



מי קופץ ראשון? עבודת צוות של שלושה אנשים במרחבי משחק סימטריים ואסימטריים

Akifumi Kijima^{1*}, Hiroyuki Shima², Motoki Okumura³, Yuji Yamamoto⁴, Michael J. Richardson⁵

¹המחלקה לחינוך, אוניברסיטת יאמאנאשי, קופו, יפן

²המחלקה למדעי הסביבה, אוניברסיטת יאמאנאשי, קופו, יפן

³המחלקה למדעי החינוך לספורט ואמנות, אוניברסיטת טוקיו גאקווג'י, קוגאג'י, יפן

⁴המרכז לחקר הבריאות, הכושר והספורט, אוניברסיטת נאגויה, נאגויה, יפן

⁵המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת מקוורי, סידני, ניו סאות' וויילס, אוסטרליה

סוקרת צעירה

IAGO

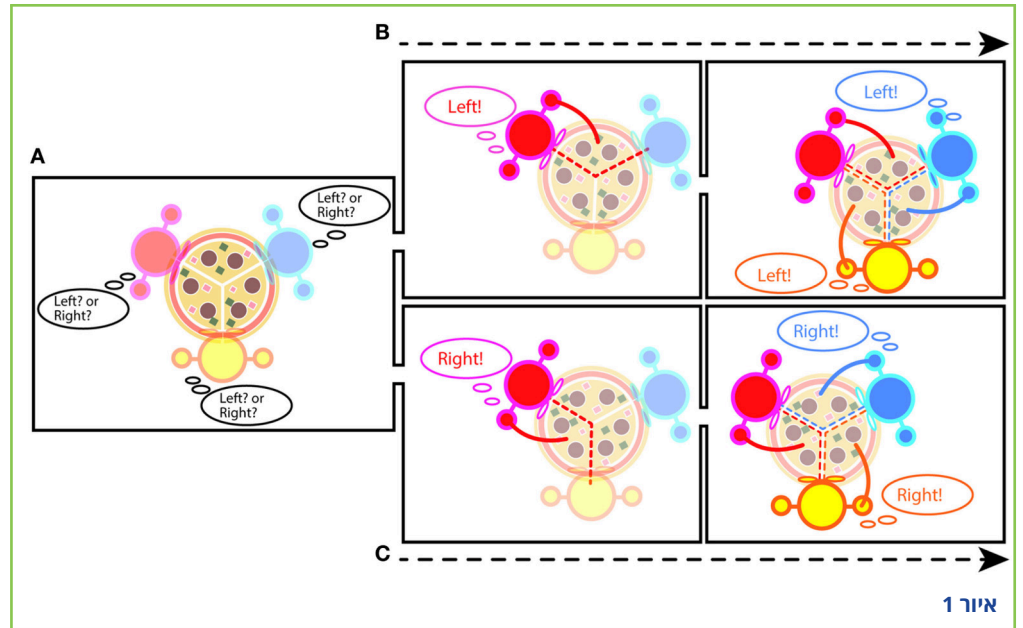
גיל: 11



בחיי היומיום קורה לעתים קרובות ששני אנשים פועלים בתיאום באופן טבעי ובלתי שסיכמו זאת מראש. מחקר זה עסק בתיאום פעולות בין שלושה משתתפים במשחק קפיצה. בניסוי התברר שהשלישיות פעלו לפי אחד משני דפוסי תיאום, תלוי בצורה של מרחב הקפיצה: כאשר האזור הסמוך לכל שחקן היה ערוך באופן זהה (כלומר, כל המערך היה סימטרי), הייתה לכל שחקן הזדמנות שווה להיות הקופץ המוביל (הראשון). אבל כשהמרחב לא היה סימטרי, רק שחקן שהיה לידו מקום פנוי הוביל את הקפיצה. המשתתפים לא קיבלו הוראות להתנהג באופן כזה, ולא היו ביניהם תקשורת מילולית או תכנון מראש. המסקנה היא שעבודת הצוות ביניהם (דפוס שבירת הסימטריה) השתנתה לפי הסימטריה של מרחב הקפיצה.

איור 1

דוגמה לשבירת סימטריה: **A.** שלושה אנשים יושבים סביב פיצה. הפיצה היא סימטרית. כל סועד יכול לקחת את השליש שמימינו או שמאלו. **B.** אם אדם אחד לוקח את המשולש שמאלו, כל הסועדים האחרים הופכים פתאום ל"בעלים" של המשולשים שמאלם בלבד. **C.** ולהיפך – אם אדם אחד לוקח את המשולש שמימינו, כל הסועדים האחרים הופכים פתאום ל"בעלים" של המשולשים שמימינם.



איור 1

קחו לכם פיצה!... משמאל או מימין?

תארו לכם שאתם ועוד שני חברים יושבים לאכול פיצה טעימה שמחולקת לשלושה חלקים שווים. תארו לכם גם שהחתך בין שני חלקים נמצא בדיוק מולכם, ושאתם מתבקשים לקחת את המשולש הראשון (איור 1A). אתם יכולים כמובן לבחור במשולש שמימינכם או במשולש שמאלכם. אבל מרגע שתבחרו, לחברים שלכם לא יהיה חופש בחירה כזה: בעצם הם יכולים רק לבחור במשולש הנמצא, יחסית אליהם, באותו צד שבחרתם אתם (איורים 1B ו-1C).

זוהי דוגמה לשבירת סימטריה. **סימטריה**, בהקשר זה, פירושה ששני צדי התמונה נראים זהים לכל המעורבים בדבר. כל עוד אף אחד מהנוכחים לא לקח משולש פיצה, יש לכל אחד מהם אפשרות לבחור במשולש שמאלם או במשולש שמימינם (איור 1A). ברגע שהסימטריה נשברת, המצב כבר לא זהה בשני הצדדים. בדוגמה שלנו, אחרי שהמשתתף הראשון לוקח את משולש הפיצה שמימינו, כל המשתתפים האחרים ייקחו גם הם את המשולשים שמימינם (איורים 1B, 1C). כלומר, כל משתתף יהיה ה"בעלים" של המשולש שמימינו בלבד, והמשולש שמאלו יהיה "שייך" למשתתף שמאלו. ברגע שאדם אחד בוחר משולש פיצה, הסימטריה שבמצב נשברת, והבחירה שלו מתפשטת גם בשאר הקבוצה. כך נשבר המצב הסימטרי והופך למצב לא סימטרי (ראו גם מילון מונחים).

שבירת סימטריה היא חשובה כי היא ממלאת תפקיד לא רק באופן שבו קבוצות של יחידים אוכלות פיצה, אלא גם קובעת את דפוסי ההתנהגות של יחידים כשהם עושים מגוון פעולות. למשל, כאשר שני אנשים הולכים זה מול זה ברחוב, מי שזז ראשון שמאלה או ימינה כדי לפנות את הדרך קובע לאיזה כיוון יזוז זה שבא מולו. רובנו נתקלנו במצבים כאלה בחיי היומיום. רובנו גם ראינו, כמובן, מה קורה כשהסימטריה לא נשברת: ריקוד קטן ומסורבל שבו אתם והאדם שמולכם זזים זה מול זה מצד לצד. במצב זה, ובתחום ההתנהגות החברתית (והאישית) בכלל, שבירת סימטריה היא חיונית לארגון יעיל של התנהגות ופעולה. היא קובעת איך יחידים ינועו יחד בתיאום. לכן, אם נלמד איך שבירת סימטריה משפיעה על ההתנהגות והיחסים החברתיים

שבירת סימטריה (Symmetry breaking)

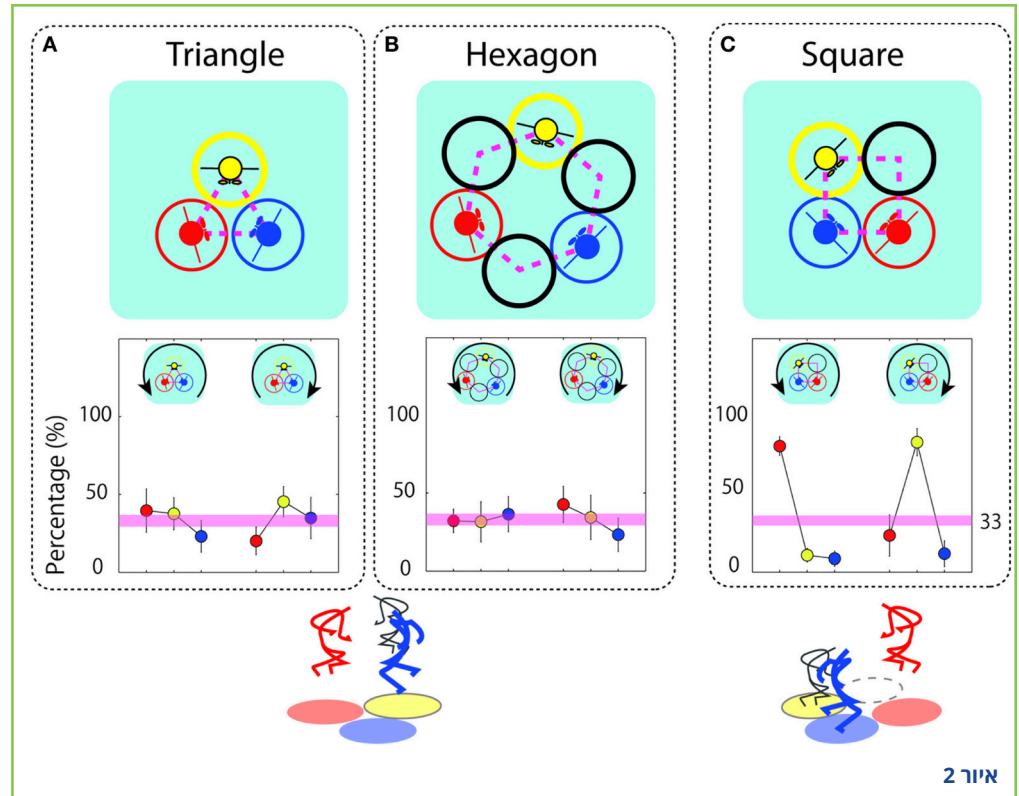
תופעה ספונטנית (מתרחשת מעצמה, טבעית) של מעבר מערכת במצב סימטרי למצב לא סימטרי

סימטריה (Symmetry)

עצם (או פעולה) הנראה זהה כאשר הופכים או מסובבים אותו. למשל, לאות M יש סימטריה אנכית, ולאות E סימטריה אופקית.

איור 2

מספר הפעמים שבהן כל שחקן הוביל את הקפיצה. **A.** במערך המשולש, **B.** במערך המרובע, **C.** במערך המרובע. בחלק העליון של כל תרשים, רואים את מיקום החישוקים והשחקנים, ובחלק התחתון – גרף המראה בכמה מהקפיצות הוביל כל שחקן. כל גרף מחולק לשניים – נגד כיוון השעון (צד שמאל) ועם כיוון השעון (צד ימין). במערכים הסימטריים (המשולש והמרובע), מספר הפעמים שבהן כל שחקן קפץ ראשון היה כמעט שווה – סבירות של 33% (100/3). מסומן בקו (רוד). לעומת זאת, במערך האסימטרי (המרובע), מי שקפץ ראשון היה כמעט תמיד רק מי שהיה לידו מקום פנוי בכיוון הקפיצה.



של בני אדם, נוכל להבין לעומק איך קבוצות של יחידים מצליחות לחלוק מרחב משותף (כמו למשל מעבר חציה, משרד, או מגרש משחקים).

מי יהיה המוביל במשחק קפיצה של שלושה שחקנים?

אם נחזור לדוגמה עם הפיצה, ההשערה שלנו לגבי שבירת הסימטריה הייתה שמי שלוקח את המשולש הראשון קובע את מיקומי המשולשים ה"שייכים" לאחרים. בדקנו את ההשערה הזאת באמצעות משימה קצת יותר קשה (ופחות מלכלת) מאכילת פיצה: משימת קפיצה בשלישייה. בשרטוט השמאלי העליון באיור 2 תראו במבט מלמעלה את שטח המשחק הראשון: שלושה חישוקים מונחים בצורת משולש. כל שחקן (השחקנים מסומנים בנקודה אדומה, נקודה צהובה ונקודה כחולה) התבקש לעמוד במרכז חישוק אחר. השמענו מקצב חוזר של שלושה צלילים עם מרווח של שנייה ביניהם: "טיק-טוק-פינג". מדי שלוש שניות, כל פעם שנשמע הצליל "פינג", נדרשו שלושת המשתתפים לקפוץ בבת אחת ימינה או שמאלה לחישוק אחר. כדי להצליח, היה על שלושתם לקפוץ לאותו כיוון על מנת לא להתנגש. הם התבקשו להמשיך לשחק עד ששיגו 20 הצלחות כאלה.

בדקנו מי מהשלושה קפץ ראשון בקפיצות מוצלחות (ללא התנגשויות). גילינו שכל שחקן קפץ ראשון בשליש מהקפיצות המוצלחות, כלומר 33% בערך, בלי קשר לחישוק שבתוכו עמד – כלומר, לכולם היו סיכויים שווים להיות "הקופץ המוביל" במשחק. שמנו לב גם לכך שהמשתתפים החליפו את כיוון הקפיצה מפעם לפעם, אף על פי שלא דיברו על כך מראש ולא קיבלו הוראות לגבי תיאום של כיוונים. השאלה המרכזית הייתה: "איך הם מצליחים במשימה הזאת?" אתם מוזמנים לנסות זאת בעצמכם עם חברים: בניסיונות הראשונים אולי יהיו לכם

כמה התנגשויות, אבל אחרי מעט תרגול באותה שלישייה תצליחו לקפוץ, וגם לשנות מדי פעם כיוון, ללא התנגשויות.

מה קורה כשמוסיפים חישובים?

בשלב הבא, הוספנו עוד שלושה חישובים, כך ששלושת השחקנים השתמשו כעת ב"לוח משחק" עם שישה חישובים (איור 2B). אם אתם רוצים לנסות זאת בעצמכם, סדרו שישה חישובים בצורת משושה ועימדו כך שבין כל שני שחקנים יהיה חישוב פנוי (והשחקנים עומדים כך שאפשר לשרטט ביניהם משולש שווה-צלעות). נסו שוב את משימת הקפיצה. האם היה שינוי?

ודאי גיליתם שגם בגירסת שלושת החישובים וגם בגירסת ששת החישובים, כל שחקן מוביל בתורו, כלומר לכל אחד יש סיכוי שווה לקפוץ ראשון. הגרף בתחתית איור 2B מבטא זאת. בתחילת כל סיבוב יש לכל שחקן אפשרויות פעולה זהות, כלומר יש סימטריה, וראינו שבמהלך המשחק השחקנים שוברים את הסימטריה לפי התור, פחות או יותר – אף שחקן לא היה תמיד הקופץ הראשון במערכי שלושת החישובים או ששת החישובים.

בשלב הבא בניסוי השתמשנו במערך של ארבעה חישובים, ודפוס הקפיצות השתנה לגמרי. בחלק העליון של איור 2C תראו את מערך ארבעת החישובים. הם הונחו בצורת ריבוע, והמשתתפים עמדו בשלושה מהם. כמעט בכל הקפיצות המוצלחות הוביל שחקן שעמד במיקום מסוים. מי? הביטו בחלק התחתון של איור 2C. השחקנים קפצו לפעמים בכיוון השעון ולפעמים נגדו. ברוב הסיבובים שבהם קפצו בכיוון השעון השחקן הצהוב היה המוביל (זה שקפץ ראשון), וברוב הסיבובים נגד כיוון השעון – השחקן האדום. כלומר, השחקן שהיה לידו חישוב פנוי בכיוון הקפיצה הפך למוביל.

התברר לנו שכאשר שלושה שחקנים שיחקו במערך משולש או משושה, לא היה קשר בין המיקום שלהם לשאלה מי יקפוץ ראשון. אבל כששטח המשחק היה מרובע, הוביל רק מי שהיה לידו מקום פנוי בכיוון הקפיצה. מה ההבדל בין הצורות הגיאומטריות שיוצרים השחקנים במערכי המשחק השונים? באיור 2B תראו שבמערכת המשושה יש ליד כל שחקן מקומות פנויים משני הצדדים. חישוב שוב על המונח "סימטריה": במערך המשולש אין מקום פנוי ליד אף שחקן, ובמערכת המשושה יש שני מקומות פנויים ליד כל שחקן. לכן בשני המערכים ההעמדה של השחקנים היא סימטרית. עכשיו נסתכל על המערך המרובע באיור 2C: לשחקן הכחול אין כלל מקום פנוי לידו, לשחקן הצהוב יש מקום פנוי רק בכיוון השעון, ולשחקן האדום – רק בכיוון ההפוך מכיוון השעון. לכן המערך המרובע פחות סימטרי מהאחרים, שבהם לכל השחקנים יש מקום פנוי או שלכולם אין. אם כן, הצורה של מערך החישובים הסימטרי מכתובה את התיאום בין המשתתפים במשחק, כי לכל אחד מהם יש פוטנציאל לקפוץ ראשון ולהיות המוביל. לעומת זאת, במערך האסימטרי אין מקום פנוי שווה בין שחקן לשחקן. לכן, המשתתף שליידו יש מקום פנוי הוא בעל פוטנציאל גדול יותר להפוך למוביל.

“עבודת צוות” מצוינת אצל חיות הולכות על שתיים ועל ארבע

במשחק קפיצה של שלישייה, כל השחקנים נדרשו לקפוץ יחד כשהושמע צליל מסוים. השחקן שקפץ ראשון שבר את הסימטריה, ו"דפוס השבירה" השתנה לפי הצורה שבה החישוקים היו מונחים. כשהיו מונחים במשולש או במשושה, לכל שחקן היה (או לא היה) מקום פנוי לידו, בדיוק כמו לכל שחקן אחר. במערכים הסימטריים האלה היה לכל שחקן סיכוי שווה להיות המוביל – כלומר, הייתה סימטריה גם בין התפקידים. לעומת זאת, במערכים אסימטריים כמו זה שבו יש ארבעה חישוקים ושלושה שחקנים, הוביל רק מי שנמצא במיקום מסוים (שלידו היה מקום פנוי), כך שגם תפקיד המוביל התאפיין באסימטריה. יש ענף מתמטי הנקרא "תורת החבורות", והוא עוסק בין השאר בדפוסים של שבירת סימטריה. באמצעות תורת החבורות אפשר לצפות את מערכת דפוס הסיבוב האפשריים שלא ישנו את צורת הארגון. אם מסתכלים במערכים השונים באיור 2, קל לראות שהמערך המשולש והמערך המשושה הרבה יותר סימטריים מהמרובע. אם מתעלמים מהצבעים השונים המסמלים את השחקנים, אפשר למעשה לסובב את המערכים של שלושת החישוקים ושל ששת החישוקים ב-120, 240 או 360 מעלות, בלי שישתנו כלל. לעומת זאת, מערך ארבעת החישוקים ושלושת השחקנים יישאר כפי שהיה רק אם נסובב אותו ב-360 מעלות, כלומר סיבוב שלם שיחזיר אותו למקומו הקודם. שימו לב כיצד זה מתקשר להתנהגות של השחקנים: במשחקים שבהם יש שלושה או שישה חישוקים יש שלושה מובילים, אבל במשחק עם ארבעת החישוקים מובילים רק שני שחקנים (אחד לכל כיוון). יש הקבלה בין הסימטריה של מרחב המשימה לבין התנהגות המשתתפים.

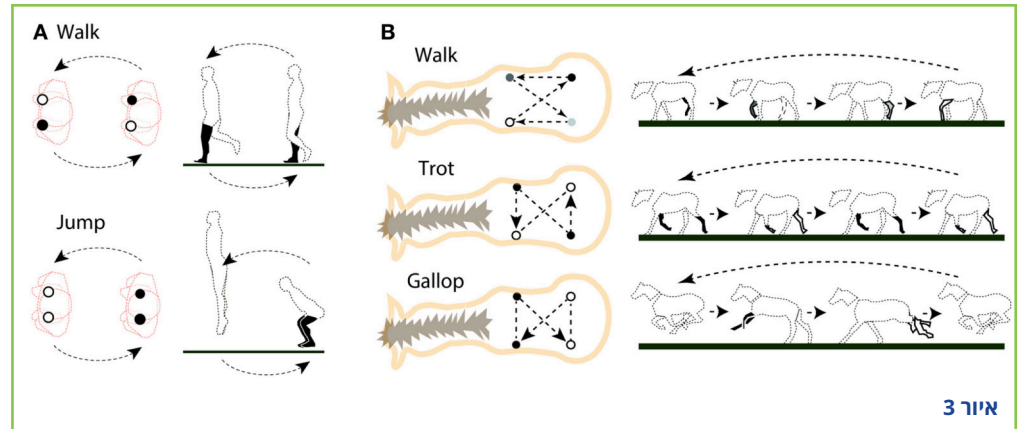
תורת החבורות ושבירת הסימטריה מגדירה לא רק איך יתנהגו השחקנים במשימת קפיצה בשלישייה, אלא גם, למשל, את דפוס ההליכה של אנשים ושל חיות. נניח לדוגמה שאתם עומדים עם שתי הרגליים על הקרקע. מתנוחה זו אפשר לנוע קדימה או אחורה. ברגע שגופכם מתחיל לנטות קדימה, רגל אחת תתרומם מהקרקע, ותהיו חייבים להתקדם. ההטיה של גופכם קדימה שוברת את הסימטריה שהתקיימה כששתי רגליכם היו על הקרקע, ומתגלה איך מאורגנת פעולת ההליכה שלכם. קפיצה היא עוד דפוס שאפשר לצפות אותו מראש אם מבינים את הסימטריה של מערכת דו-רגלית (איור 3A).

גולוביצקי ועמיתיו [1] מסבירים שלפי תורת החבורות, אפשר לצפות שישה דפוסים תנועה אצל חיה עם ארבע רגליים. באיור 3B מופיעים שלושה מתוך ששת הדפוסים, ביניהם הליכה של סוס. כאשר הסוס מגביר את קצב ההליכה ועובר לריצה קלה (שורה אמצעית באיור 3B), הוא מרים ומוריד בכל פעם רגל קדמית אחת יחד עם הרגל האחורית הנגדית. כאשר הוא מאיץ עוד יותר ועובר לדהרה, שתי הרגליים האחוריות נוחות בבת אחת על הקרקע ואז בועטות בה – אחרי קפיצה, הוא נוחת על הקרקע בשתי הרגליים הקדמיות (שורה תחתונה של איור 3).

הסוס מצליח לבצע מעברים חלקים בין דרכי תנועה שונות הודות למבנה מערכת העצבים שלו, ששולחת אותות לשרירי ארבע הרגליים. ההשערה שלנו היא שגם המשתתפים במשימת קפיצה מקושרים זה לזה – לא באמצעות מערכת עצבים משותפת, כמובן, אלא באמצעות ראייה: כך הם מאותתים זה לזה מה הם מתכננים לעשות, ומקבלים מידע על התכניות של האחרים. השחקנים – וגם הסוסים, כמובן – לא מכירים כלל את המתמטיקה המסובכת של תורת החבורות, או הסימטריה. אבל ההתנהגות שלהם מאורגנת לפי הכללים המתמטיים האלה. אנחנו משערים שחוקי הסימטריה ושבירת הסימטריה נכונים גם למצבים אחרים,

איור 3

סימטריות של מצב הרגליים בהליכה ובקפיצה. **A** מצבי הרגליים אצל בני אדם בהליכה (למעלה) ובקפיצה (למטה). נראה הגוף במבט מלמעלה (בכתום). עיגול שחור מסמל רגל על הקרקע, ועיגול לבן – רגל באוויר. החיצים מראים את כיוון ההחלפה בין מצבי הרגליים. מימין נראה שינוי התנוחה במבט מהצד. גם כאן הרגל על הקרקע מסומנת בשחור, וזו שבאוויר – בלבן. **B** מצב הרגליים אצל סוס בהליכה מהירה/ריצה קלה (באמצע) ובדהירה (למטה). משמאל נראה הסוס במבט מלמעלה, והחיצים מראים את סדר הנחיתה של הפרסות על הקרקע. שני עיגולים המחוברים בקו מקווקו בלי חץ מייצגים פרסות הנוחתות על הקרקע באותו זמן. מימין נראה השינוי בתנוחת הסוס במבט מהצד. הרגליים שעל הקרקע מסומנות בשחור, ואלו שבאוויר – בלבן.



כמו דפוסי עבודת-הצוות שאפשר לראות במשחקי כדורגל וכדורסל, ובסוגים רבים אחרים של התנהגות אנושית.

מאמר המקור

Kijima, A., Shima, H., Okumura, M., Yamamoto, Y., and Richardson, M. J. 2017. Effects of agent-environment symmetry on the coordination dynamics of triadic jumping. *Front. Psychol.* 8:3. doi: 10.3389/fpsyg.2017.00003

מקורות

1. Golubitsky, M., and Stewart, I. 2003. *The Symmetry Perspective: From Equilibrium to Chaos in Phase Space and Physical Space*. Vol. 200. Springer Science & Business Media.

פורסם אונליין: 10 באוקטובר 2019

נערך על ידי: Sabine Kastner, Princeton University, United States

ציטוט: Kijima A, Shima H, Okumura M, Yamamoto Y and Richardson MJ (2019) מי קופץ ראשון? עבודת צוות של שלושה אנשים במרחבי משחק סימטריים ואסימטריים. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2018.00005-he

תורגם והותאם:

Kijima A, Shima H, Okumura M, Yamamoto Y and Richardson MJ (2018) Who Should Jump First? Three Peoples' Teamwork in a Symmetrical and Asymmetrical Game Space *Front. Young Minds* 6:5. doi: 10.3389/frym.2018.00005

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

זהו Kijima, Shima, Okumura, Yamamoto and Richardson 2019 © 2018 © **COPYRIGHT** מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון **Creative Commons Attribution License (CC BY)**. השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחבר(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

IAGO, גיל: 11

שמי יאגו ואני בכיתה ה'. המקצועות שאני אוהב הם כתיבה, מתמטיקה ומדעים. התחביבים שלי הם לחימה בחרבות משחק, בניית מכשירים אלקטרוניים, שחייה, וקיבלול. לדעתי חשוב שמדענים יכתבו בשביל ילדים, כדי שהילדים ילמדו לחשוב באופן ביקורתי ולנסות להבין איך העולם עובד. אמא ואבא שלי הם מדענים "משוגעים", כי הם תקעו קלף בתוך מוח כדי לעשות קסם - מזל שהמוח היה עשוי מגליל!

הכותבים

AKIFUMI KIJIMA

פרופסור לחינוך גופני באוניברסיטת יאמאנאשי ביפן. בני אדם מתנהגים בצורות שונות במרחבים צפופים, ובמדינות אסיה יש מקומות צפופים רבים. לכן אני מתעניין במנגנונים של התנהגות קבוצתית אנושית. גם כשאנשים לא יודעים לאן האחרים במרחב המשותף רוצים ללכת, כל אחד מהם מצליח להתקדם לכיוון שלו בלי התנגשות. אני מנסה להבין כיצד זה קורה, על ידי התבוננות בהתנהגות של קבוצות שונות, למשל של תלמידים או של שחקני פוטבול מקצועיים. *akijima@yamanashi.ac.jp

HIROYUKI SHIMA

אני מומחה לפיזיקה, העובד באוניברסיטת יאמאנאשי ביפן. אני מתעניין בענף של מדע הנקרא "פיזיקה בינתחומית", הוא עוסק בנושאי מחקר השייכים גם לפיזיקה וגם לתחומים אחרים כמו ביולוגיה, פסיכולוגיה, גיאולוגיה וכו'. במחקר המתואר במאמר זה אנחנו מגלים שהתנועה של הגוף האנושי תלויה לא רק ברצון של אדם יחיד אלא גם בחוקי המתמטיקה. תגלית זו יכולה לעזור לנו להבין טוב יותר את טבע האדם.

MOTOKI OKUMURA

אני עובד באוניברסיטה שלי כמרצה וכחוקר בפסיכולוגיה של ספורט ואימון, ומשמש גם מאמן ראשי לקבוצת הקנדו (סיף יפני). כחוקר אני מתעניין בכישורים קוגניטיביים ומוטוריים ובשיטות אימון בספורט תחרותי בין-איש. אנחנו חוקרים כבר זמן רב את הבדלי הכישורים בין שחקנים מומחים ושחקנים ברמת ביניים עם ניסיון עשיר באתלטיקה. אנחנו מקווים שהמצאים שלנו יביאו תועלת בתחומי מדעי הספורט והאתלטיקה.

YUJI YAMAMOTO

פרופסור במרכז לחקר הבריאות, הכושר והספורט באוניברסיטת נאגויה שביפן, והמזכיר הכללי של האגודה היפנית לפסיכולוגיית ספורט. כחוקר הוא מתעניין בלמידה ושליטה מוטורית, ובייחוד בדינמיקה בספורט. הוא מתמקד בהתנהגויות אנושיות בתחום הספורט, למשל בטניס, כדורגל, תופסת וקנדו, ושואף להבין את העקרונות המכתיבים את מעשינו. מסתבר שבני אדם מסוגלים לעשות תנועות מורכבות במרחב על בסיס עקרונות פשוטים.



**MICHAEL J. RICHARDSON**

ד"ר ריצ'רדסון הוא פרופסור לפסיכולוגיה באוניברסיטת מקוורי שבסידני, אוסטרליה. במחקרו הוא שואף להבין את חוקי הדינמיקה של התפישה, הפעולה והקוגניציה האנושיות. תחומי המומחיות שלו הם פסיכולוגיה ניסויית ויישומית, מדעים קוגניטיביים, מדעי התנועה האנושית, קליטה-פעולה, פעולה משולבת ותיאום חברתי, מציאות וירטואלית, מערכות מורכבות, ומידול דינמי.

Hebrew version
provided by

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

