימיים של דיבור שהם דומים מאוד למצב שבו אנו מדברים בקול רם. כדי להבין איך צלילי הדיבור האלה מופקים (בקול רם או בתוך הראש שלנו), אנו צריכים להסתכל על הפעילות המוחית שמלווה אותם.

רישום פעילות המוח

כדי לבצע את המחקר הראשון רשמנו את הפעילות החשמלית במוחות של אנשים על-ידי מיקום אלקטרודות מתחת לגולגולות שלהם, ישירות על פני השטח של המוח (איור 3). הטכניקה הזו נקראת **אלקטרוקורטיקוגרפיה**, והיא מסוכנת מאחר שהיא דורשת ניתוח. זאת הסיבה שבגללה אנו משתמשים בשיטה זו רק על מטופלים שצריכים לעבור ניתוח מוחי. אבל, מיהם חולים אלה בדיוק? ברוב המקרים, אלה חולי אפילפסיה. אתם אולי מכירים מישהו במשפחה שלכם או בבית הספר שסובל מאפילפסיה, ושיש לו מדי פעם רעידות אלימות ובלתי נשלטות בגוף, שהן תוצאה של כיווצים והרפיות חוזרים ונשנים של השרירים, אשר מְכַנֵּוֹת בשם "התקף". התקפים (שלפעמים נקראים גם פְּרִכּוּסִים) מתרחשים כאשר מתקיימת במוח פעילות חשמלית בלתי שגרתית. בחלק מהמקרים תרופות אינן עובדות ואינן משתלטות על ההתקפים. במקרים כאלה הדרך היחידה לטפל בהתקף היא למצוא את החלק במוח שאינו מתפקד כראוי ויוצר את ההתקפים, ולהסיר אותו. כדי לאתר בדיוק איזה חלק במוח גורם להתקפים, מנתחי מוח משתילים את האלקטרודות האלה במוח למשך שבוע או שבועיים. אנו מנצלים את משך הזמן הזה לבצע את הניסויים שלנו עם המטופלים (אם הם מסכימים, כמובן), כדי לחקור איך המוח עובד כשאנו אומרים מילים בראשנו.

ובכן, האם אנו יודעים איך המוח עובד כשאנו אומרים מילים בקול רם או בראשנו?

איך עובד הדיבור במוח?

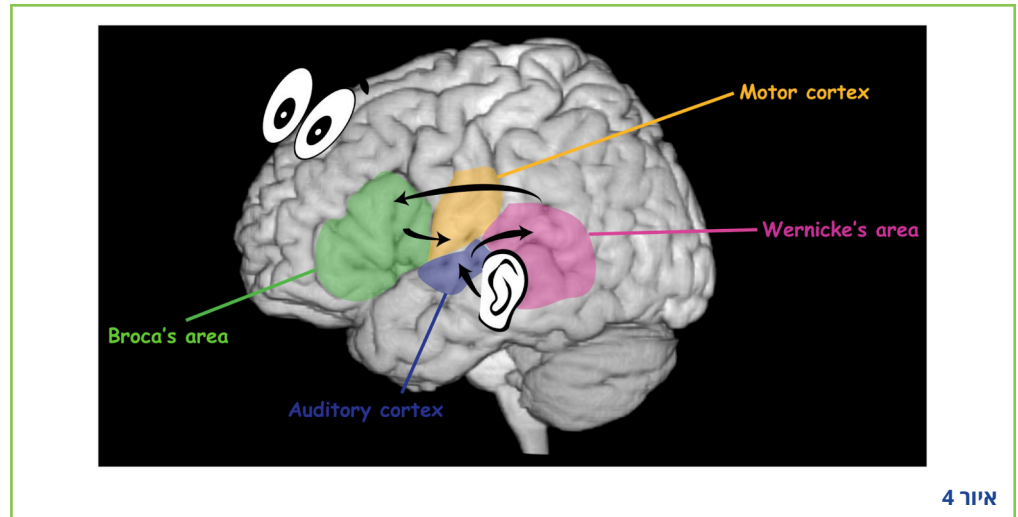
כמה חלקים במוח מעורבים בשמיעה, הבנה ויצירה של דיבור. כל אחד מהאזורים האלה מְתַקְשֵׁר עם האחרים דרך רשת של תאי עצב (נוירונים) מחוברים, שהם תאי המוח שלנו. תאי העצב האלה מייצרים פעילות חשמלית, והם מחוברים אחד לשני ומייצרים רשת שדרכה הם יכולים "לדבר" זה עם זה. ראשית, מערכת השמיעה מעבדת את צלילי הדיבור בחלק המוח שנמצא באזור הרקות, אותו אפשר לראות באיור 4 בצבע כחול. לאחר מכן, אזור

אלקטרוקורטיקוגרפיה (Electrocortigraphy)

סוג של ניטור (או מעקב אחר) פעילות מוחית אשר משתמש באלקטרודות שממוקמות ישירות על המשטח החשוף של המוח.

איור 4

ארגון הדיבור במוח. קליפת המוח השמיעתית מעורבת בשמיעת הצלילים. אזור ורניקה מעורב בהבנת צלילי הדיבור, בעוד שאזור ברוקה מעורב בתכנון תגובת הדיבור. לבסוף, קליפת המוח המוטורית אחראית על תיאום בין השרירים שאחראיים על יצירת המילים.



איור 4

ורניקה (Wernicke, ורוד) אחראי על הבנת צלילי הדיבור. לבסוף, אזור ברוקה (Broca, ירוק) מעורב בתכנון תגובת הדיבור והעברת המידע לקליפת המוח המוטורית (צהוב), שהיא החלק במוח ששולט על תנועה. קליפת המוח המוטורית מתאמת בין השרירים הקטנים בגרון, בפה ובשפתיים, אשר מייצרים את הדיבור שאנו שומעים (נקראים גם **איברי הדיבור**).

איברי דיבור (Articulators)

שרירים קטנים בגרון, בפה ובשפתיים אשר מייצרים צלילים.

כשאנו חושבים, אזורי השפה במוח שלנו פעילים. דיבור בקול רם או דיבור בתוך הראש שלנו כוללים חפיפה של מנגנונים ואזורים שונים במוח. בפרט, קליפת המוח השמיעתית, אזור ורניקה ואזור ברוקה פעילים גם בזמן דיבור בקול רם וגם בזמן דיבור בתוך הראש. מה שקורה במוח אינו בדיוק זהה בשני המקרים, ואחד ההבדלים העיקריים הוא שקליפת המוח המוטורית פעילה הרבה יותר כשמדברים בקול רם מאשר כשמדברים בתוך הראש. זה דבר טוב, אחרת הייתם עלולים להגייד בקול רם דברים שלא הייתם רוצים להגייד למישהו, כמו למשל "התספורת שלך מוזרה!".

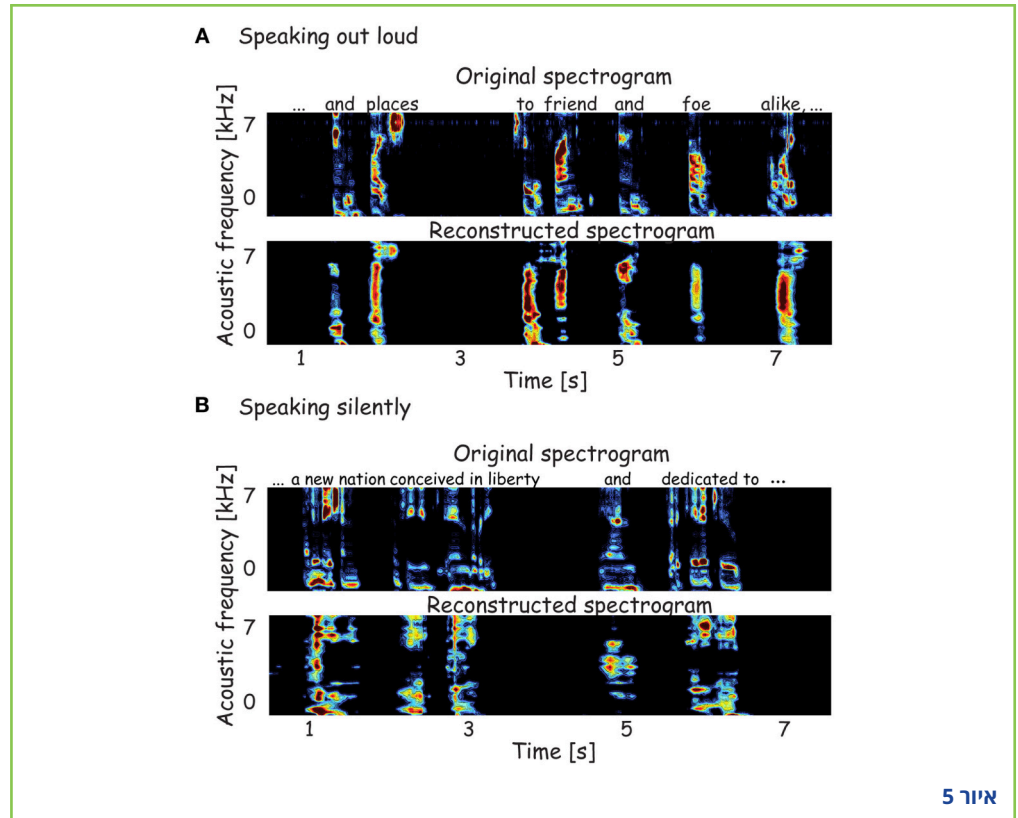
לדוגמה, אם אתם אומרים את המילה "בייסבול", זה יוצר תבנית מוגדרת וניתנת לזיהוי של פעילות מוחית, כמו חתימה על דף נייר. בכל פעם שאתם אומרים את אותה המילה, זה יוצר את אותה התבנית של פעילות מוחית. מצד אחר אם אתם אומרים את המילה "סוס" זה יוצר תבנית שונה של פעילות מוחית. באופן דומה, כשאתם חושבים על המילה "בייסבול", נוצרת בתגובה פעילות מוחית דומה לזו שנוצרת כשאתם אומרים את המילה הזו בקול רם. ברגע שאנו לומדים איך נראית תבנית הפעילות המוחית עבור מילים מסוימות, אנו יכולים לצפות איזו מילה נאמרה על-ידי התבוננות בתבנית שהתקבלה. במילים אחרות, אנו יכולים לפענח את הפעילות המוחית ולבנות ממנה חלקים מצלילי הדיבור.

מפענח הדיבור

המחקר הזה מחולק לשני חלקים. בחלק הראשון אנו מפענחים דיבור שמופק בקול רם. בחלק השני אנו מפענחים דיבור שמוצק בשקט בתוך ראשו של המטופל. בחלק הראשון, רשמנו את הפעילות המוחית בזמן שאנשים דיברו בקול רם. לאחר מכן, בנינו על גבי מחשב מכשיר

איור 5

דוגמאות לספקטוגרמה מקורית ומשוחזרת. **A.** ספקטוגרמה מקורית של צלילים שנאמרו בקול רם וספקטוגרמה משוחזרת מפעילות מוחית של המטופל בעת שדיבר בקול רם. **B.** ספקטוגרמה מקורית של צלילים שנאמרו בקול רם וספקטוגרמה משוחזרת מהפעילות המוחית שהתקבלה בזמן אמירת המילים בשקט בתוך הראש (בעת מחשבה).



איור 5

פענוח שהיה מסוגל לשחזר מתוך הפעילות המוחית חלקים מצלילי הדיבור שנאמרו בקול רם [2]. אבל רק שנייה, אלה חלקים בדיוק מצלילי הדיבור שוחזרו?

זכרו, צלילים מורכבים משילוב של תדרים שונים. בעזרת שימוש בנוסחאות מתמטיות אפשר לבודד כל אחד מהתדרים שנמצאים בצליל נתון. התוצאה של פירוק הצליל בצורה זו נקראת "יצוג ספקטוגרמה". ייצוג הספקטוגרמה הזה הוא מה שפענחנו במחקר שלנו. מדוע פענחו כל תדר בודד, ולא את שלל התדרים שנמצאים בצליל שלם? הסיבה היא שזו הדרך שבה המוח מעבד צלילים, על-ידי ניתוח כל תדר בפני עצמו, ולא של תערובת של תדרים.

פענוח של דיבור שנוצר בשקט בראשו של המטופל היה מסובך יותר. פענוח מחשבות הוא, באופן כללי, קשה יותר מפענוח דיבור שמופק בקול רם. הסיבה לכך היא שאיננו יודעים בדיוק כיצד ומתי פעילות המוח שמויצרת בזמן שחושבים ממופית לצלילי דיבור, בהינתן שלא באמת מופק צליל בזמן המחשבה. לכן, אנו צריכים להבין איך לדעת מתי בן אדם חושב, וזו בעיה קשה לפתרון. יש לנו מושג לא רע לגבי איזה חלק במוח הוא פעיל, אבל איננו יכולים בדיוק לומר אלה אותות מקושרים עם אלה צלילי דיבור. אז, מה עשינו כדי לפענח מחשבות? השתמשנו באסטרטגיה אחרת, אשר מבוססת על העובדה שדיבור בקול רם ודיבור בתוך הראש כוללים חלקים חופפים של מנגנונים מוחיים. השתמשנו במודל שיכול לפענח מילים שנאמרו בקול רם, ומימשנו את מודל הפענוח הזה על נתונים מוחיים שנוצרו בזמן חשיבה. באמצעות השיטה הזו הצלחנו לשחזר חלק מצלילי הדיבור שהיו תואמים לצלילים שהיו מופקים אם המילים היו נאמרות בקול רם.

ספקטוגרמה (Spectrogram)

ייצוג ויזואלי של התדרים השונים אשר מרכיבים צליל או אות.

תוצאות

התוצאות שלנו הראו שאנו יכולים לפענח באופן חלקי את הספקטוגרמה של מה שהמטופלים חשבו. באיורים 5A ו-5B בהתאמה, אפשר לראות דוגמה לספקטוגרמה המקורית של המילים שנאמרו, והספקטוגרמה המשוחזרת של אותם צילי דיבור שנאמרו בקול רם ואלה שנאמרו בראשו של המטופל. השחזור יצא די מדויק [3]. אולם איכות הצליל לא הייתה טובה מספיק בשביל להבין מה בדיוק המטופלים חשבו. אבל, זה רק הניסיון הראשון שלנו, ואנו מקווים להשתפר. למעשה, אנו חייבים להשתפר בגלל שמטופלים רבים שאינם יכולים לדבר אבל חושבים מחשבות סדירות בראשיהם, יעזרו רבות במחקר הזה.

העבודה הזו מראה לנו שבסופו של דבר אפשר יהיה להשתיל מפענח דיבור אצל מטופלים שיש להם הפרעות מוחיות קשות, אשר משפיעות על כישורי השפה שלהם, מה שיחזיר את יכולתם לדבר. האם אתם יכולים לדמיין כמה נפלא זה יהיה אם נוכל לעזור למטופל להגיד 'אני רעב' או 'אני אוהב אותך'? זו הסיבה שהמדע הוא כל כך מהנה, כי אנו יכולים לעזור לאנשים לשפר את חייהם.

מאמר המקור

Martin, S., Brunner, P., Holdgraf, C., Heinze, H. J., Crone, N. E., Rieger, J., et al. 2014. Decoding spectrotemporal features of overt and covert speech from the human cortex. *Front. Neuroeng.* 7:14. doi: 10.3389/fneng.2014.00014

מקורות

1. Hickok, G., and Poeppel, D. 2007. The cortical organization of speech processing. *Nature Reviews Neuroscience* 8 (5): 393–402. doi: 10.1038/nrn2113
2. Pasley, B. N., David, S. V., Mesgarani, N., Flinker, A., Shamma, S. A., Crone, N. E., et al. 2012. Reconstructing speech from human auditory cortex. Edited by Robert Zatorre. *PLoS Biology* 10 (1): e1001251. doi: 10.1371/journal.pbio.1001251
3. Martin, S., Brunner, P., Holdgraf, C., Heinze, H. J., Crone, N. E., Rieger, J., et al. 2014. Decoding spectrotemporal features of overt and covert speech from the human cortex. *Frontiers in Neuroengineering* 7. doi: 10.3389/fneng.2014.00014

פורסם אונליין: 25 בינואר 2019

נערך על ידי: Sabine Kastner, Princeton University, USA

ציטוט: Martin S, Mikutta C, Knight RT and Pasley BN (2019) הבנה של מחשבות במוח האדם ופענוחן. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2016.00004-he

תורגם והותאם:

Martin S, Mikutta C, Knight RT and Pasley BN (2016) Understanding and Decoding Thoughts in the Human Brain. *Front. Young Minds* 4:4. doi: 10.3389/frym.2016.00004

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

COPYRIGHT © Martin, Mikutta, Knight and Pasley 2016. 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

BHARGAVI, גיל: 14

אני אוהבת לקרוא ולהקשיב למוזיקה, ויש לי תשוקה רבה ל-Bharathanatyam- ריקוד 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

STEPHANIE MARTIN

אני סטודנטית לביו-הנדסה במכון הטכנולוגי הפדרלי בשווייץ. אני מתעניינת באיך המוח פועל בזמן חשיבה, ואם אנו יכולים לפענח מחשבות בעזרת שימוש באלגוריתמים מתמטיים מורכבים. מטרתי המדעית היא לספק לאנשים שאינם יכולים לדבר או לתקשר מכשיר דיבור שיכול לקרוא את המוח שלהם בצורה טבעית ואינטואיטיבית. כשאינני עובדת, אני מטיילת סביב לעולם, עושה סקי או מטפסת על הרי האלפים. *steph.martin2410@gmail.com.

CHRISTIAN MIKUTTA

אני רופא (בעל התמחות בפסיכיאטריה) וחוקר מוח. אני מתעניין במיוחד באיך המוח מאזין למוזיקה. אני מוצא זאת מרתק שהאזנה למוזיקה גורמת לנו להרגיש שמחים או נינוחים, ואני רוצה לבחון איך זה עובד. מלבד מוזיקה אני נהנה לעשות הרבה פעילויות ספורטיביות בחוץ, כמו טיפוס הרים ברגל או ברכיבה על אופניים.

ROBERT T. KNIGHT

ניורולוג וחוקר מוח אשר מתעניין באיך המוח מייצר את המגוון המדהים של התנהגויות אנושיות. תמיד היה מרתק מכך שמדע מאפשר להבין איך דברים עובדים ואיך הידע הזה יכול לעזור למטופלים שיש להם בעיות מוחיות. הוא אוהב את ההרים, דיג וכמובן ספורט. קדימה, לוחמים!

BRIAN N. PASLEY

אני מדען שתמיד הסתקרן מהטבע ומכיצד המוח שלנו עובד. אני תמיד נדהם מאיך המוח שלנו מייצר את החוויות שאנו חווים, כמו אהבה, צחוק ואפילו רק היכולת להקשיב.



Hebrew version
provided by

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

