

שיקום הליכה בעזרת אדפטציה מוטורית על הליכון עם מסילה מפוצלת

סקירה

מור מוזר¹

¹ סטודנטית לפיזיותרפיה, שנה ד', אוניברסיטת בן גוריון. בהנחיית: ד"ר סימונה בר-חיים, המעבדה לבקרה מוטורית ושיקום הליכה והמחלקה לפיזיותרפיה, הפקולטה למדעי הבריאות אוניברסיטת בן גוריון.

תקציר

הקדמה: אדפטציה היא השלב הראשון בתהליך הלמידה המוטורית. הליכון בעל מסילה מפוצלת מאפשר לחקור את האדפטציה המוטורית ואת הניידות האנושית, ולחפש כיוונים חדשים של טכניקות שיקום. מטרת הסקירה היא לספק מידע ראשוני על המחקרים ועל המשמעויות הקליניות של למידה מוטורית לאחר אימון על הליכון בעל מסילה מפוצלת.

שיטות: חיפוש במאגרי המידע PubMed ו-Google Scholar על פי מילות המפתח:

"split belt treadmill", "motor adaptation", "central pattern generators", "motor learning" והשילובים ביניהן. בסקירה נכללו מאמרים משנת 1990.

תוצאות הסקירה: בסקירה נכללו 23 מאמרים. מחקרים על אדפטציה מוטורית בעזרת הליכון בעל מסילה מפוצלת הראו שהיא מאפשרת הסתגלות מהירה לתנאים משתנים, ותורמת לדיוק בתנועה, לסימטריה, ליציבות ולחיסכון באנרגיה. נמצא שיכולת זו נשמרת אצל מטופלים לאחר פגיעות מוחיות שונות, אך לא אצל מטופלים עם פגיעה בצרבלום.

תרגול חוזר במשך שבועות של אדפטציה ודה-אדפטציה מביא ללמידה מוטורית, כלומר לאחסונה של תכנית מוטורית חדשה שאפשר לשלוף אותה ולהשתמש בה בעת הצורך. נמצא שהמעבר מאדפטציה ללמידה מושפע מהריכוז בביצוע לעומת הסחת הדעת ממנו, ומהגיל.

דיון ומסקנות: אדפטציה מוטורית באמצעות הליכון בעל מסילה מפוצלת מרחיבה את סל הכלים העומד לרשות הפיזיותרפיה, ויכולה לשמש בשיקום הליכה במטופלים עם א-סימטריה בהליכה על רקע פגיעה מוחית. יש לחקור בעתיד מהם מאפייני השימוש היעילים ביותר בהליכון זה.

מילות מפתח: שיקום הליכה, אדפטציה מוטורית, הליכון עם מסילה מפוצלת, למידה מוטורית, "Central pattern generator".

הסקירה נעשתה במסגרת המחויבות לכתוב עבודה מדעית לקראת קבלת תואר בפיזיותרפיה.

הקדמה

אדפטציה היא השלב הראשון בתהליך הלמידה המוטורית, והיא נחקרה באמצעים שונים: משקפי מנסרה¹, הליכה במסלול סיבובי על הליכון מעגלי², ורובוט אורטוטי שמפעיל כוחות על הרגל במהלך הליכה³. כלי נוסף המשמש לחקר מרכיביה ומאפייניה השונים של האדפטציה הוא הליכון בעל מסילה מפוצלת - הליכון שבו יש מנוע נפרד לכל מסילה, המאפשר להניע אותה במהירויות שונות ואף בכיוונים שונים. מאמר זה סוקר את המעגלים העצביים בחוט השדרה, שמייצרים את התנועות הריתמיות עליהן מבוססת הניידות, את האדפטציה המוטורית המאפשרת לנו לבצע פעולות בקלות גם בתנאים משתנים, ואת המסילה המפוצלת: מערכת המאפשרת לחקור את האדפטציה המוטורית ותורמת ידע חדשני על הניידות האנושית. הידע שנרכש עד כה משמש כבר עכשיו בפיתוח כיוונים חדשים בשיקום הליכה.

מטרת הסקירה היא לספק מידע ראשוני על המחקרים ועל המשמעויות הקליניות של למידה מוטורית לאחר אימון על הליכון בעל מסילה מפוצלת.

כהקדמה מתוארים המנגנונים העצביים בחוט השדרה, וכן המודלים הבוחנים את פעילות ה-CPG - Central Pattern Generator.

הליכה היא פעולה מורכבת, הדורשת קואורדינציה של הגו ושרירי הגפיים ומשלבת מפרקים רבים. כיצד אפוא מערכת העצבים מצליחה להשלים אותה בהצלחה - זו שאלה שאתגרה חוקרים רבים. בראון (Brown, 1911)⁴, בניסוי שערך בדק את קיומם של מעגלים עצביים בסיסיים בחוט השדרה אשר אחראים לניידות. הוא חתך לחתולים את שורשי העצבים הדורסליים בעמוד השדרה, והראה שלמרות זאת הם עדיין ייצרו כיווצים ריתמיים לסירוגין של הפלקסורים

והאקסטנסורים של הקרסול. הכיווצים הריתמיים הללו נקראים "ניידות פיקטיבית".

יצירת תנועה תבניתית מוטבעת גם באדם; כבר מיד לאחר הלידה אפשר לצפות בתנועות דמויות צעדים אצל תינוקות. הן קורות באופן ספונטני או לאחר גירוי פריפרי. תנועות כאלו נצפו גם בתינוקות אנ-אנצפליים, דבר שמרמז על כך שהבקרה על תנועות אלה נמצאת במרכזים מוחיים נמוכים, כמו חוט השדרה.⁴

בהמשך, בניסויים נוספים שנערכו בבעלי חיים שונים, הוכח שרשת של אינטר-נוירונים בחוט השדרה מסוגלת לייצר ניידות פיקטיבית.^{5,6}

Central Pattern Generator (CPG) מוגדר כמעגל עצבי שיכול לייצר לאורך זמן תבניות התנהגות עצמאיות מקלט סנסורי. הבנת העקרונות הבסיסיים של ה-CPG מבוססת בעיקר על מחקרים בבעלי חיים, ואילו בבני אדם ההשערות מבוססות בעיקר על עדויות עקיפות.

תנועות צעידה ריתמיות הן תנאי הכרחי, אך אין בו די לקיום הליכה תפקודית בסביבות משתנות. להליכה תפקודית יש דרישות נוספות, כמו שיווי משקל, הימנעות ממכשולים והתאמה לתנאי הסביבה. מידע סנסורי ממגוון מקורות: ויזואלי, וסטיבורי ופרופריוספטיבי, מגיע לחוט השדרה, ובשילוב עם תכנון התנועה ועם המשימה, נקבעים כוח השרירים ואילו קבוצות סינרגיסטיות יופעלו. כך מתאפשרת הליכה תפקודית. כנראה שנקודה קריטית בתהליך זה היא נקודת המפגש בין מסלולי הרפלקס הספינלי ובין המסלולים היורדים.

פגיעה מרכזית כמו אירוע מוחי או פגיעת חוט שדרה, שפוגעים באינטראקציה בין הקלט הסנסורי ליצירת התנועה התבניתית, וגם פגיעה פריפרית כמו נירופתיה שפוגעת בקלט הסנסורי, מובילות לפגיעה בתנועה.⁴

גם אזורים סופרה-ספינלים פועלים בתיאום עם ה-CPG בעת הבקרה על ניידות:⁷ הם אחראים על הפעלת ה-CPG הספינלי, על השליטה על עוצמת פעילותו, על שמירת שיווי משקל במהלך ניידות, על התאמת תנועות הגפיים לסביבה ועל תיאום בין ניידות לפעולות נוספות. ל-CPG עצמו לא נותרת אלא השליטה ביצירת התבנית המורכבת של פעילות השרירים הנדרשת לניידות.

קיימים מודלים אחדים המתארים את פעילות ה-CPG כתכנית מוטורית אחת להפעלת שתי הרגליים או כתכנית

מוטוריות המפעילות כל רגל בנפרד.

ישנה הערכה שישנם מחוללי תבנית נפרדים לכל רגל, עצמאיים מהשפעת קואורדינציה בין-גפית. הערכה זו מבוססת על ניסוי שבו הלכו נחקרים כאשר שתי רגליהם זזות בקצב שווה, ולאחר מכן כאשר הן זזות בקצב שונה, ותבנית תזמון תנועת המפרקים נשארה זהה בשני המקרים.⁸

ה-CPG נחלק לשתי רמות שונות. הראשונה מייצרת תזמון (phasing) של התנועה, שמפעיל סט נוסף של נוירונים, הרמה השנייה, מייצרת תבניות תנועה שרירות.⁹ דוגמה שתומכת בכך קיימת במחקר שבו נמצא שפעוטות בני 2-11 חודשים ההולכים בתמיכה יכולים לשנות את כיוון ההליכה שלהם שוב ושוב ללא הפרעה בקצב ההליכה.¹⁰ למידה מוטורית אפוא יכולה לערב למידה של אילו צירופי CPG יש להפעיל כדי להפיק את הפקודה המוטורית המתאימה, ובאיזה סדר יש להפעיל אותם.⁷

משערים שפעולות לוקומוטוריות שונות, כמו הליכה, קפיצה וריצה אצל בני אדם, הליכה אצל חתולים או הליכה ושחייה אצל אפרוחים, אינן מתבצעות על ידי CPG נפרד לכל אחת מהן.⁷ אלא על ידי צירופים שונים של אותם אינטר-נוירונים ממאגר ה-CPG נוצר מגוון של מעגלים עצביים, עם היכולת לייצר תבניות מוטוריות שהן מאותה משפחה תפקודית, אך נפרדות זו מזו.

שיטות

חיפוש במאגרי המידע PubMed ו-Google Scholar על פי מילות המפתח:

"split belt treadmill", "motor adaptation"
"central pattern generators", "motor learning"

והשילובים ביניהן.

בנוסף, פנייה למאמרים שנסקרו וצוינו שצוינו במקורות של המאמרים שנסקרו.

נסקרו מאמרים החל משנת 2000, מלבד 5 מאמרים יוצאי דופן מהשנים 1992-1996, ומאמר אחד משנת 1985 שהיה פורץ דרך בתחומו.

בסקירה נכללו 23 מאמרים רלוונטיים באנגלית בלבד.

הליכון בעל מסילה מפוצלת - Split belt treadmill

זהו הליכון (Treadmill) בעל שתי מסילות נפרדות, אחת לכל רגל. לכל מסילה מנוע נפרד, ואפשר להניע אותן

של תנועה מניסיון לניסיון, כאשר משוב סנסורי מצביע על טעות בתכנון. בהתחלה, התנועה שומרת על זהותה כתנועה בעלת מטרה (למשל "Reaching"), אך מתרחשים שינויים בפרמטר אחד או יותר (כיוון או תבנית הפעלת הכוח). שלב זה נקרא אדפטציה מוקדמת. תהליך תיקון הטעויות מתרחש תוך חזרות או תרגול של ההתנהגות, ומסתיים תוך שניות או דקות. מרגע שהתרחשה האדפטציה, וההתנהגות מבוצעת ללא טעויות, אדם לא יכול לחזור מיד להתנהגות הקודמת. שלב זה נקרא אדפטציה מאוחרת. כאשר ינסה לבצע אותה בתנאים המקוריים הוא יראה "תגובת-אחרי" (After-effect) שלילית, ויצטרך לעשות דה-אדפטציה להתנהגות על ידי תרגול חוזר של הפעולה כדי לחזור לתבנית הביצוע המקורית.¹²

למה האדפטציה חשובה לאדם? היא מאפשרת למערכת העצבים שליטה גמישה בתנועה, שבאה לשימוש כאשר התנאים משתנים במהלך משימה. כמו כן, היא מאפשרת לרכוש תכניות מוטוריות שונות שישמשו במצבים שונים, כמו גם לשפר את דיוק התנועה.¹²

סיבה נוספת לחשיבותה היא חיסכון באנרגיה: הגדרת מסלול רצוי, הגדרת הכוח הנדרש לפי הפיזיקה מהצעד האחרון, ואופטימיזציה של הצעד הבא שמפחיתה עלות אנרגטית מניסיון לניסיון.³

אזורים מוחיים המשתתפים באדפטציה

ישנה סברה שהצרבלום אחראי לשינויים במנגנון ה-feedforward, כלומר התאמת המודל הפנימי של המשימה לתנאי הסביבה, אך לא לתיקונים של טעויות שנעשים בעקבות feedback (שינויים תגובתיים), שאינם תלויים בו, ולכן בלעדיו לא יכולה להתרחש אדפטציה.

במחקרם של מורטון ועמיתיו (Morton et al. 2006),¹⁴ נחקרים עם נזק צרבלרי ונחקרים בריאים צעדו על הליכון עם מסילה מפוצלת, כאשר כל מסילה נעה במהירות שונה. נחקרים עם נזק צרבלרי הצליחו להתאים מיד את זמן ה-Stance הנדרש לכל רגל (כמו הבריאים), אך כאשר המסילות חזרו לנוע במהירות שווה הם לא הראו "תגובת-אחרי" (בשונה מהבריאים). מכאן אפשר להסיק שהצרבלום אינו קריטי בשינויים תגובתיים, כיוון שנחקרים עם נזק צרבלרי הראו שינוי כזה, ושהוא כנראה נדרש כדי לבצע שינויים אדפטיביים ושינוי של המודל הפנימי של התנועה.

במחקרם של ריימן ועמיתיו (Reisman et al. 2007)¹⁵ נבדקה

במהירויות שונות, ואף בכיוונים שונים. בשימוש בהליכון, כאשר המסילות נעות כל אחת בקצב אחר, זמן ה-stance של הרגל על המסילה המהירה מתקצר וזמן ה-swing מתארך, ולהפך: זמן ה-stance של הרגל על המסילה האטית מתארך וזמן ה-swing מתקצר. אימון על הליכון בעל מסילה מפוצלת מאמן כל רגל בנפרד במהירות שונה. האדם המתאמן על הליכון מסוג זה מדגים חוסר תיאום בין שתי הרגליים. תהליך ההסתגלות למהירויות השונות מתבטא בהשגת סימטריה בפרמטרים שונים בסוף תהליך ההסתגלות. הסימטריה יכולה להתבטא באורך הצעד או במרכזי הלחץ (Center Of Pressure COP).²⁴

אדפטציה מוטורית

תארו לכם מצב שבו אתם עובדים על מחשב של חבר, ומשתמשים בעכבר שלו. בהתחלה אינכם רגילים לעכבר, והשימוש בו מגושם ואף מעצבן. לאחר דקות אחדות התופעה חולפת, והשימוש בעכבר החדש נעשה נוח וטבעי. כאשר אתם חוזרים לעבוד עם המחשב והעכבר שלכם, שוב נדרשות דקות אחדות להתרגל לעכבר המוכר. זוהי אדפטציה מוטורית.

גם הליכה היא פעולה מוטורית שמצריכה אדפטציה. בחיי היום יום עלינו לשנות תבנית הליכתנו פעמים רבות: להליכה על מדרכה דרישות שונות מהליכה על חוף הים, והליכה יחפה אינה דומה להליכה על עקבים. כדי לבצע את השינוי נצטרך לעשות שינויים בתנועות המפרקים, בתבנית גיוס השרירים ועוד.

הגדרת אדפטציה מוטורית: שינוי בתבנית התנועה הנוצר בתוך שניות עד דקות, לאחר חשיפה להפרעה חדשה, הגורם ל"תגובת-אחרי" (After-effect) שלילית כשההפרעה מוסרת.¹¹

אדפטציה היא תהליך ניסוי וטעייה של התאמת התנועה לדרישות חדשות. כיום היא נחשבת לא רק לתהליך של תיקון התנועה על פי משוב (אם זרקתי חץ והוא פגע מימין למטרה, בפעם הבאה אכוון מעט שמאלה יותר), אלא גם ככיוול של הערכת המוח איך הגוף יזוז, והיא מביאה בחשבון פרמטרים שבאים עם דרישות המשימה החדשות.¹²

מנגנון השליטה על התנועה מורכב משני חלקים: feedback ו-feedforward. בדרך כלל, מנגנון ה-feedforward מספק הערכה, כלומר מודל פנימי של התנועה, ואילו מנגנון ה-feedback מספק פיצוי על הערכה שגויה ומייצב את המערכת לקראת ההתנהגות הרצויה.¹³

אדפטציה מוטורית היא התהליך שמחבר בין שני אלו: התאמה

בקצב שונה זו מזו, כשבעצם הן זו באותה המהירות. הסיבה יכולה להיות שינוי התפיסה הפרופריוספטיבית ברגליים, אך סביר יותר שהסיבה היא אי התאמה בין הקלט הסנסורי המצופה בכל רגל לקלט האמיתי שמגיע.

במהלך הניסוי נצפה שתבניות התנועה התוך-גפיות נשארו ללא שינוי, גם אם ההליכון היה סימטרי וגם אם לא. הדבר מרמז על כך שישנם מעגלים עצביים מחוללי תבנית תנועה, עצמאיים משינויי קואורדינציה בין-גפית, שיכולים לשמר תבנית תנועה תוך-גפית קבועה.

המרכיב העיקרי שמניע את הצורך בקואורדינציה בין-גפית הוא שמירה על שיווי משקל - במהלך הנחת המשקל על הרגל המובילה, זווית הירך צריכה להיות מדויקת, כדי שמרכז הכובד יהיה מעל כף הרגל,¹⁶ אחרת אנו בסכנת נפילה. בנוסף, אדפטציה מובילה להליכה סימטרית. הליכה סימטרית היא יעילה מבחינה אנרגטית יותר מאשר הליכה א-סימטרית: ככל שההליכה היא א-סימטרית היא אטית יותר, וככל שההליכה היא אטית יותר כך עולה העלות האנרגטית שלה.¹⁷ מחקר נוסף שהתבצע על הליכון בעל מסילה מפוצלת מחזק טענה זו, כאשר הושוותה העלות האנרגטית באדפטציה מוקדמת כשהצעדים לא שווים לעומת אדפטציה מאוחרת כשהם שווים, נמצא שכאשר הצעדים שווים באורכם העלות האנרגטית נמוכה יותר.¹⁸

מרכיב נוסף של אדפטציה שנבדק על הליכון בעל מסילה מפוצלת הוא מודעות להליכה לעומת הסחת דעת. במחקרם של מלון ועמיתיו (Malone et al. 2012),¹⁹ הלכו על הליכון בעל מסילה מפוצלת שלוש קבוצות: קבוצת ביקורת ללא כל הוראות, קבוצה שחבריה ראו בווידיאו את עצמם הולכים וקיבלו הוראות לשמור על אורך צעד סימטרי, וקבוצה שצפתה בתכנית טלוויזיה ונאמר לה שבתום ההליכה יישאלו שאלות על התכנית ששודרה.

הקבוצה שחבריה צפו בעצמם בווידיאו ביצעה את האדפטציה המהירה מכולם, ואילו לקבוצה שהתרכזת בתכנית הטלוויזיה נדרש הזמן הרב ביותר לביצוע אדפטציה. מכאן אפשר להסיק שתיוקונים מודעים מאיצים אדפטציה על הליכון בעל מסילה מפוצלת, ואילו הסחת דעת מאיטה אותה. גם בשלב הדה-אדפטציה, שבו נאמר לכל שלוש הקבוצות "פשוט ללכת", הן שמרו על אותה תבנית - הקבוצה שצפתה בווידיאו חזרה לתבנית ההליכה המקורית במהירות הגבוהה ביותר, ואילו הקבוצה שהתרכזת בתכנית הטלוויזיה והוסחה דעתה, חזרה לתבנית ההליכה המקורית בזמן הארוך ביותר.

אדפטציה על הליכון בעל מסילה מפוצלת נחקרים שורדי שבץ. נחקרים עם נזק בשיווי המשקל ובהליכה (יכולות המיוחסות למבנים צרבלרים שמקושרים לגזע המוח) לא הייתה אדפטציה, ואילו נחקרים עם נזק בשליטה בתנועה רצונית של הרגל, אשר מקושרת לקורטקס המוטורי, הייתה אדפטציה תקינה. לכן הם מציעים שהקשרים של הצרבלום עם הקורטקס המוטורי חשובים לאדפטציה יותר מאשר הקשרים של הצרבלום עם גזע המוח. לאחד המשתתפים במחקר היה נזק פרייטלי נרחב, שגרם לאובדן תחושה פרופריוספטיבית ברגלו הפגועה. בכל זאת, הוא עשה אדפטציה באופן נורמלי. כנראה שתפיסה מודעת של מנח הרגל אינה נדרשת כדי לעשות אדפטציה.

ישנן סברות אחדות על אופן המעורבות של הצרבלום בתהליך האדפטציה.

אחת הסברות היא שמכניזם צרבלרי מבצע מודולציה לפלט של המסלולים העצביים שאחראים על התנועות הבסיסיות הריתמיות של הגפיים בזמן ההליכה.⁹

סברה נוספת היא שהצרבלום מקבל אינפורמציה על מצב ה-Spinal pattern generating circuits (דרך מסלול ספינו-צרבלרי קדמי), ועל המצב הסנסורי של הגפיים (דרך מסלול ספינו-צרבלרי אחורי). דבר המאפשר לו להשוות בין תנועות הרגל המתוכננת לתנועה המתרחשת, ולבצע תיקונים.⁸

שימושים של הליכון בעל מסילה מפוצלת בחקר האדפטציה המוטורית

מסילה מפוצלת מאפשרת לחקור מרכיבים שונים של אדפטציה מוטורית בהליכה אנושית. שניים מהם הם קואורדינציה בין-גפית (Interlimb coordination), וקואורדינציה תוך-גפית (Intralimb coordination). קואורדינציה בין-גפית היא קריטית ליציבות שלנו כהולכים על שתיים. היא משמשת אותנו בסוגים שונים של התקדמות (הליכה, ריצה), ובתנאים מסוימים היא משתנה, כמו בהליכה במעגל למשל.

במחקרם של רייזמן ועמיתיו (Reisman et al. 2007)⁸ ביצעו נחקרים בריאים אדפטציה על הליכון בעל מסילה מפוצלת. שינויים אדפטיביים בקואורדינציה בין הגפיים על הליכון זה התרחשו לאחר מקטעים קצרים (10 דקות) של אימון, והשינויים האלה מאופסנים ובאים לידי ביטוי כ"תגובת-אחרי". לעומת זאת, פרמטרים תוך-גפיים לא עשו אדפטציה ולא הראו "תגובת-אחרי" כשההליכון חזר למצבו הסימטרי. הנבדקים הראו גם "תגובת-אחרי" תפיסתית, כאשר דיווחו שרגליהם זזות

מערכת יחסים חדשה בין הגפיים, שגרמה לתבנית הליכה שהיא סימטרית יותר מתבנית ההליכה הטבעית שלהם.

"תגובת-האחרי" הזאת אמנם הייתה קצרה, אך חשיבותה גדולה: היא מראה שמערכת העצבים בקרב שורדי שבץ היא גמישה, ומסוגלת להתאים מאפייני מרחב ותזמון של הליכה לדרישות משתנות, לייצר תבנית הליכה סימטרית יותר, ולאחסן באופן זמני סימטריה. את האפקט הזה ייתכן שיהיה אפשר להעצים עם תכנית טיפול מתאימה ארוכת טווח.¹⁵

במחקרם של מואסי ועמיתיו (Mawase et al. 2013),²⁴ שבו אימנו, לאורך זמן, מתבגרים עם שיתוק מוחין על הליכון בעל מסילה מפוצלת, נצפה שיפור בקצב ההסתגלות ובמדדי הסימטריה של מרכזו הלחץ (COP), תוך כדי אימון ובהשוואה לנתוני הבסיס. עם זאת, לא נמצא שיפור או שינוי ב"תגובת-אחרי". המחקר עד כה מצביע על הסתגלות מצוינת של המתבגרים עם שיתוק מוחין למהירויות שונות בשתי הרגליים ועל קושי בהעברת הנלמד לסביבות אחרות.

גיל יכול להשפיע על היכולת לבצע אדפטציה, ולכן יש להביא זאת בחשבון כאשר משתמשים באדפטציה ככלי שיקומי. ישנם אלמנטים בקואורדינציה בהליכה, בעיקר הקשר המרחבי בין הגפיים (מרכז האוסילציה), שבהם לא מתרחשת אדפטציה בקרב ילדים מתחת לגיל 6, ובקרב ילדים עד גיל 12 תהליכי אדפטציה ודה-אדפטציה מתרחשים באטיות יחסית למבוגרים. לעומת זאת, באלמנטים אחרים כמו תזמון בהליכה, אדפטציה ודה-אדפטציה מתרחשות כמו בקרב מבוגרים, אפילו בקרב הילדים הצעירים ביותר שנבדקו.

סיבות אפשריות לכך הן אי סיום ההתפתחות של מבנים צרבריים שנועדו לתאם אדפטציה מרחבית. לעומת זאת, מבנים בגזע המוח ובחוט השדרה, שנועדו לתאם אדפטציה בתזמון, משלימים את התפתחותם עוד לפני גיל 3.

לכן, כאשר משתמשים באדפטציה ככלי שיקומי, ילדים מתחת לגיל 12 צריכים להיות מאומנים זמן רב יותר כדי להגיע לאותן תוצאות כמו מבוגרים.²¹

מעבר מאדפטציה ללמידה

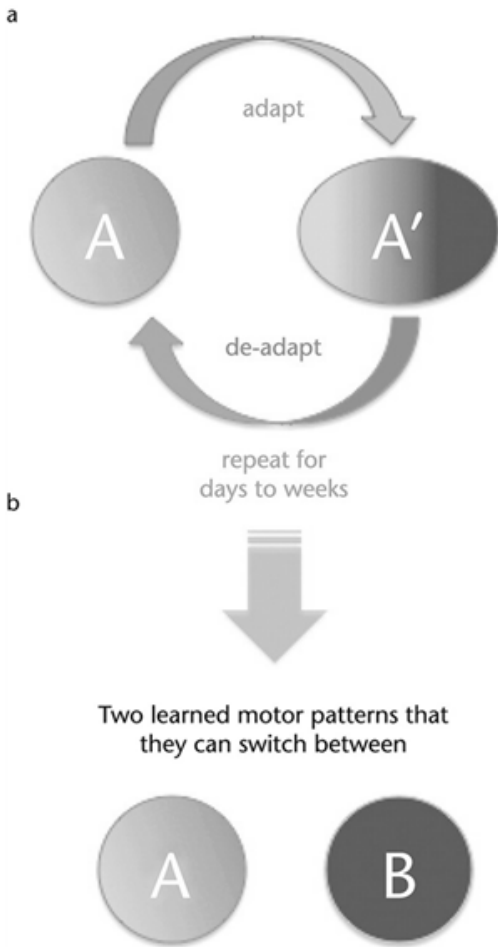
למידה מוטורית היא מושג שמתאר את התבנית המוטורית החדשה שנרכשת לאט באמצעות תרגול ארוך טווח (ימים, שבועות או שנים). אחרי שתבנית התנועה או המיומנות החדשה נלמדה, היא נשמרת לזמן רב כמעט ללא דעיכה, ויכולה להישלף ולהיות בשימוש מידי בקונטקסט המתאים

בקבוצה שבה הוסחה הדעת התרחשה אדפטציה ואורך צעדיהם של חברי הקבוצה הפך לסימטרי, על אף שלא נתבקשו לעשות כך. משערים שהסיבה לכך היא משום שהמערכת המוטורית מגיבה באופן אוטומטי גם לטעות שהתגלתה בתכנון לעומת המסלול המבוצע, ולא רק לדרישות ספציפיות בביצוע. ייתכן שתהליכי אדפטציה אוטומטיים אחראים לא רק לאדפטציה אטית יותר, אלא גם לשימור היכולת החדשה - כמו שנצפה בתהליך הדה-אדפטציה האטי יותר. לכן, כאשר במהלך טיפול שיקומי ניתנת הוראה להתרכז בביצוע תנועה הדבר יכול להיות יעיל, אך ייתכן שרק לטווח הקצר. לעומת זאת, תרגול עם הסחת דעת הוא אולי קשה יותר, אך כנראה שיעיל יותר לטווח ארוך כמו גם פונקציונלי יותר.

באותו המחקר נבדקה גם השאלה באילו מרכיבים של מחזור ההליכה מתרחשת אדפטציה המתבטאת ב"תגובת-אחרי", ובאילו מרכיבים אינה מתרחשת. נבדקו מרכיבים מרחביים ומרכיבי תזמון. מרכיבים מרחביים מתייחסים למרחב ומרחק, ואילו מרכיבי תזמון מתייחסים ליחס זמני ההתרחשות של שלבי הליכה, כגון היחס בין ה-Swing phase ל-Stance phase. נמצא שהמרכיבים המרחביים של ההליכה עוברים אדפטציה, ואילו מרכיבי התזמון אינם עוברים אדפטציה. תוצאה זו יכולה להצביע על כך שהשליטה על אדפטציה של מרכיבים שונים בהליכה מתרחשת במסלולים עצביים שונים.

סוגיה נוספת שהועלתה, לאחר ביצוע אדפטציה בהליכון בעל מסילה מפוצלת, היא קיום של CPG נפרד לכל גפה. נחקרים שביצעו תרגול קצר מאוד (90 צעדים) על הליכון בעל מסילה מפוצלת הראו אדפטציה מהירה יותר בתרגולים עוקבים על ההליכון במהירות קבועה. אולם, כאשר בתרגול הנוסף הוחלפו מהירויות המסילות, בין הרגל המהירה לאטית, לא התרחשה אדפטציה. ממצא זה מצביע על כך שאכן קיים מכניזם נפרד לשליטה על כל גפה, ואין CPG יחיד השולט על הניידות ככלל.²⁰

מחקרים אחדים שנעשו על הליכון בעל מסילה מפוצלת בדקו את האפשרות להשתמש באדפטציה מוטורית ככלי שיקומי. ההסתגלות [להליכה] על הליכון בעל מסילה מפוצלת נבדקה גם אצל אנשים עם הפרעות הליכה לאחר אירועים מוחיים. כך נחקרים אחרי אירוע מוחי (CVA) שאומנו על מסילה מפוצלת, נצפתה סימטריה רבה יותר במהלך "תגובת-אחרי": ההבדל בין אורכי ה-Double support פחת (ההתייחסות היא לכל שלב בנפרד על פי רגל הייחוס), ואורך הצעדים נעשה סימטרי יותר. החוקרים הסיקו שהנחקרים אימצו באופן זמני



Reisman D S et al. PHYS THER 2010;90:187-195

תרשים 1

a. בתרשים (11) מוצג המעבר בין אדפטציה ללמידה מוטורית. תבנית הליכה נורמלית (A) עוברת אדפטציה תוך כדי ניסיון להתרגל לשינוי בדרישות המשימה (למשל, הליכה על מסילה מפוצלת כאשר רגל אחת נעה מהר יותר מהשנייה). תוצאת האדפטציה היא תבנית הליכה מותאמת (A'). כאשר הדרישות החדשות מוסרות (מסילות ההליכון חוזרות לנוע במהירות שווה), תבנית ההליכה המותאמת ממשיכה, ותרגול נוסף בתנאים אלה נדרש כדי לחזור לתבנית ההליכה המקורית (A).

b. אחרי ימים עד שבועות של תרגול התבנית המקורית (A) והתבנית המותאמת (A'), אפשר להפיק שתי תבניות (A ו-B), שאפשר להחליף ביניהן מיידית בהתאם לדרישות המשימה, ללא צורך בתקופת אדפטציה.

Reisman, D.S et al. Phys Ther 2010; 90:187-195

(בניגוד לאדפטציה, אין צורך בתרגול נוסף). בני אדם מסוגלים לאחסן תבניות מוטוריות רבות, דבר המאפשר מעבר יעיל מאחת לשנייה. לעומת זאת, ידע תיאורטי שמאפשר הכרה או זיהוי של דבר כלשהו יכול להירכש בחשיפה אחת בלבד, אבל נשמר לאורך זמן קצר בלבד. הדבר מצביע על כך שכנראה לזיכרון ארוך הטווח של מיומנות מוטורית יש מנגנון אחסון יעיל מאוד.^{12,22}

ייתכן שישנם גם מספר מנגנונים התנהגותיים ועצביים שונים ללמידה של תנועה חדשה, תלוי בסוג המיומנות המוטורית. אדפטציה מוטורית היא בעצם צורה של למידה מוטורית. אם אדם עושה אדפטציה ודה-אדפטציה שוב ושוב במשך שבועות, הוא יכול לפתח תבנית תנועה חדשה בשביל הקונטקסט שהניע את האדפטציה מלכתחילה. במילים אחרות, אינו צריך עוד לעשות אדפטציה מתבנית אחת לשנייה, אלא יש לו עכשיו שתי תבניות נלמדות שהוא יכול להחליף ביניהן. הצורה הזו של למידה יכולה להיות אידיאלית ביותר במצבים שבהם אדם מסוגל לבצע תנועה הדומה לזו שעליו ללמוד. בשיקום למשל, זה יכול להיות תהליך חשוב.¹²

משתתפי מחקרם של שדמר ועמיתיו (Shadmehr et al. 2013)¹³ עשו אדפטציה להפרעה מכנית בתנועת הושטת יד, וחזרו על כך שוב לאחר דקות אחדות, יום או שבוע. בבדיקה החוזרת היה שימור חלקי של התבנית האדפטיבית, כלומר אדפטציה מהירה יותר. זוהי עדות לכך שהייתה למידה.

במחקרם של מרטין ועמיתיו (Martin et al. 1996)¹, במהלך משימת זריקה וקליעה למטרה, הנחקרים עשו אדפטציה ודה-אדפטציה שוב ושוב למשקפי מנסרה. כל שבוע, הם הראו שיפור: כל פעם שהרכיבו את המשקפיים הטעות הייתה קטנה יותר, וכאשר הורידו אותם הראו פחות After-effect. בסוף תקופת האימונים, הם למדו את קואורדינציית העין-יד המתאימה למנסרות, והצליחו לקלוע למטרה מיד אחרי שהרכיבו או הסירו את המשקפיים. זה מוכיח שאדפטציות חוזרות אכן יכולות להביא לתבנית תנועה חדשה המאוחסנת ויכולה להישלף לשימוש מידי.

תרשים 2

Wide sense adaptation, אדפטציה במובן הרחב, היא תהליך נרחב המורכב מארבעה שלבים.

תרשים זה מציג את התמונה המלאה.

ציר ה-X מייצג זמן, ואילו ציר ה-Y מייצג את השינוי המתרחש אצל האדם. Feedback מתבצע תוך מילישניות עד שניות, ולאחריו מתרחשת אדפטציה תוך שניות עד דקות. האדפטציה היא בעצם שינוי בפרמטרים של הפקודה העצבית והתנועה.

למידה מתרחשת תוך שעות עד שנים, והשינוי שהיא מביאה הוא תפקודי. לאחר מיליוני שנים של שינויים תפקודיים, מתרחש גם שינוי מבני וזוהי אבולוציה.

Karniel, A. (2009). Computational Motor Control. In: M.D. Binder, N. Hirokawa & U. Windhorst (Eds.), Encyclopedic Reference of Neuroscience (Springer) pp. 832-837

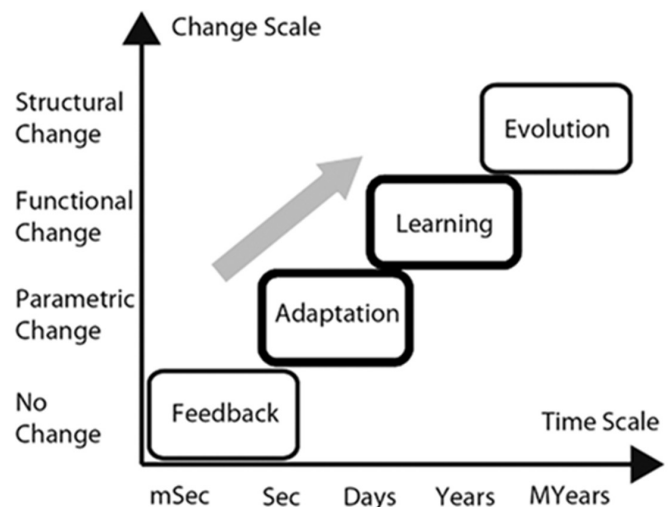
תכנית תנועה שאפשר לשלוף אותה בעת הצורך. השילוב בין שני פריטי מידע אלה פותח אפשרות חדשה; שיקום מטופלים עם א-סימטריה בהליכה, על רקע פגיעה מוחית, בעזרת הליכון בעל מסילה מפוצלת. בהמשך יש לחקור אפשרות זו לעומק, לגלות האם הליכה על הליכון בעל מסילה מפוצלת אכן משפרת את הסימטריה לאורך זמן, לאיזו אוכלוסייה הטיפול מתאים, וכן מהם מאפייני ההליכה על הליכון האופטימליים מבחינת מהירות הליכה, משך ההליכה ויחס הקצב בין הרגליים.

שאלה נוספת, שבעתיד יש לתת עליה את הדעת, היא איזו מבין הגפיים תלך בקצב המהיר יותר, ואיזו בקצה אטי: הרגל החלשה או הרגל החזקה.

סיכום

המסרים העולים מן המאמר:

- אדפטציה מוטורית מאפשרת הסתגלות מהירה לתנאים משתנים.
- הצרבלום, ובייחוד קשריו עם הקורטקס המוטורי, מהווים גורם מרכזי לקיום אדפטציה.
- בהליכה על הליכון בעל מסילה מפוצלת מתבצעת אדפטציה למרכיבים שונים במחזור ההליכה.
- על ידי תרגול חוזר של אדפטציה ודה-אדפטציה, במשך ימים עד שבועות, מתקבלת תבנית תנועה חדשה ועצמאית.
- הליכון בעל מסילה מפוצלת יכול להוות כלי יעיל בשיקום הליכה, ועל כן יש לחקור ולהבין מהם מאפייני השימוש היעילים ביותר.



דיון ומסקנות

בסקירה נבחנה הניידות האנושית מאספקטים חדשים ורחבים: לא רק בחינה של מאפיינים הנראים לעין, אלא גם ניתוח הבקרה על הניידות, והבנה של הגורמים המשחקים תפקיד בהליכה.

מכיוון ש-CPG מוגדר כמעגל עצבי שיכול לייצר לאורך זמן תבניות התנהגות, עצמאיות מקלט סנסורי, קיומו מגלה שלניידות יש רבדים אוטומטיים ולא מודעים, ומאתגר לחשוב כיצד להשתמש בכך בשיקום.

המחקר על הליכון בעל מסילה מפוצלת, כמו גם ההתערבות הטיפולית, מאפשרים הצצה לתוך התהליכים המוחיים המובילים להסתגלות, ללמידה ולשיקום.

חשיבותו של הצרבלום לאדפטציה וללמידה תוביל בהמשך למיקוד המאמץ ההתערבותי באוכלוסיות היכולות ליהנות מסוג זה של התערבות. גם גיל המטופלים הוא גורם שיש להתחשב בו, מכיוון שיש לו השפעה על היכולת לבצע אדפטציה. מידע זה יש להביא בחשבון בבחירת המטופלים או בבחירת תכנית הטיפול המתאימה להם.

למידה מוטורית נרכשת לאט, אך מנגנון האחסון שלה יעיל מאוד. כמו כן, מיומנות מוטורית שנרכשה נשמרת לזמן רב כמעט ללא דעיכה.

מחקר חשוב בהקשר של שיקום הראה שנחקרים לאחר CVA, שהלכו על הליכון בעל מסילה מפוצלת, הצליחו להפיק באופן זמני תבנית הליכה סימטרית יותר. בנוסף, אימון חוזר של אדפטציה ודה-אדפטציה מוביל ללמידה מוטורית ולאחסון של

רשימת מקורות

14. Morton SM, Bastian AJ. Cerebellar contributions to locomotor adaptations during splitbelt treadmill walking. *J Neurosci* 2006 6;26(36):9107-16.
15. Reisman, D. S., Wityk, R., Silver, K., Bastian, A. J. Locomotor adaptation on a split-belt treadmill can improve walking symmetry post-stroke. *Brain* * 2007;130(pt):1861.
16. Perry J. *Gait analysis: normal and pathological function*. Slack, Thorofare, NJ. 1992.
17. Zamparo P, Francescato MP, De Luca G, Lovati L, di Prampero PE. The energy cost of level walking in patients with hemiplegia. *Scand J Med Sci Sports* 1995;5(6):348-52.
18. Finley, J. M., Bastian, A. J., Gottschall, J. S. Learning to be Economical: The Energy Cost of Walking Tracks Motor Adaptation. *Journal of Physiology* 2013;591(Pt 4):1081-95.
19. Malone LA, Bastian AJ. Thinking about walking: effects of conscious correction versus distraction on locomotor adaptation. *J Neurophysiol* 2010;103(4):1954-62.
20. Prokop T, Berger W, Zijlstra W, Dietz V. Adaptational and learning processes during human split-belt locomotion: interaction between central mechanisms and afferent input. *Experimental brain research* 1995;106(3):449-56.
21. Vasudevan EV, Torres-Oviedo G, Morton SM, Yang JF, Bastian AJ. Younger is not always better: development of locomotor adaptation from childhood to adulthood. *J Neurosci* 2011 ;31(8):3055-65.
22. Luft AR, Buitrago MM. Stages of motor skill learning. *Mol Neurobiol* 2005;32(3):205-16.
23. Kojima Y, Iwamoto Y, Yoshida K. Memory of learning facilitates saccadic adaptation in the monkey. *J Neurosci* 2004 ;24(34):7531-39.
24. Mawase F, Karniel A, Bar-Haim S. Training teenagers with Cerebral Palsy on a split-belt treadmill: from kinetic adaptation to motor learning. Unpublished data. 2013.
1. Martin TA, Keating JG, Goodkin HP, Bastian AJ, Thach WT. Throwing while looking through prisms. II. Specificity and storage of multiple gaze-throw calibrations. *Brain* 1996;119 (Pt 4)(Pt 4):1199-211.
2. Earhart GM, Jones GM, Horak F, Block E, Weber K, Fletcher W. Transfer of podokinetic adaptation from stepping to hopping. *J Neurophysiol* 2002;87(2):1142-4.
3. Emken JL, Benitez R, Sideris A, Bobrow JE, Reinkensmeyer DJ. Motor adaptation as a greedy optimization of error and effort. *J Neurophysiol* 2007;97(6):3997-4006.
4. Dietz V. Spinal cord pattern generators for locomotion. *Clin Neurophysiol* 2003;114(8):1379-1389.
5. Rossignol S, Dubuc R. Spinal pattern generation. *Curr Opin Neurobiol* 1994;4(6):894-902.
6. Grillner S. Neurobiological bases of rhythmic motor acts in vertebrates. *Science*; 1985;228(4696):143-9
7. MacKay-Lyons M. Central pattern generation of locomotion: a review of the evidence. *Phys Ther* 2002;82(1):69-83.
8. Reisman DS, Block HJ, Bastian AJ. Interlimb coordination during locomotion: what can be adapted and stored? *J Neurophysiol* 2005;94(4):2403-15.
9. Choi JT, Bastian AJ. Adaptation reveals independent control networks for human walking. *Nat Neurosci* 2007;10(8):1055-62.
10. Lamb T, Yang JF. Could different directions of infant stepping be controlled by the same locomotor central pattern generator? *J Neurophysiol* 2000 May;83(5):2814-24.
11. Reisman DS, Bastian AJ, Morton SM. Neurophysiologic and rehabilitation insights from the split-belt and other locomotor adaptation paradigms. *Phys Ther* 2010;90(2):187-95.
12. Bastian AJ. Understanding sensorimotor adaptation and learning for rehabilitation. *Curr Opin Neurol* 2008;21(6):628-33.
13. Shadmehr R, Mussa-Ivaldi FA. Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *J Neurosci* 1994;14(5 Pt 2):3208-24.