



שמיעה והסביבה: צלילים מכל פינה!

Daniel Henning, Edin Sabic, Michael C. Hout*

המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת ניו מקסיקו, לאס קרוזס, ניו מקסיקו, ארצות הברית

סוקרת צעירה

ISABELLA

גיל: 11



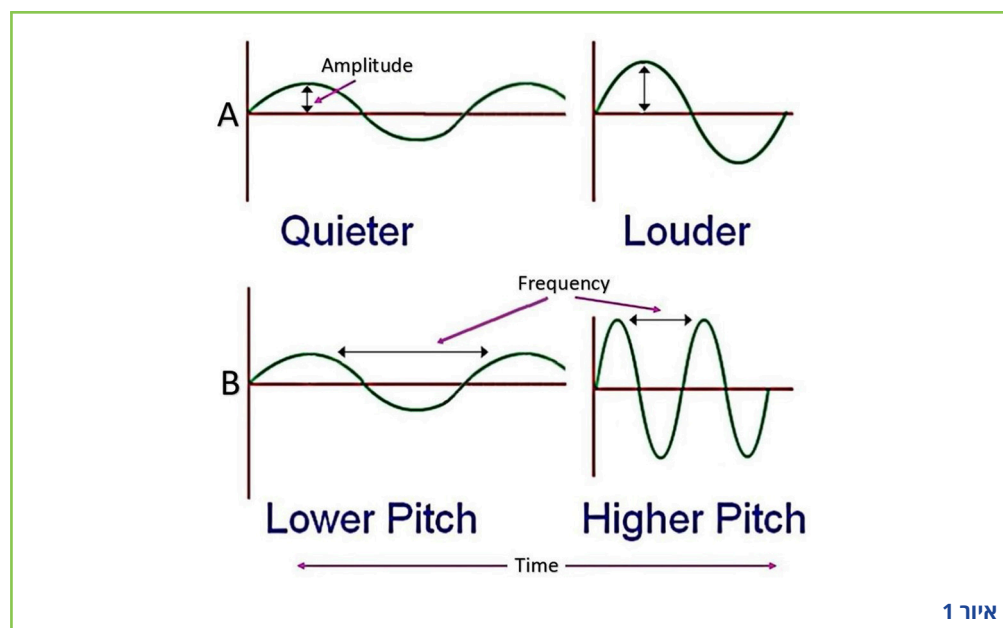
האם אי פעם תהיתם איך אנו מצליחים, עם שתי אוזניים בלבד, לאתר צלילים שמגיעים מכל הכיוונים סביבנו? או כשאתם משחקים במשחק וידאו, מדוע נדמה שמה שהתפוצץ מאחוריכם אפילו שאתם נמצאים בסביבה הבטוחה של ביתכם? המוחות שלנו קובעים מהיכן צלילים מגיעים, תוך שימוש בריבוי רמזים. שניים מהרמזים האלה הם: (1) לאיזו אוזן הצליל מגיע קודם, ו-(2) כמה רועש הצליל כשהוא מגיע לכל אוזן. לדוגמה, אם צליל מסוים מגיע לאוזן ימין שלכם קודם סביר להניח שמקורו נמצא מימין לגוף. אם צליל מגיע אל שתי האוזניים בו בזמן סביר להניח שמקורו נמצא בקו ישר מהגוף, מלפנים או מאחור. מפיקי סרטים ומשחקי וידאו משתמשים ברמזים האלה כדי לתעתע במוחכם, זאת במטרה ליצור עבורנו את האשליה שצלילים מסוימים מגיעים מכיוונים מסוימים. במאמר הזה נחקור כיצד המוח אוסף מידע מהאוזניים שלכם ומשתמש במידע הזה כדי לקבוע מהיכן צלילים מגיעים.

הרכיבים הפיזיקליים של צלילים

יכולתנו לשמוע היא מכריעה לצורך קבלת מידע על העולם שסביבנו. צלילים מיוצרים כשפריט מסוים מרטיט את האוויר שסביבו, והרטט הזה (המְכָנָה וּבְרָצִיּוֹת) יכול להיות מיוצג כגל שמתקדם בחלל. לדוגמה, אם ענף נופל מעץ ופוגע באדמה, לחץ האוויר סביב הענף

איור 1

משרעת ותדירות שמיוצגות כגלים. (A) משרעת היא עוצמת הוויברציות בעודן מתקדמות באוויר. ככל שהמשרעת גדולה יותר כך הצליל נתפס כחזק יותר על-ידי השומע. (B) תדירות היא המהירות שבה גל הקול מתנוודד, והיא קובעת את גובה הצליל שנשמע. ככל שהתדירות גדולה יותר כך גובה הצליל גבוה יותר. = Amplitude משרעת (אמפליטודה). = Pitch גובה הצליל.



איור 1

משרעת

(Amplitude)

גודלו של גל הקול; זו התכונה שמשפיעה על תפיסת העוצמה של הצליל.

גובה הצליל

(Pitch)

איכות הצליל שנחוות כפונקציה של התדירות, או מהירות הוויברציות (רטיטות) של הגל; זו מידת הגובה (גובה) או נמוך של טון או של צליל.

אפקט דופלר

(Doppler effect)

עלייה או ירידה בתדירות של גלי קול כאשר מקור הרעש והשומע נעים זה לקראת זה או מתרחקים.

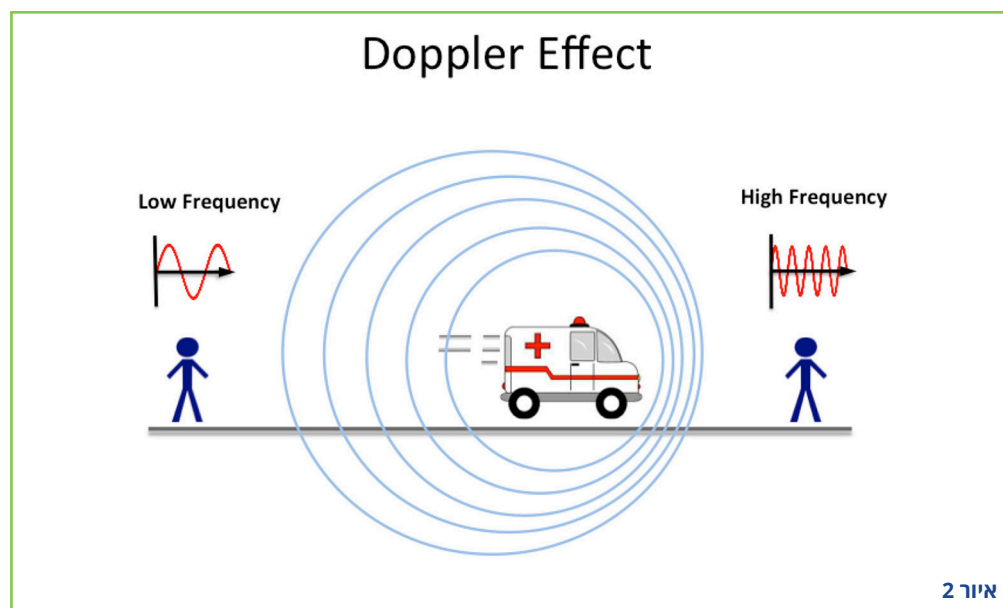
משתנה כשהוא פוגע באדמה, וכתוצאה מכך הוויברציות של האוויר מייצרות את הצליל שנובע מההתנגשות. דבר אחד שאנשים רבים אינם קולטים הוא שלגלי קול יש מאפיינים פיזיקליים, ולכן הם מושפעים על-ידי הסביבה שבה הם מתרחשים. בוואקום, למשל, שבו אין כל תנועה, גלי קול לא יכולים להתקיים מאחר שאין שום דבר שיכול לרטוט ולגרום לגלי הקול. שני המאפיינים הפיזיקליים החשובים ביותר של קול הם תדירות ומשרעת (אמפליטודה). תדירות היא המהירות שבה גל הקול רוטט, והיא קובעת את גובה הצליל. תדירות צליל גבוה יותר גורם לגובה הצליל להישמע גבוה יותר, כמו חליל או ציוץ של ציפור, בעוד שתדירות צליל נמוכה הם בעלי גובה צליל נמוך יותר, כמו טוֹבָה (כלי נשיפה) או נביחת כלב. אפשר לחשוב על המשרעת של גל קול כעוצמת הוויברציות בעודן מתקדמות באוויר, והיא קובעת עד כמה הצליל חזק. כפי שאתם יכולים לראות באיור 1, כאשר הפסגה של גל הקול קטנה יותר הצליל יישמע חלש יותר. אם הפסגה גדולה יותר אז הצליל יישמע חזק יותר. אפשר אפילו לחשוב על גלי הקול כמו גלים באוקיינוס. אם אתם עומדים במים דוממים ומפילים חלוק נחל למרגלות רגליכם, הוא יגרום לאדווה (גל קטן) שלא תשפיע עליכם הרבה. אולם אם תעמדו באוקיינוס במזג אוויר סוער, ייתכן שהגלים שיגיעו אליכם יהיו חזקים מספיק כדי להפיל אתכם למים! ממש כמו הגודל והחוזק של גלי המים, כך גודלם של גלי הקול יכול להשפיע מאוד על מה שתשמעו.

גלי קול מְבַצְעִים אינטראקציות מעניינות עם הסביבה. האם אי פעם שמתם לב לכך שהסִיִּרְנוֹת של אמבולנס נשמעות אחרת כשהוא רחוק לעומת כשהוא קרוב אליכם או חולף על פניכם? הסיבה לכך היא שלוקח לצליל זמן להגיע מנקודה אחת לאחרת, והתנועה של מקור הצליל קשורה לתדירות של הגלים בעודם מתקרבים לשומע. כאשר אמבולנס נמצא רחוק תדירות הסירנות נמוכה, אולם התדירות מתגברת ככל שהאמבולנס מתקרב אליכם. זו תופעה שידועה בשם **אפקט דופלר** (ראו איור 2).

צלילים מושפעים לא רק מהמרחק אלא גם מפריטים אחרים. חשבו על מקרה שבו מישהו קרא לכם מחדר אחר. ככל הנראה הבחנתם בכך שהיה קשה יותר לשמוע אותו מחדר אחר מאשר אם הוא היה יושב לידיכם. המרחק ביניכם אינו הסיבה היחידה לכך שקשה יותר לשמוע אדם

איור 2

כיצד תדירויות של גלי קול מושפעות (ונשמעות) כאשר סירנה מתקרבת אל השומע או מתרחקת ממנו. כאשר האמבולנס מתקרב לשומע התדירות של הצליל עולה ולכן הצליל נשמע גבוה יותר. כאשר האמבולנס מתרחק מהשומע התדירות יורדת, מה שגורם לצליל להישמע נמוך יותר. Frequency = תדירות.



שנמצא בחדר אחר. קשה יותר לשמוע אותו מאחר שגלי הקול נבלעים על-ידי פריטים בסביבה. ככל שמי שקורא לכם נמצא רחוק יותר ישנם יותר פריטים ביניכם, כך שפחות גלי קול מגיעים בסופו של דבר לאוזניים שלכם. כתוצאה מכך הצלילים עשויים להישמע חלשים או עמומים, אפילו כשהאדם צועק בקול רם.

מבנה האוזן

האוזניים שלנו הן מבנים אנטומיים מורכבים שמחולקים לשלושה חלקים עיקריים אשר נקראים האוזן החיצונית, האוזן התיכונה והאוזן הפנימית. האוזן החיצונית היא החלק היחיד של האוזן שאפשר לראות מבחוץ, והיא משמשת בעיקר לתיעול הצלילים מהסביבה לתוך תעלת האוזן. משם הצלילים ממשיכים לתוך האוזן התיכונה, שם היא מרעידה את עור התוף ושלוש עצמות קטנות שנקראות עצמות השמע, אשר מעבירות את אנרגיית הצליל לתוך האוזן הפנימית. האנרגיה ממשיכה להתקדם לתוך האוזן הפנימית, שם היא מתקבלת על-ידי השבלול (cochlea). השבלול הוא מבנה בתוך האוזן שצורתו כמו של קונכיית חילזון, והוא מכיל את איבר קורטי (organ of Corti), שבו נמצאים "תאי שיערה" אשר יכולים לחוש את אנרגיית הצליל. כאשר השבלול מקבל צליל הוא מגביר את האות שנקלט על-ידי תאי השיערה האלה, ומעביר את האות דרך עצב השמיעה אל המוח.

צלילים והמוח

בעוד שהאוזניים אחראיות על קבלת צלילים מהסביבה, המוח הוא שקולט אותם והופך אותם למידע הגיוני. **קליפת המוח השמיעתית** במוח ממוקמת באזור שנקרא האונה הרקתית, והיא מתמחה בעיבוד של צלילים ובפירושה (ראו איור 3). קליפת המוח השמיעתית מאפשרת לבני אדם לעבד דיבור ולהבינו, כמו גם צלילים אחרים מהסביבה. מה היה קורה אם אותות מעצב השמיעה לעולם לא היו מגיעים לקליפת המוח השמיעתית? כאשר מערכת השמיעה של אדם ניזוקה כתוצאה מפגיעה מוחית, האדם לפעמים אינו מסוגל לשמוע רעשים. לדוגמה, הוא עשוי

שבלול

(Cochlea)

צינור חלול (ברבוב) באוזן הפנימית אשר לרוב מקופל כמו קונכייה של חילזון, ואשר מכיל את איברי החישה שקשורים לשמיעה.

קליפת המוח

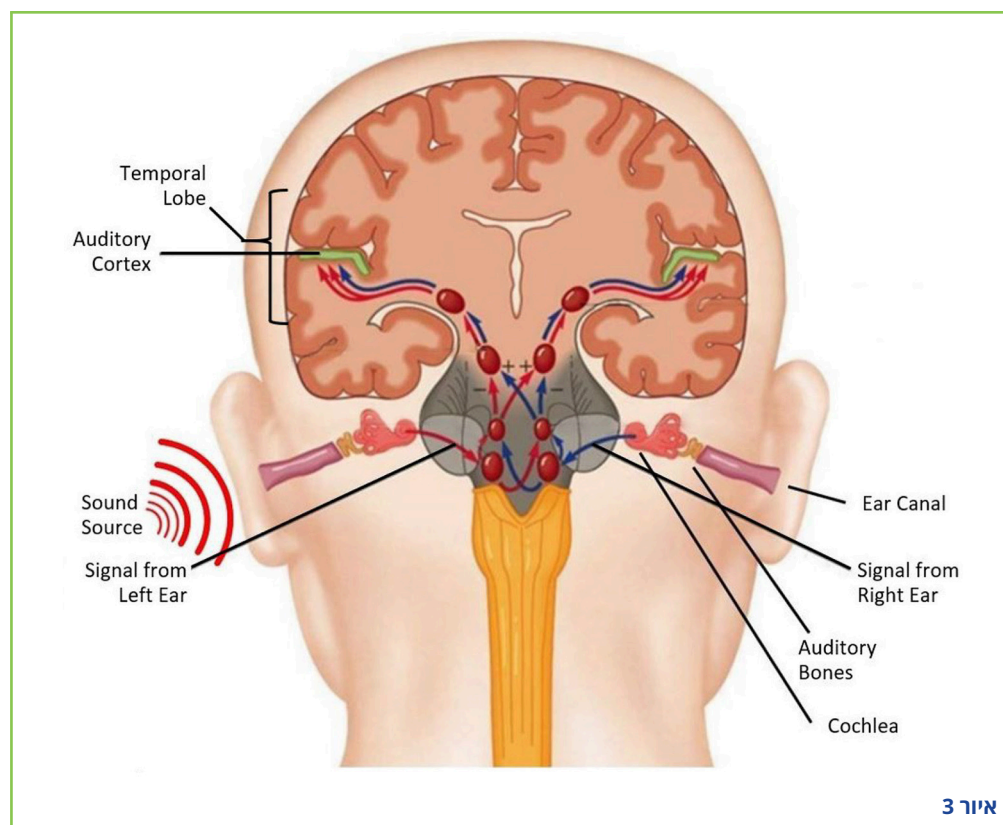
השמיעתית

(Auditory cortex)

אזור במוח שממוקם באונה הרקתית ומעבד מידע שנקלט דרך שמיעה.

איור 3

דוגמה לגל קול שמתקדם בתוך תעלת האוזן והופך לאותות עצביים שמגיעים לקליפת המוח השמיעתית. הצליל מְכַן לתוך תעלת האוזן על-ידי האוזן החיצונית, ולאחר מכן הוא נהפך לאותות עצביים על-ידי שבלול האוזן. אז האות הזה מועבר לקליפת המוח השמיעתית, שם מקושרת לצליל משמעות. = Temporal lobe האונה הרקתית
Auditory cortex = קליפת המוח השמיעתית
Cochlea = שבלול האוזן.



איור 3

לא להיות מסוגל להבין את משמעותן של מילים שנאמרות, או לא להיות מסוגל להבדיל בין שני כלים מוזיקליים שונים. מאחר שאזורים אחרים במוח גם פעילים במהלך תפיסת צלילים, אנשים עם נזק בקליפת המוח השמיעתית יכולים לעיתים קרובות להגיב בכל זאת לצלילים. במקרים כאלה, אפילו שהמוח מעבד את המידע הוא אינו מסוגל לגרום לאותות האלה לקבל משמעות.

שמיעת קולות מכאן או משם?

תפקוד אחד חשוב של אוזניים אנושיות, כמו גם אוזניים של בעלי חיים אחרים, היא היכולת לתעל מידע מהסביבה אל תוך תעלת האוזן. אף על פי שהאוזן החיצונית מתעלת צלילים אל תוך האוזן, התהליך הזה הכי יעיל רק כאשר הצלילים מגיעים מהצד של הראש (ולא מקדימה או מאחורה). כשאנשים שומעים צליל ממקור בלתי ידוע הם לרוב מסובבים את ראשם כדי שיפנה את האוזן אל עבר המקום שממנו הצליל מגיע. אנשים לרוב עושים זאת בלי להיות מודעים לכך כלל, כפי שכאשר אתם במכונית ושומעים אמבולנס, אתם מזיזים את ראשכם כדי לנסות לאתר מהיכן הסירנה מגיעה. חיות מסוימות כמו כלבים יעילות יותר מבני אדם באיתור צלילים. לעיתים חיות (כמו למשל חלק מהכלבים ומרבית החתולים) יכולות אפילו להזיז פיזית את אוזניהן בכיוון של הצליל!

בני אדם משתמשים בשני רמזים עיקריים כדי לקבוע מהיכן הצליל מגיע. הרמזים האלה הם: (1) איזו אוזן שומעת את הצליל קודם (מה שידוע כ**הבדלי זמן הגעת הצליל אל האוזניים** - **interaural time differences**), ו-(2) כמה חזק הצליל כשהוא מגיע לכל אוזן (מה שידוע כ**הבדלי עוצמת הצליל בין האוזניים** - **interaural intensity differences**). אם כלב

הבדלי זמן הגעת הצליל אל האוזניים (Interaural time differences)

ההפרש בזמני הגעת הצליל אל כל אחת מהאוזניים.

הבדלי עוצמת הצליל בין האוזניים (Interaural intensity differences)

ההפרש בעוצמה ובתדירות של הצליל שנקלט על-ידי שתי האוזניים.

היה נובח מצד ימין של גופכם לא הייתה לכם בעיה להפנות את ראשכם ולהסתכל לאותו הכיוון. הסיבה לכך היא שגלי הקול שהיו מיוצרים מהנביחה היו מגיעים לאוזן הימנית שלכם לפני האוזן השמאלית, מה שהיה גורם לצליל להיות חזק יותר באוזן ימין. מדוע הצליל חזק יותר באוזן ימין כאשר הוא מגיע מימין? ממש כמו פרטים אחרים בביתכם שחוסמים או בולעים את הצליל של אדם שקורא לכם, גם ראשכם הוא פריט מוצק אשר חוסם גלי קול שמתקדמים לעברכם. כאשר צליל מגיע מצד ימין שלכם, ראשכם יחסום חלק מגלי הקול לפני שהם יגיעו לצד שמאל. כתוצאה מכך הצליל שייקלט יישמע חזק יותר מימין, ובאמצעות כך יאותת על המקום שממנו הגיע.

אתם יכולים לחקור זאת דרך פעילות נחמדה. עצמו את עיניכם ובקשו מהורה או מחבר לשקשק צרור מפתחות איפשרו סביב לראשכם. עשו זאת כמה פעמים, ובכל פעם נסו לאתר את מיקום המפתחות, ואז פתחו את עיניכם כדי לראות עד כמה קרובים הייתם. מרבית הסיכויים שזה יהיה קל עבורכם. כעת, כסו אוזן אחת ונסו שנית. עם אוזן אחת זמינה בלבד אתם עשויים להתקשות במטלה או להיות פחות מדויקים בזיהוי המקום הנכון. הסיבה לכך היא שאטמתם את אחת האוזניים ולכן החלשתם את היכולת להשתמש באותות על התזמון או העוצמה של צלילים שמגיעים לכל אוזן.

שמע עוטף במשחקים ובסרטים

כאשר מהנדסי שמע יוצרים **שמע תלת-ממדי** (3D audio), הם מביאים בחשבון את כל הרמזים שמסייעים לנו למקם צלילים, והם צריכים להשתמש ברמזים האלה לתעתע בנו כדי שנתפוס את הצליל כמגיע ממקום מסוים. אף על פי שכאשר מדובר בשמע תלת-ממדי ישנו מספר מוגבל של מקורות צליל פיזיקליים המְשַׁדְרִים דרך אוזניות או רמקולים (לדוגמה, רק שניים במיקרופונים), השמע יכול להישמע כמגיע ממקומות רבים הרבה יותר. מהנדסים של שמע תלת-ממדי יכולים לממש את ההישג הזה באמצעות הבָּאָה בחשבון של האופן שבו גלי הקול מגיעים אליכם, בהתבסס על צורת ראשכם ומיקום האוזניים שלכם. לדוגמה, אם מהנדס שמע רוצה ליצור צליל שנדמה שמגיע מלפנים וקצת מימינכם, המהנדס יתכנן בזיהירות את הצליל כך שיתחיל להתנגן באוזנייה הימנית ויהיה מעט חזק יותר באוזנייה הזו בהשוואה לאוזנייה השמאלית.

משחקי וידיאו וסרטים נהיים מוטמעים יותר וזדומים לחיים האמיתיים כאשר הם מוצמדים לתכסיסים האלה של שמע תלת-ממדי. כאשר צופים בסרט למשל קבוצות של רמקולים באולם הקולנוע יכולות למקד את כיוון הצליל כדי לאפשר התאמה בין מה שאתם רואים ובין מה שאתם שומעים. לדוגמה, דמיינו שאתם צופים בסרט והשחקנית משוחחת בטלפון מצד ימין של המסך. הדיבור שלה מתחיל להתנגן בעיקר ברמקולים שממין, אולם בעודה נעה על המסך מימין לשמאל הצליל עוקב אחריה בהדרגה באופן חלק. האפקט הזה מתמש על-ידי כמה רמקולים שעובדים יחד בסנכרון הדוק כדי לאפשר את יצירת האפקט התלת-ממדי הזה.

מציאות מְדֻמָּה (VR – Virtual reality) לוקחת את החוויה הזו רחוק יותר על-ידי שינוי המיקום של הצליל בהתבסס על המקום שאליו אתם מסתכלים או היכן אתם ממוקמים בחלל הווירטואלי. ב-VR, לפי הגדרה, אתם ממוקמים באופן וירטואלי בסְצֵנָה, והחוויות הראייתיות והשמיעתיות צריכות שתיהן לשקף את החוויה שלכם בעולם האמיתי. בהדמיית VR מוצלחת

שמע תלת-ממדי (Three-dimensional audio)

קבוצת אפקטים שמשתמשים בה כדי לבצע מניפולציה שמיוצרת על-ידי רמקולי סטריאו או אוזניות, ומערבת את המיקום הנקלט של מקורות צליל בכל מקום בחלל התלת-ממדי.

כיוון הראש שלכם, תנועות הראש והמקום שאליו אתם מסתכלים אמורים לקבוע את המקום שממנו תחוו את מקור הצליל. אם תסתכלו ישירות על חללית תרגישו שצלילי המנוע שלה מגיעים ישירות מלפנים, אולם אם תסתובבו שמאלה אתם תרגישו שהצלילים מגיעים מימינכם. אם תזוזו ותעמדו מאחורי פריט גדול אתם תשמעו את גלי הקול הווירטואליים פוגעים בפריט שלפניכם ומגיעים אליכם באופן בלתי ישיר, מה שיעמעם את הצליל ויגרום לו להישמע חלש ועמום יותר.

מסקנות

מדענים חוקרים ומקצוענים שעובדים בתעשיית הסרטים ומשחקי הווידאו השתמשו בהדמיות של צלילים כדי ללמוד עוד על שמיעה ולהעצים את חוויות הבידור שלנו. חלק מהמדענים מתמקדים באופן שבו המוח מעבד צלילים, בעוד שאחרים מנתחים את המאפיינים הפיזיקליים של גלי הקול עצמם, כמו למשל האופן שבו הם מוחזרים או מופרעים בדרכים שונות. חלק מהמדענים אפילו חוקרים כיצד חיות אחרות שומעות, ומשווים את יכולותיהן עם היכולות שלנו. בתורם, מקצוענים בתעשיית הסרטים ומשחקי הווידאו השתמשו במחקר הזה כדי לגרום לחוויות של צופי סרטים וגיימרים להיות מציאותיות יותר. בסביבות וירטואליות מעצבים יכולים לגרום לגלי קול וירטואליים להתנהג כמו שגלי קול מתנהגים בחיי היומיום. כשאתם משחקים במשחק וידאו או צופים בסרט קל לקחת כמובן מאליו את המחקר והזמן שהושקעו כדי ליצור את החוויה הזו. אולי ההתקדמות הבאה בטכנולוגיות שִׁמְעֵ שִׁמְעֵ שמדמות מציאות תתחיל איתכם ועם הסקרנות שלכם לגבי גלי קול והאופן שבו מערכת השמיעה עובדת!

פורסם אונליין: 03 במרץ 2020

נערך על ידי: Robert Zatorre, McGill University, Canada

ציטוט: Henning D, Sabic E and Hout MC (2020) שמיעה והסביבה: צלילים מכל פינה! Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2018.00063-he

תורגם והותאם:

Henning D, Sabic E and Hout MC (2018) Hear and There: Sounds From Everywhere! Front. Young Minds 6:63. doi: 10.3389/frym.2018.00063

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

COPYRIGHT © 2018 © Henning, Sabic and Hout 2020. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתיקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים (המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה). השימוש, ההפצה או ההעתיקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרת צעירה

ISABELLA, גיל: 11

קוראים לי איזבלה ואני בת אחת עשרה. נולדתי בניו יורק ואני גרה כיום בשווייץ. אני אוהבת אומנות, שירה וריקוד, וגם נגינה על פסנתר. אני גם אוהבת מדע, מתמטיקה וטבע. במדע, אני אוהבת כל מה שקשור לחלל, לזמן ולחומר. הספורט האהוב עליי הוא שחייה. בעתיד אני רוצה להיות מהנדסת אווירונאוטיקה. תמיד הייתי סקרנית מאוד ללמוד עוד על העולם שסביבנו.

הכותבים

DANIEL HENNING

אני דוקטורנט שעוסק בפסיכולוגיה הנדסית באוניברסיטת ניו מקסיקו, ואני מתעניין בשמיעה תלת-ממדית ומציאות מדומה/ רְבוּדָה. אני מתעניין ביישום של מה שאני לומד כדי ליצור סביבות צליל לחוויות מוטמעות במסגרת של מציאות מדומה. כדי לעשות זאת אני לומד איך להטמיע שיטות של למידת מכונה (כדי שתוכנת מחשב "תלמד" ותסייע ליצור ייצוגים שמיעתיים טובים יותר).

EDIN SABIC

אני דוקטורנט לפסיכולוגיה קוגניטיבית באוניברסיטת ניו מקסיקו. אני לומד כיצד אנשים משתמשים בטכנולוגיה ומבינים אותה. לאחרונה אני מתעניין איך לאתר על מה אנו מסתכלים כדי לתת לטכנולוגיה מידע לגבי מה שאנו מתמקדים בו. אני גם אוהב לערוך מחקר על האופן שבו אנשים שומעים בסביבות רועשות. מחוץ ללימודים אני אוהב לשחק כדורגל ונהנה ללמוד על תרבויות ושפות חדשות.

MICHAEL C. HOUT

אני פרופסור במחלקה לפסיכולוגיה באוניברסיטת ניו מקסיקו, ואני עורך שותף בעיתון המדעי Attention, Perception & Psychophysics. המחקר שלי בוחן דברים שונים רבים, אולם אני מתמקד במחקר של חיפוש ויזואלי (כיצד אנשים מוצאים דברים) ותנועות עיניים (לאן ומדוע אנו מזיזים את העיניים). בזמני הפנוי המצומצם אני אוהב לשחק עם הכלבים שלי, לצאת לרכיבות על אופנוע, לצעוד, לטייל ולשחק הוקי.

*mhout@nmsu.edu



Hebrew version
provided by

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

