

מתעתעים במוח, מתעתעים בכאב: תפקיד טיפול המראָה ושימושים מודרניים במציאות מדומה

Charles Faure*, Annabelle Limballe, Hugo A. Kerhervé

אוניברסיטת רן, אינריה, M2S-EA 7470, רן, צרפת

סוקרים צעירים

ANNA
גיל: 13



CATERINA
גיל: 14



FEDERICO
גיל: 14



FRANCESCO
גיל: 14



SOFIA
גיל: 14



TOMMASO
גיל: 14



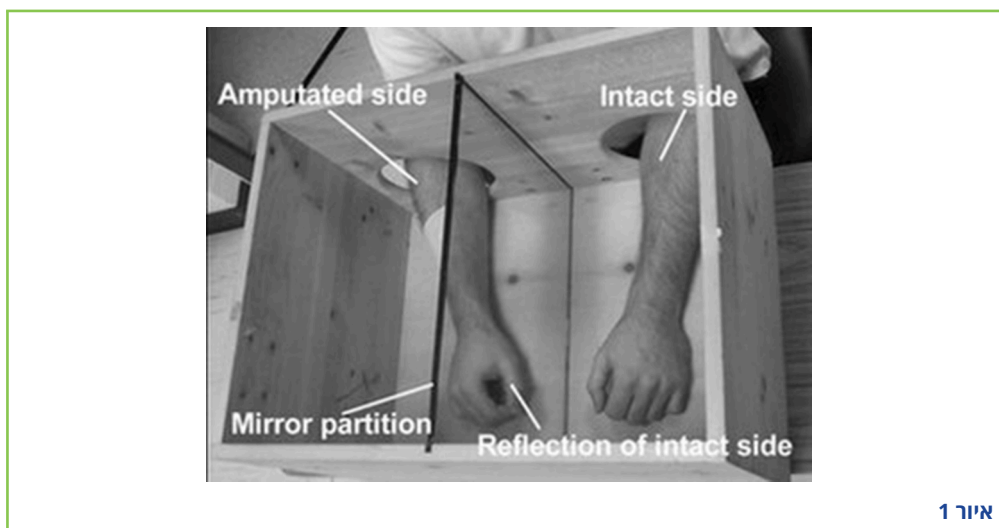
המוח הוא מרכז הבקרה של הגוף והוא מעבד מידע שמגיע מכל חמשת החושים. אחד מהחושים, הראייה, לעיתים קרובות חזק יותר מאחרים. טיפול המראָה הוא סוג של טיפול שמשמש בראייה כדי לטפל בכאב שאנשים עם גפיים קטועות לפעמים מרגישים בגפיים החסרות שלהם. טיפול המראה עושה זאת באמצעות תעתוע של המוח: הוא מספק את האשליה שהגף הקטועה זזה בזמן שהאדם מסתכל במראה על הגף האמיתית שנותרה. באופן הזה המוח מתעלם מהעובדה שהוא לא מקבל אות של תנועה מהגף הקטועה עצמה. אף על פי שזהו טיפול מבטיח ביותר, לטיפול המראה ישנן כמה מגבלות ומדענים מנסים להתגבר על המגבלות האלה כך שטיפול המראה יוכל לשמש לטיפול בתנועות מורכבות יותר ובסוגים שונים של כאב. מציאות מדומה היא כלי מבטיח שמציע סביבות אינטראקטיביות, ריאליסטיות וגמישות שמסוגלות לתעתע במוח בצורות מורכבות יותר.

מדוע אנו צריכים לתעתע במוח?

נוסף על טעם, ריח, צליל ומגע, ראייה היא אחד מחמשת החושים שמאפשרים לנו לאסוף מידע מהעולם ומהסביבה שלנו. אולם ראייה יכולה גם לשמש כטיפול ולהעביר מידע למוח:

איור 1

דוגמה לתיבת מראה. תיבת המראה הזו יוצרת את האשליה שלמטופל יש שתי ידיים מחוברות ושתי הידיים נעות. הצד של היד האמיתית משתקף בחוצץ המראה. מטופל שמתבונן במראה רואה את ההשתקפות של הגוף המחוברת ומרגיש כאילו הגוף הקטועה עדיין נוכחת וזזה. התמונה לקוחה מ-BBC News archives.



איור 1

לפני כ-35 שנים מדענים בקליפורניה (ארצות הברית) בהובלתו של פרופסור רמצי'נדראן [1, 2] השתמשו בראייה כדי לטפל בבעיה מוכרת שהשפיעה על אנשים שאיבדו גוף (יד, רגל וכד'). קטועי הגפיים האלה לעיתים חוו תחושות בלתי נעימות של דגדוג, פרכוסים או אפילו כאב באותה הגוף הקטועה, אף על פי שהגוף כבר לא הייתה נוכחת פיזית. המדענים הציעו שתופעת "גוף הפנטום" הזו נובעת מבעיית תקשורת במוח. נוירונים (תאי עצב) שקודם לכן פקדו על שרירים בגוף הפנטום הקטועה עדיין קיימים במוח ועדיין יכולים לשלוח אותות, כמו למשל בקשה להניע את הגוף. כאשר האותות האלה נשלחים המוח מצפה לאותות חוזרים כמו למשל תחושה של תנועה או של מגע, אשר מעידים על כך שהפקודה בוצעה. אולם מאחר שהגוף כבר לא קיימת אותות המוח לא מגיעים ליעדם (השרירים) והגוף לא יכולה לשלוח מידע חושי חזרה אל המוח. חוסר התקשורת הזה יוצר קונפליקט שמדענים קוראים לו פידבק שלילי. כדי לעקוף את הפידבק השלילי הזה, מדענים הציעו לתעתע במוחם של אנשים עם יד/ רגל קטועה ולגרום לו לקלוט תחושות על-ידי התבוננות ביד/ רגל האחרת (האמיתית). בניסוי המקורי אנשים מיקמו את הגוף הקטועה (פנטום) והגוף המחוברת שלהם בקופסה עם מראה בצד אחד (ראו איור 1). קטועי הגוף התבקשו להזיז את האצבעות הקיימות שלהם בזמן שהם מסתכלים על המראה בצד של הגוף הקטועה. באמצעות 15 דקות אימון ביום בלבד במשך 3 שבועות אנשים היו מסוגלים "לחוש" תנועה בגוף הפנטום, ויותר ממחצית מקטועי הגוף השתחררו מכאב הפנטום (נקרא גם כאב רפאים) שלהם. במחקר הזה טיפול המראה יצר אשליה של תנועה ששברה את לולאת הפידבק השלילי. כיצד זה ייתכן? האם טכנולוגיות חדשות יכולות לסייע לנו לעצב טיפולים חדשים שמבוססים על התצפיות האלה?

כיצד טיפול המראה עובד?

כדי להבין טוב יותר כיצד התופעה הזו עובדת, חוקרים מתמקדים בשני קונספטים: **נוירוני מראה ונוירופלסטיות**. נוירוני מראה הם נוירונים במוח שמופעלים כשאתם מבצעים מטלה אולם גם מופעלים כשאתם מתבוננים על מישהו אחר שמבצע את אותה המטלה. אולם נוירוני המראה האלה מופעלים רק אם אתם צופים בפעולה שאתם יכולים לבצע בעצמכם. לדוגמה, נוירוני המראה אינם מופעלים אם אתם מסתכלים על ציפור עפה. מה שיותר מפתיע הוא שנוירוני המראה גם מופעלים כשאדם מדמיין פעולה אולם לא מבצע אותה! זו גם הסיבה לכך

גוף פנטום

(Phantom Limb)

תסמין שבו מטופלים חווים את התחושה שהגפה הקטועה שלהם עדיין נוכחת. המטופלים האלה יכולים גם לחוש כאב או כיווץ בגוף החסרה.

נוירוני מראה

(Mirror Neurons)

נוירונים (תאי עצב) שמופעלים גם כמישהו מבצע פעולה וגם כשהוא צופה במישהו אחר שמבצע את אותה הפעולה.

נוירופלסטיות

(Neuroplasticity)

יכולתו של המוח לזהות את המבנה שלו במהלך חייו של אדם.

שאתם לעיתים מרגישים מה שאחרים מרגישים: אם אתם רואים את אצבעותיו של מישהו נתקעות בדלת, אתם ככל הנראה "תרגישו" את הכאב של אותו האדם ותירתעו.

המוח אינו רשת קשיחה של נוירונים שמאורגנים בצורה אחת מסוימת לכל החיים, כמו לוח חשמלי ישן. המוח כל הזמן מנסה למצוא דרכים טובות יותר להעביר מידע ולהתמודד עם מידע באמצעות יצירה של קשרים בין נוירונים והסרת קשרים אלה. התופעה הזו של שינויים בנוירונים נקראת נוירופלסטיות. כשתינוקות מגלים את העולם שסביבם באמצעות חמשת החושים שלהם, המוח שלהם עוברים התפתחות אינטנסיבית ועיצוב מחדש. מאוחר יותר, כשילדים לומדים לרכוב על אופניים, לתפוס כדור או לנגן על כלי מוזיקה, מתרחש עיצוב מחדש נוסף שמאפשר לילדים לבצע את הפעולות המורכבות האלה בלי שהם נדרשים לחשוב על כל שלב שמעורב בהן. כשאתם צופים בכדור שעף לקראתכם אינכם חושבים במודע על שימוש בשרירים מסוימים בזמנים מסוימים, אתם פשוט תופסים את הכדור מאחר שהמוח שלכם כבר יודע אלה שרירים צריכים להיות מופעלים ומתי. נוירופלסטיות ממשיכה להתרחש במהלך כל חייו של האדם, ויכולה להיות בעלת השפעות ארוכות טווח על החוויה שלכם בפעילות נתונה: זו למשל הסיבה לכך שככל שמתאמנים בחישוב מנטלי כך אתם נעשים טובים יותר ומהירים בחישוב כזה.

אם אזור מסוים במוח נפגע (משבץ, ממחלה או מטראומה כתוצאה מתאונה), אזור המוח הזה כבר לא יכול לשלוח פקודות מסוימות לגוף. אולם מאחר שהנוירופלסטיות מאפשרת למוח לשנות את הארגון שלו, חלק מהאנשים עם נזק מוחי עדיין יכולים לשחזר חלק מהתנועות שלהם הודות ליצירת קשרים חדשים בין נוירונים. הקשרים החדשים האלה מאפשרים דרכים חדשות לשליחת מידע באותו האופן שגשר חדש מאפשר לאנשים לחצות נהר כשהגשר הישן התמוטט. בסך הכול לאנשים צעירים יש יתרון משמעותי בשחזור תנועות אחרי פגיעה מוחית מאחר שהנוירופלסטיות נמצאת בשיאה כשהמוח עדיין מתפתח. ככל שאתם צעירים יותר כך תוכלו להחלים בצורה טובה יותר.

כעת, משלמדתם קצת על נוירופלסטיות, אתם יכולים להבין טוב יותר כיצד עובד טיפול המראה כדי להפחית את תחושות גף הפנטום הבלתי נעימות: המערכת הראייתית אומרת לנוירוני המראה שגף הפנטום זזה (אף על פי שהיא לא באמת זזה). באמצעות אימון ומעט סבלנות אפשר לעזור למוח "לראות" ו"להרגיש" שהגף הקטועה זזה ולשנות את האופן שבו המוח מתמודד עם אותות באמצעות חיסול הפיידבק השלילי הישן ("גף הפנטום אינה זזה"), ויצירת קשרים חדשים במטרה "להרגיש" מחדש את הגף.

האם אנו יכולים ליצור מראה טובה יותר?

טיפול המראה נבחן והראה תוצאות מבטיחות לטיפול בבעיות בריאות נוספות, כולל כאב כרוני, חינוך מחדש של המוח אחרי שבץ ואפילו דלקת פרקים. אולם השימוש בטיפול המראה עדיין מוגבל מאוד ויש עוד הרבה מה לשפר בטיפול הזה וביישומים שלו.

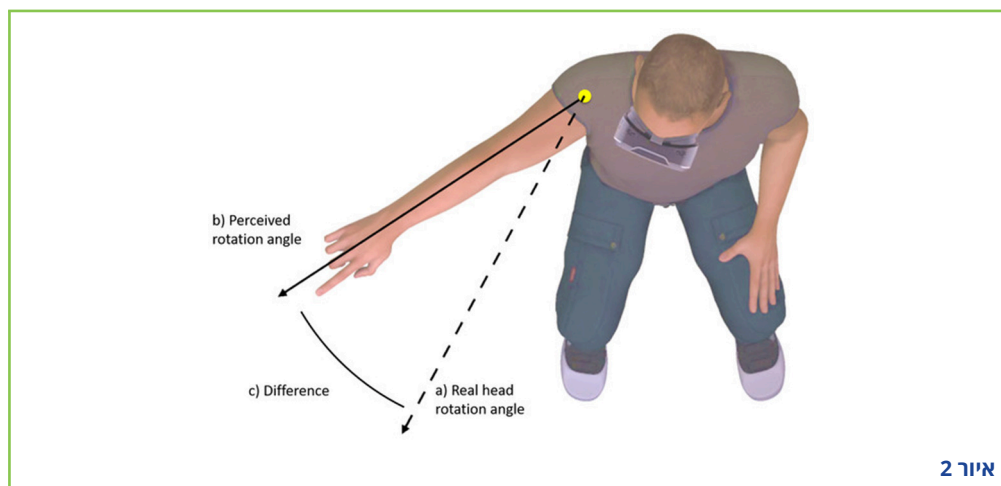
בעוד שטיפול המראה המסורתי מאפשר רק תנועות קטנות ולא יכול לספק חוויה ריאליסטית באמת שיכולה לתעתע במוח ולייצר אשליה של תנועה, הטכנולוגיה החדשה של **מציאות מדומה** (VR) מאפשרת בדיוק את זה. מציאות מדומה מספקת לאדם את אשליית התנועה

מציאות מדומה (Virtual Reality)

סביבה מלאכותית שנוצרת באמצעות מחשב ותוכנה שמציגה למשתמשים סטואציות שהם יכולים לתקשר איתן (לראות, לשמוע, לגעת, לתפוס וכו'). הגרפיקה יכולה להיות כל כך משכנעת שמשתתפים מקבלים את הסביבה כאמיתית.

איור 2

הגזמה של תנועת ראש באמצעות מציאות מדומה. כאשר המשתתפים התבקשו להזיז את ראשיהם, תנועת הראש הווירטואלית שהם ראו במציאות המדומה הייתה מוגזמת בעולם הווירטואלי – היא הייתה גדולה יותר מהתנועה שבוצעה בפועל. אף על פי שהמשתתפים סובבו את הראש שלהם רק בזווית מסוימת (קו מקווקו), הם חשבו שהם הזיזו את ראשם הרבה יותר (קו מלא). עולם המציאות המדומה יכול לתעתע במוח להרגיש תנועה גדולה יותר מזו שמתרחשת בפועל. התמונה לקוחה מ-Harvie ואחרים [3].



איור 2

על-ידי מיקומו בסביבה תלת-ממדית ונתינת אוטאר, או מופע של גוף. באמצעות מציאות מדומה אנשים יכולים לתקשר עם סביבה שמיוצרת על-ידי מחשב כאילו שהם נמצאים בתוך משחק וידיאו! שלא כמו טיפול המראה המסורתי, מציאות מדומה מאפשרת את אשליית התנועה לאיברי גוף שלא מגיעים בזוגות, כמו הראש לדוגמה. קבוצת חוקרים ביקשה לאחרונה מאנשים שהיו מוקפים במציאות מדומה להניע את ראשם הצידה אולם יצרה מניפולציה במה שהם ראו כך שהם חשבו שהם מזיזים את ראשם יותר ממה שהם הזיזו בפועל [3]. כשאנשים התבקשו לומר כמה ראשם זז באמת הם תמיד העריכו ביתר את התנועה. כפי שמודגם באיור 2 התנועה שהם תפסו הושפעה על-ידי מידע ראייתי שגוי שהשתלט על התחושה האמיתית של התנועה עצמה – המציאות המדומה תעתעה בהם!

בעיה אחרת עם טיפול המראה המסורתי היא שהוא לא תמיד יכול לשמש כדי לסייע לאנשים עם גפיים קטועות ללכת שוב, או להפחית את הכאב שהם חווים. גרסת מציאות וירטואלית רבודה (AVR) של טיפול המראה נוצרה במטרה לסייע לאנשים עם הבעיות האלה [4]. לאדם עם רגל תותבת הוצג אוטאר של עצמו שבו הרגל החסרה נראתה כמו רגלו האמיתית. המשתתף הזה הרגיש כאילו שהוא הולך עם שתי רגליו האמיתיות. במהלך הזמן חוסר הסימטריה הקל בהליכה שלו הלך ופחת, וצליעתו נעלמה כמעט לגמרי.

מסקנות

טיפול המראה המסורתי בקופסה הוכח כשיטה פשוטה ומעניינת מאוד לסייע לאנשים עם תופעת גף הפנטום. אולם השימוש בטיפול המראה מוגבל לתנועות פשוטות, ומערב יד או רגל אחת. בשל המגבלה הזו פנינו לטכנולוגיות חדשות. מציאות מדומה נראית מבטיחה בהקשר הזה והיא נהייתה יותר מאשר כלי למשחק ולבידור. למציאות מדומה ישנם יתרונות רבים כולל היכולת ליצור סביבות ריאליסטיות, אינטראקטיביות וגמישות להסחת המוח מהחוששים האחרים. יתרה מזו, מציאות מדומה מאפשרת למדענים לשלב חושים נוספים בחוויה, כמו שמיעה או מגע. מציאות מדומה יכולה לשמש למשל לעיצוב של **משחקים רציניים** לטיפול במטופלים שסובלים מתסמין גף הפנטום או ממגבלות תנועה אחרות. לסיכום, תעתוע המוח באמצעות מציאות מדומה הוא טכנולוגיה חדשה ומבטיחה לסייע למוח בהסתגלות לאתגרים שמציבות גפיים קטועות או פגיעות אחרות שמשפיעות על תנועת הגוף.

משחק רציני (Serious Game)

משחק שעוצב למטרה אחרת שאינה רק הנאה צרופה: פדגוגיה, חינוך, חינוך מחדש וכדומה.

מקורות

1. Ramachandran, V. S., Rogers-Ramachandran, D., and Cobb, S. 1995. Touching the phantom limb. *Nature*. 377:489–90. doi: 10.1038/377489a0
2. Ramachandran, V. S., and Rogers-Ramachandran, D. 1996. Synaesthesia in phantom limbs induced with mirrors. *Proc. Biol. Sci.* 263:377–86. doi: 10.1098/rspb.1996.0058
3. Harvie, D. S., Smith, R. T., Hunter, E. V., Davis, M. G., Sterling, M., and Moseley, G. L. 2017. Using visuo-kinetic virtual reality to induce illusory spinal movement: the moovi illusion. *PeerJ*. 5:e3023. doi: 10.7717/peerj.3023
4. Barton, G. J., De Asha, A. R., van Loon, E. C., Geijtenbeek, T., and Robinson, M. A. 2014. Manipulation of visual biofeedback during gait with a time delayed adaptive virtual mirror box. *J. Neuroeng. Rehabil.* 11:101. doi: 10.1186/1743-0003-11-101

פורסם אונליין: 09 בנובמבר 2021

נערך על ידי: Marcel Ruiz-Mejias, Universidad Pompeu Fabra, Spain

ציטוט: Faure C, Limballe A and Kerhervé HA (2021) מתעטעים במוח, מתעטעים בכאב: תפקיד טיפול המראָה ושימושים מודרניים במציאות מדומה. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2019.00091-he

Faure C, Limballe A and Kerhervé HA (2019) Fooling the Brain, Fooling the Pain: The Role of Mirror Therapy and Modern Uses in Virtual Reality. *Front. Young Minds* 7:91. doi: 10.3389/frym.2019.00091

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

COPYRIGHT © 2019 © Faure, Limballe and Kerhervé. 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

ANNA, גיל: 13

היי, אני Anna, אני בת 13 ואני נמוכה, ממש נמוכה. למרות זאת אני מלאת חיים ויצירתיות! אני אוהבת לצייר; למעשה אני יכולה לצייר כל דבר, מהמבוגרים ועד לערפדים: עבורי ציור הוא תשוקה אמיתית! אני לומדת בחטיבת ביניים.



**CATERINA, גיל: 14**

היי, אני Caterina ואני בת 14. בריכת השחייה היא ביתי השני: אני אוהבת לשחות, במיוחד שחייה צורנית. אני אוהבת ללמוד דברים חדשים והמקצועות האהובים עליי הם מתמטיקה, אנגלית ואיטלקית. אני לומדת בחטיבת ביניים, ובשנה הבאה אעבור לתיכון.

**FEDERICO, גיל: 14**

היי, אני Federico ואני בן 14. אני לומד בחטיבת ביניים, וזו השנה האחרונה שלי שם. אני אוהב לשחק כדורגל ומשחקי מחשב. יש לי הרבה חברים ואני מבלה איתם זמן רב. קבוצת הכדורגל האהובה עליי היא אינטר מילאנו, ואני מבקר באיצטדיון שלה לעיתים קרובות.

**FRANCESCO, גיל: 14**

היי, קוראים לי Francesco, הספורט האהוב עליי הוא טניס אולם אני גם אוהבת כדורגל והמועדון האהוב עליי הוא מילאן. אני לומדת בחטיבת ביניים בבית ספר מעולה. כשאסיים את חטיבת הביניים אלך לתיכון. המקצועות האהובים עליי הם מתמטיקה, איטלקית ואנגלית. אני משוכנעת שחיי יהיו נהדרים!

**SOFIA, גיל: 14**

היי, אני Sofia, אני בת 14 ולומדת בחטיבת ביניים. הנושא האהוב עליי הוא אנגלית מאחר שאני אוהבת ללמוד שפות. אני משחקת טניס וכדורעף חופים.

**TOMMASO, גיל: 14**

היי, אני Tommaso ואני לומד בחטיבת ביניים. אני די אוהב היסטוריה אולם אני גם אוהב מדע וטכנולוגיות חדשות. אני אוהב מוזיקה, במיוחד מוזיקה אינסטרומנטלית, ואני גם מנגן על פסנתר. אני ממש אוהב מוזיקה!!!!!! ואני אוהב ליצור אותה. אני גם אוהב כתיבה ויצירת סרטים קטנים באמצעות לגו. שנה אחרי שנה אני מנסה לשפר את עצמי בכל מה שאני עושה, יחד עם בית הספר וההורים שלי ועם אח שלי שמסייע לי מאוד בהכול.

הכותבים**CHARLES FAURE**

אני דוקטורנט במציאות מדומה (VR) וביישומיה בתחומים של ספורט קבוצתי במעבדת M2S-lab בֶּרְן (צרפת). ביתר פירוט, אני מתעניין באופן שבו שחקנים מתקשרים במטרה לקבל את ההחלטות הנכונות בזמן הנכון. באמצעות מציאות מדומה מתוקנת אני מנסה להבין כיצד תנועה והחלטות נובעות מאינטראקציות בין שחקנים, וכיצד אפשר לייעל אותן ולקרב אותן להיות אופטימליות יותר. אני מתעניין גם בהשלכות הרפואיות של טכנולוגיות מציאות מדומה. בזמני הפנוי אני נהנה לעשות ספורט ולשפר את הידע הכללי שלי!
*charles.faure@ens-rennes.fr

**ANNABELLE LIMBALLE**

שמי Annabelle Limballe ואני בת 24. בימים אלה אני משלימה את התואר השני שלי במדעי הספורט. יותר מספורט בלבד, אני מתעניינת בשליטה מוטורית שהיא הבנת האופן שבו הגוף שלנו פועל וכיצד המוח

שולט בתנועה. מאז שהייתי ילדה התאמנתי בכמה ענפי ספורט קבוצתיים כמו למשל כדורגל וכדורסל. כיום אני מעורבת בלימודים ובפרויקטי מחקר שמבוססים על העניין הראשוני שלי בספורט, וההנאה שאני חווה באימוני ספורט הפכה להנאה שבלחקור אותם!

HUGO A. KERHERVÉ

המטרה שלי כמורה למדעי הספורט וחוקר היא לחשוב על דרכים לגרום לאנשים לזוז ולהיות פעילים ללא תלות בגיל, בניסיון או בבריאות שלהם. אני חוקר תנועה אנושית באמצעות שיטות שונות כמו למשל מדידה של הוצאה אנרגטית, ניתוח תנועה ופעילות שרירית. המדידות האלה משמשות להערכת האפקט של טיפול, של אימון או של שימוש בציוד ספורט וכדי לעזור להחליט אם הדברים האלה מסייעים לאנשים או לא.



Hebrew version
provided by

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

