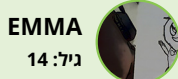


מרוץ ממשק מוח-מחשב בסייבתלון 2016

Domen Novak^{1,2*}, Roland Sigrist^{1,3}, Robert Riener^{1,4}

¹המעבדה למערכות סנסו-מוטוריות, המחלקה למדעי הבריאות והטכנולוגיה, המכון הטכנולוגי של ציריך, ציריך, שווייץ
²המחלקה להנדסת חשמל ומחשבים, אוניברסיטת ווימינג, לארמי, ווימינג, ארצות הברית
³סייבתלון, המחלקה למדעי הבריאות וטכנולוגיה, המכון הטכנולוגי של ציריך, ציריך, שווייץ
⁴המעבדה לרובוטי שיקום, בית חולים אוניברסיטאי בלגריסט, אוניברסיטת ציריך, ציריך, שווייץ

סוקרות צעירות



ממשקי מוח-מחשב מודדים את החשמל שמיוצר על-ידי המוח ומתרגמים אותו לפקודות שנשלחות למכונה. אולם לעיתים קרובות קשה לשפוט באיזו מהירות המשתמש יהיה מסוגל לבצע את המטלה באמצעות ממשק מוח-מחשב בלי שבוחנים אותה במצבים מציאותיים. באירוע שנקרא סייבתלון (Cybathlon) 2016 ארגנו מרוץ של ממשקי מוח-מחשב שבו משתתפים עם שיתוק בידיים וברגליים השתמשו בממשקי מוח-מחשב כדי לנווט במשחק מחשב של מסלול מכשולים. המאמר הזה מסכם את משחק המרוץ, את הטכנולוגיות שהמשתתפים השתמשו בהן ואת תוצאות המרוץ. המרוץ שלנו הדגים שממשקי מוח-מחשב יכולים לסייע לאנשים להשלים את המטלה אומנם הם גם כמעט חסרי תועלת אם מתרחשת טעות. בעתיד, משחק המרוץ יוכל לשמש כדי להשוות טכנולוגיות שונות של ממשקי מוח-מחשב ולחקור את הגורמים שמשפיעים על הביצועים של ממשקים כאלה, מה שיסלול את הדרך לשיפור הטכנולוגיה.

מהם ממשקי מוח-מחשב ולמה הם משמשים בדרך כלל?

מה אם יכולתם לשלוט במכונות באמצעות המוח שלכם? זה נשמע כמו מדע בדיוני, אולם למעשה זה המוקד של התחום המדעי שנקרא **ממשקי מוח-מחשב** (Brain-Computer Interface או BCI בקיצור). ממשקי מוח-מחשב מודדים את הפעילות החשמלית שמויצרת על-ידי המוח, לאחר מכן בוחנים את האותות החשמליים כדי למצוא תבניות שעשויות להעיד על כוונה, או מה שהמוח מנסה לגרום לגוף לעשות. ממשקי מוח-מחשב הם כלים שימושיים עבור אנשים שלא יכולים להזיז את הגפיים שלהם. האנשים האלה יכולים להשתמש בממשקי מוח-מחשב כדי לשלוט בכיסאות גלגלים [1] או לכתוב הודעות [2]. אולם מאחר שהפעילות החשמלית של המוח חלשה וצריכה להימדד מפני השטח של הגולגולת (לא בתוך הגולגולת), קשה לממשקי מוח-מחשב לזהות בצורה מדויקת את כוונותיהם של אנשים דרך מדידות חשמליות.

אם כן, כיצד מעריכים ממשק מוח-מחשב כדי לדעת אם הוא שמיש בעולם האמיתי? חוקרים בדרך כלל אוספים מדידות מהמוח ומאחסנים אותן במחשב, ואז משתמשים במדידות האלה להשוות בין תוכנות ממשק מוח-מחשב שונות כדי לזהות את התוכנה "הכי טובה" [3]. אולם זה רק מאפשר לחוקרים לקבוע כיצד ממשק מוח-מחשב מגיב לנתונים שנרשמו מראש – זה לא אומר להם באלה מהירות ורמת דיוק האדם יכול לבצע את המטלה באמצעות ממשק מוח-מחשב. באירוע לאנשים עם מוגבלויות, שנקרא **סייבתלון** (Cybathlon) 2016 [4], ארגנו מרוץ שבו טכנולוגיות ממשק מוח-מחשב שונות יכולות להיות מושוות ביחס למהירות שבה משתמשים בכל אחת מהטכנולוגיות משלימים משחק מרוץ ממוחשב [5]. זו הייתה ההשוואה הראשונה בין גישות ממשק מוח-מחשב שונות ב"עולם האמיתי": בעת השלמת מטלה תחת לחץ זמן בסביבה רועשת.

אילו סוגי ממשקי מוח-מחשב הורשו להשתתף בתחרות?

מאחר שרצינו להשוות בין ממשקי מוח-מחשב שונים באופן הוגן, ניסחנו כללים לגבי סוגי הממשקים היכולים להשתתף בתחרות. אישרנו ממשקי מוח-מחשב שמוודים פעילות מוחית בלי לפגוע בעור או לגרות את המוח. אף על פי שישנן כמה טכנולוגיות שונות שעומדות בקריטריונים האלה, כל המתחרים שלנו השתמשו בממשקי מוח-מחשב שמבוססים על **אלקטרואנצפלוגרפיה** (אא"ג בקיצור). אא"ג היא שיטה שמשתמשת ב**אלקטרודות** קטנות על גבי הקרקפת כדי לרשום את הפעילות החשמלית של המוח. מתחרים יכולים להשתמש בכמה אלקטרודות שהם רוצים ויכולים להשתמש בג'ל עבה על גבי האלקטרודות כדי ליצור מגע טוב יותר עם העור.

בממשק מוח-מחשב, אלקטרודות האא"ג מחוברות על-ידי כבלים למחשב ש"קורא" את המדידות החשמליות וממיר אותן לערכים דיגיטליים. בעוד שמתחרים יכולים להשתמש בכל תוכנה כדי לקבל מידע מועיל ממדידות האא"ג, כולם משתמשים בתוכנה שמכילה ארבעה שלבים [6]:

- סינון: מנקה את המדידות כדי להסיר "רעש" שנגרם על-ידי תנועות של העיניים או הראש.

ממשק מוח-מחשב (Brain-Computer Interface)

מכונה שקוראת את הפעילות החשמלית במוחו של האדם, מזקקת ממנה את הכוונות הרצויות של האדם ושולחת את המידע הזה למחשב.

סייבתלון (Cybathlon)

אירוע שבו אנשים בעלי מוגבלויות מתחרים במרוצים שונים בסיוע של טכנולוגיה.

אלקטרואנצפלוגרפיה (EEG)

תהליך של מדידת הפעילות החשמלית במוח באמצעות אלקטרודות שממוקמות על הקרקפת.

אלקטרודה (Electrode)

חתיכת חומר שמוליכה חשמל ומוקמת על אדם או חיה כדי למדוד את האותות מהגוף. אלקטרודות מחוברות למחשב באמצעות כבלים.

- זיקוק מאפיינים: מצמצם את כמויות המדידות הגדולות כדי לספק רק את המידע החשוב ביותר.
- זיהוי תבניות: מחפש תבניות במדידות המצומצמות כדי לזהות מה המשתמש רוצה לעשות: ללא פקודה, פקודה 1 (סיבוב), פקודה 2 (קפיצה), או פקודה 3 (החלקה).
- פֶּלֶט: שולח פקודה מזוהה למשחק המרוץ.

התוכנה המסוימת ששימשה בכל שלב הייתה שונה בין מתחרה למתחרה, והייתה לכך השפעה גדולה על ביצועי ממשק המוח-מחשב.

כדי ליצור פקודות משתמשים צריכים לחשוב על דברים מסוימים אשר גורמים לתבניות מסוימות של פעילות חשמלית במוח שממשק המוח-מחשב יכול לזהות ממדידות האא"ג. במרבית המקרים, המחשבות המסוימות האלה היו על הזזת איבר מסוים בגוף. לדוגמה, המשתתף היה יכול לחשוב על הזזת יד שמאל עבור פקודה 1, הזזת יד ימין עבור פקודה 2 והליכה עבור פקודה 3. במקרים מסוימים, מתחרים השתמשו בדמיון מנטלי. לדוגמה, המשתתפת יכלה לערוך חישובים מתמטיים בראש עבור פקודה 1.

משחק המרוץ

משחק רצי המוח (BrainRunners), פותח על-ידי אוניברסיטת ציריך לאומנויות והמכון הטכנולוגי של ציריך, שווייץ) מוצג באיור 1. המשחק הזה מאפשר לארבעה אנשים להשתמש בממשקי מוח-מחשב כדי לשלוט באווטורים שמתחרים על המסלול. המשחק מעוצב לממשקי מוח-מחשב היכולים לשלוח שלוש פקודות שונות. לכן, במסלול יש ארבעה סוגי מגרשים (תנאים שצריך לנווט בהם):

- שדה ללא קֶלֶט, שבו אין פקודה שצריכה להישלח.
- רוחות מסתובבות (בתכלת), שבו המשתמשים צריכים לשלוח הוראות "סיבוב" כדי להאיץ.
- מכשולי לֶבְנִים (בסגול), שבו המשתמשים צריכים לשלוח את פקודות ה"קפיצה" כדי לקפוץ מעל ללבנים.
- לייזרים (בצהוב), שבו המשתמשים צריכים לשלוח את פקודת ה"החלקה" כדי להחליק מתחת ללייזרים.

אם משתמש שולח את הפקודה הלא נכונה (למשל, "קפיצה" בשדה לייזר או פקודה כלשהי בשדה ללא הקלט), האווטאר שלו מאט. העיצוב הזה נבחר מאחר שלעיתים ממשקי מוח-מחשב שולחים פקודה למכונה אפילו כשהמשתמש לא רוצה לשלוח אף פקודה.

המתחרים שלנו

ממשקי מוח-מחשב משמשים בעיקר אנשים עם **טֶטְרַפְּלֶגְיָה** (חוסר היכולת להניע את הרגליים או הידיים), מאחר שממשקי מוח-מחשב מספקים דרכים לשימוש במחשבים עבור האנשים האלה. כל צוות כלל קבוצת מדענים ואדם אחד עם טטרפליגיה, שנקרא הטייס.

טֶטְרַפְּלֶגְיָה (Tetraplegia)

חוסר היכולת להזיז את הידיים והרגליים.

איור 1

צילום מסך של משחק רצי המוח (BrainRunners), שמאפשר לאנשים להתחרות באווטארים רובוטיים על מסלולים מקבילים. כל מסלול מכיל שדות "פעולה" שונים, שעליהם המתחרים צריכים לשלוח את הפקודה הנכונה באמצעות ממשק מוח-מחשב כדי להאיץ את האווטאר שלהם ("סיבוב" על התכלת, "קפיצה" על הסגול, "החלקה" על הצהוב), כמו גם שדות אפורים "ללא קלט", שבהם המשתמשים לא צריכים להשתמש בממשק המוח-מחשב. המשחק פותח על-ידי אוניברסיטת שווייץ לאומנויות, שווייץ.



איור 1

המדענים פיתחו ובנו את ממשק המוח-מחשב, והטייס שיחק במחשב. בסיבתלון 2016 השתתפו במרוץ ממשק המוח-מחשב אחד עשר צוותים מרחבי העולם. בפרט, הקבוצות היו מקושרות עם הגופים האקדמיים האלה: בית הספר הפוליטכני הפדרלי של לוזאן; אוניברסיטת רדבאוד; אוניברסיטת אסקס; האוניברסיטה הטכנית של דרמשטט; אוניברסיטת קוריאה; נירובוטיקה; אוניברסיטת אולסטר; אוניברסיטת מהידול; האוניברסיטה הקתולית של פזמניק פטר; האוניברסיטה הטכנית של גרץ ובית הספר העליון של ליון. הטייסים היו בני 27-56 וסבלו כולם מפגיעות בעמוד השדרה.

בסיבתלון היו לנו תחילה שלושה מרוצי מוקדמות עם ארבעה טייסים בכל מרוץ. כל מסלול כלל ארבעה שדות מכל סוג (ללא קלט, רוח, מכשול לבנים ולייזרים) בסדר אקראי. ארבעת הטייסים המהירים העפילו לגמר A בעוד שארבעת הטייסים שאחריהם העפילו לגמר B. תמונות של טייסי ממשקי המוח-מחשב מוצגות באיורים 2, 3.

תוצאות המרוץ

מרוץ רצי מוח עורך כ-200 שניות אם הטייס לא שולח פקודה דרך ממשק המוח-מחשב – האווטאר בסופו של דבר יגיע לקו הסיום בכל מקרה, רק לאט יותר. בשלבי המוקדמות הצוות המהיר ביותר (מבית הספר הפוליטכני הפדרלי של לוזן) השלים את המרוץ ב-90 שניות, בעוד שהצוות האיטי ביותר נזקק ל-196 שניות. בגמר, הצוות של בית הספר הטכני הפדרלי של לוזן ניצח שוב עם זמן של 125 שניות. היו כמה הבדלים בביצועים של הקבוצות במוקדמות ובגמר – לדוגמה, קבוצה אחת שהשלימה את המוקדמות ב-123 שניות נזקקה ל-190 שניות כדי להשלים את מסלול הגמר.

המרוץ הראה שממשקי המוח-מחשב יכולים להיות יעילים מאוד. זמן המרוץ הקצר ביותר (90 שניות) היה הרבה פחות מהזמן שנדרש אם הטייס לא היה שולח אף פקודה (200 שניות). אולם היכן שמתרחשות טעויות ממשקי המוח-מחשב הם כמעט חסרי תועלת – זמן התחרות

איור 2

טייס משתמש בממשק המוח-מחשב שלו כדי לשלוט במשחק רצי המוח. מבט מקדימה. מקור: ETH Della Zurich/Alessandro Bella. הקסדה שעל הראש מחזיקה את האלקטרודות הצהובות והאדומות במקומן, וכבל להעברת המידע יורד מהאלקטרודות למטה דרך חזהו של הטייס אל המחשב.



איור 2

איור 3

טייס משתמש בממשק המוח-מחשב שלו כדי לשלוט במשחק רצי המוח. מבט מאחור. מקור: ETH Della Zurich/Alessandro Bella. האלקטרודות (מרכז שחור עם קצוות לבנים ותחתיות צבעוניות) מוחזקות במקום על-ידי קסדה מיוחדת, והכבלים השחורים מחברים את האלקטרודות למחשב.



איור 3

האיטי ביותר היה 196 שניות, בקושי מהיר יותר מהמקרה שבו הטייס לא היה שולח פקודות כלל. על כן, חשוב להמשיך לפתח טכנולוגיות ממשק מוח-מחשב מדויקות ואמינות.

חולשה אחת של המרוץ הייתה שלא היינו מסוגלים להבין מדוע מכשיר ממשק מוח-מחשב אחד יעיל יותר מאחר. המתחרים ה"טובים ביותר" וה"גרועים ביותר" השתמשו בחומרה ובתוכנה דומות, ולכן ייתכן שההבדלים בזמני המרוץ היו קשורים למצב רוחם של המשתתפים או לכמות האימונים שבוצעו עם ממשק המוח-מחשב. בעתיד אנו נחקור את הגורמים האלה ביתר פירוט. אנו גם נחקור כמה מהר אותו המרוץ יכול להיות מושלם באמצעות סוגי טכנולוגיה שונים – לדוגמה, מכשיר שעוקב אחרי תנועות עיניים (eye tracker) במקום ממשק מוח-מחשב.

שיפורים ושימושים אפשריים לממשקי מוח-מחשב

אף על פי שבחנו את ממשקי המוח-מחשב רק במשחק מרוץ של רצי מוח, יש להם שימושים רבים. כפי שציינו, ממשקי מוח-מחשב כבר משמשים אנשים עם סטרפלגיה כדי לשלוט בכיסאות גלגלים [1] ולכתוב הודעות [2]. באירועי סייבתלון עתידיים אנו יכולים לדמיין שאנשים ישתמשו בממשקי מוח-מחשב להסיע כסאות גלגלים דרך מסלולי מכשולים במקום לשחק

במשחקי מחשב! ממשקי מוח-מחשב לא צריכים להיות מוגבלים לאנשים עם טטרפלגיה – סופרת מדע בדיוני כתבה סיפורים על שימוש בממשקי מוח-מחשב כדי לשלוט ברובוטים או אפילו בחלליות. הדברים האלה בהחלט אפשריים ברגע שממשקי המוח-מחשב ישופרו.

כיום, ממשקי מוח-מחשב מוגבלים בעיקר על-ידי כמות המידע שהאא"ג מספק. מאחר שהאא"ג חלש ורועש ממשקי המוח-מחשב איטיים ובלתי מדויקים. כשמתמשים בממשק מוח-מחשב כדי להקליד, לדוגמה, משתמשים יכולים להקליד רק 10 אותיות בדקה. לכן, ממשקי מוח-מחשב משמשים כיום בעיקר אנשים עם טטרפלגיה שאינם יכולים להשתמש במקלדות. אולם ממשקי מוח-מחשב עתידיים יוכלו, בתקווה, לקבל מידע מפורט יותר מהמוח, מה שיאפשר להם לבצע פקודות מדויקות יותר ויהפוך את הטכנולוגיה להיות אטרקטיבית לכולם.

חסקנות

משחק רצי המוח שלנו הוא דרך אפקטיבית למדוד את יעילותה של טכנולוגיית ממשק המוח-מחשב, מאחר שהוא יכול להתחבר לכל ממשק מוח-מחשב ולספק תוצאה אשר קל להבין אותה (הזמן שנדרש כדי להשלים את המרוץ). בסיבתלון הדגמנו שחלק ממשקי המוח-מחשב הרבה יותר יעילים מאחרים, כאשר זמני השלמת המרוץ נעו בין 90 שניות ל-196 שניות. בעתיד נוכל לדמות תרחישים שונים במרוץ על-ידי, למשל, הגברת זמן הענישה על שליחת פקודה שגויה.

מאחר שהמרוץ שלנו היה ההשוואה הרצינית הראשונה בין טכנולוגיות ממשק מוח-מחשב בתרחיש מציאותי, אנו מאמינים שהשיטה הזו תוכל לשמש חוקרים ומפתחים בתעשייה כדי להעריך את יעילותו של ממשק המוח-מחשב שלהם. יתרה מזו, משחק רצי המוח יכול לשמש לחקור כיצד גורמים שונים משפיעים על ביצוע ממשק המוח-מחשב. זה יאפשר למדענים לקבל תמונה שלמה של האופן שבו גורמים שונים משפיעים על ממשקי מוח-מחשב שונים באוכלוסיות מסוימות, מה שיסלול את הדרך לשימוש רחב יותר בטכנולוגיות ממשק מוח-מחשב בחיי היומיום.

מאמר המקור

Novak, D., Sigrist, R., Gerig, N. J., Wyss, D., Bauer, R., Götz, U., et al. 2018. Benchmarking brain-computer interfaces outside the laboratory: the Cybathlon 2016. *Front. Neurosci.* 11:756. doi: 10.3389/fnins.2017.00756

מקורות

1. Carlson, T., and Millán, J. del R. 2013. Brain-controlled wheelchairs: a robotic architecture. *IEEE Robot. Autom. Mag.* 20:65–73. doi: 10.1109/MRA.2012.2229936
2. Sellers, E. W., Ryan, D. B., and Hauser, C. K. 2014. Noninvasive brain-computer interface enables communication after brainstem stroke. *Sci. Transl. Med.* 6:257re7. doi: 10.1126/scitranslmed.3007801

3. Tangermann, M., Müller, K.-R., Aertsen, A., Birbaumer, N., Braun, C., Brunner, C., et al. 2012. Review of the BCI competition IV. *Front. Neurosci.* 6:55. doi: 10.3389/fnins.2012.00055
4. Riener, R. 2016. The Cybathlon promotes the development of assistive technology for people with physical disabilities. *J. Neuroeng. Rehabil.* 13:49. doi: 10.1186/s12984-016-0157-2
5. Novak, D., Sigrist, R., Gerig, N. J., Wyss, D., Bauer, R., Götz, U., et al. 2018. Benchmarking brain-computer interfaces outside the laboratory: the Cybathlon 2016. *Front. Neurosci.* 11:756. doi: 10.3389/fnins.2017.00756
6. Blankertz, B., Tomioka, R., Lemm, S., Kawanabe, M., and Muller, K.-R. 2008. Optimizing spatial filters for robust EEG single-trial analysis. *IEEE Signal Process. Mag.* 25:41–56. doi: 10.1109/MSP.2008.4408441

פורסם אונליין: 24 באוגוסט 2021

נערך על ידי: Xi-Nian Zuo, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, China

ציטוט: Novak D, Sigrist R and Riener R (2021) מרוץ ממשק מוח-מחשב בסיבתלון 2016. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2019.00087-he

תורגם והותאם:

Novak D, Sigrist R and Riener R (2019) Brain-Computer Interface Racing at the Cybathlon 2016. *Front. Young Minds* 7:87. doi: 10.3389/frym.2019.00087

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

COPYRIGHT © 2019 © Novak, Sigrist and Riener. 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 למחבר(ים) המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתיקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

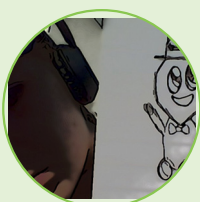
סוקרות צעירות

AMANDA, גיל: 13

היי! אני ילדה שמחה שאוהבת לעזור לאחרים.

EMMA, גיל: 14

אני אוהבת רישום ומדע ולכן הפרויקט הזה עם מדענים אמיתיים ופעילויות הרישום שהיו מעורבות בו היה כף גדול עבורי. למדתי הרבה על משחקי מרוץ עם ממשק מוח-מחשב. שילוב של תלמידים צעירים במדע הוא דרך כיפית מאוד עבורנו, הנוער, להתעניין במדע, וזה מגדיל את הסיכויים שנרצה לעסוק במדע כשנהיה מבוגרים. אני ו-Froot loops מודים לכם על ההזדמנות הזאת.





HANNA, גיל: 14

בזמני הפנוי אני נהנית לקרוא, לשחק כדורסל ולחקור מדע! החלק האהוב עליי במדע הוא כימיה מאחר שישנם כל כך הרבה אלמנטים שאפשר ללמוד עליהם.

הכותבים

DOMEN NOVAK

Domen Novak השלים את הדוקטורט שלו בהנדסת חשמל באוניברסיטת לובליאנה בשנת 2011. הוא עשה פוסט-דוקטורט במעבדת המערכות הסנסו-מוטוריות במכון הטכנולוגי של ציריך, שווייץ, בין 2012 ל-2014, וכיהן כפרופסור להנדסת חשמל ומחשבים באוניברסיטת וויומינג מאז 2014. תחומי העניין שלו כוללים רובוטי שיקום, הפעילות החשמלית של גוף האדם, מציאות מדומה ואינטראקציות אדם-מכונה. *dnovak1@uwyo.edu

ROLAND SIGRIST

Roland Sigrist קיבל את התואר השני והדוקטורט שלו מהמכון הטכנולוגי של ציריך בשנים 2009 ו-2014, בהתאמה. המחקר שלו נערך במעבדת המערכות הסנסו-מוטוריות והתמקד בלמידת תנועות מורכבות בסיוע של טכנולוגיה. לאחר השלמת הדוקטורט שלו הוא מונה לראש הסייבתלון והוביל את המאמצים הארגוניים והשיווקיים של תחרויות הסייבתלון של 2016 ושל 2020s.

ROBERT RIENER

Robert Riener קיבל את הדוקטורט שלו בהנדסה מהאוניברסיטה הטכנית של מינכן בשנת 1997. אחרי עבודת פוסט-דוקטורט במרכז לביו-הנדסה, בפוליטכניון של מילנו, הוא חזר לאוניברסיטה הטכנית של מינכן וקיבל את אישור ההכשרה שלו בביומכטרוניקה ב-2003. הוא הצטרף כפרופסור למכון הטכנולוגי של ציריך בשנת 2003. מאז שנת 2010 הוא פרופסור מלא למערכות סנסו-מוטוריות. הוא בעל פרופסורה כפולה עם אוניברסיטת ציריך ולכן הוא גם פעיל במרכז לפציעות עמוד שדרה בבית החולים האוניברסיטאי בלגריסט, ציריך. תחומי העניין שלו מערבים ניתוח של תנועה אנושית, מציאות מדומה, אינטראקציות אדם-מכונה ורובוטי שיקום. Robert Riener הוא היוזם של הסייבתלון.

Hebrew version
provided by

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

