

תהליכי יסוד של תפיסה חושית פעילה

חיזוי פעולה רצויה ושינוי התנהגות כתגובה לפעולה שבוצעה ולשינוי בסביבה בהשוואה לחיזוי

שם התלמיד : אברהם טל ליבוביץ

ת"ז : 216739961

עבודת גמר 5 יח"ל בביולוגיה

בית ספר : ישיבה תיכונית שפע מקור-חיים

תאריך הגשה : 5.2025

מנחה אקדמי : פרופ' אילון ועדיה

תוכן עניינים

3	1. מבוא
3	1.1. הצגת שאלות
4	1.2. סקירת ספרות
17	1.3. היפותזות המחקר
17	1.4. דיון במשמעות התוצאות האפשריות
17	1.5. הניסוי שיתבצע
18	1.6. אופן השימוש בבינה מלאכותית
19	2. שיטות המחקר והמערך הניסויי
19	2.1. מטרות הניסוי
20	2.2. השערות המחקר
20	2.3. מערך המחקר
22	2.4. מהלך המחקר
29	2.5. המבחנים הסטטיסטיים לניתוח הנתונים
32	3. תוצאות הניסוי
32	3.1. הקדמה
32	3.2. הצגת הנתונים ועיבודם
38	3.3. ניתוח סטטיסטי של הנתונים
40	3.3.2. זמן ביצוע המשימה
48	3.3.3. יעילות המסלול
52	3.3.4. ניתוח מסלולים מדויקים (מסלולי המשתתפים)
73	4. דיון ומסקנות
73	4.1. הקדמה
73	4.2. דיון בממצאים העיקריים וחשיבותם לשאלת המחקר
76	4.3. דיון בנושאים להרחבה
78	4.4. הסבר של מהלך המחקר לאור המבוא
79	4.5. השוואה למחקרים קודמים
81	4.6. מגבלות המחקר
83	4.7. כיווני מחקר עתידיים
86	4.8. השלכות העבודה לתחומי עניין נוספים
89	5. ביבליוגרפיה
90	6. נספחים
90	6.1. הצעת המחקר
99	6.2. מהימנות ותוקף הניסוי
99	6.3. טבלה של ממוצעי זמני השלמת המשימה לכל ניסיון
101	6.4. טבלה של ממוצעי יעילות המסלול לכל ניסיון
102	6.5. הוראות לנבדק
103	6.6. נקודות התחלה
105	6.7. קישור לנתוני קוד
106	6.8. קישור לנתונים מספריים
107	6.9. נספח פרומפטים לדוגמה

1. מבוא

1.1. הצגת שאלות

שאלת המחקר המרכזית בעבודה זו היא - "מהם תהליכי היסוד של תפיסה חושית פעילה?" כלומר, כיצד מתפקד המוח ביצירת תיאום בין מערכת התנועה למערכת התחושה. היפותזת המחקר, שתוצג בפירוט בהמשך המבוא, מניחה כי קשרים אלה נלמדים ומתעדכנים לאורך כל החיים. היפותזת המחקר היא כי למידה היא מנגנון של קישור בין "פעולה" ל"תחושה" באופן שמייצר **תפיסה** (perception). לכן ההיפותזה מגדירה מחדש את המושג "תפיסה" במונח שאפשר לקרוא לו "תפיסה פעילה" (כפי שיוסבר בהרחבה בהמשך).

שאלת המחקר המרכזית בוחנת מהו המנגנון של תהליכי תפיסה פעילה וכיצד היא נלמדת. כלומר, שאלת המחקר שלנו היא כיצד אנו לומדים לתכנן פעולה, לנבא את התוצאות של פעולותינו, ולתפוס (perceive) איך משתנות התחושות שלנו בעקבות פעולות שאנו מבצעים. השאלה דנה באיך אנו לומדים לנוע נכון כדי להשיג מטרותינו, וכיצד אנו מייצרים תפיסה פעילה גם בתנאים בהם הקשר בין הפעולה לתוצאה התחושתית עשוי להשתנות.

למשל: כאשר אני פותח את המקרר ולוקח קרטון חלב, כיצד אדע כמה כוח להפעיל אם אינני יודע כמה חלב יש בקרטון? כאשר אני מבריש שיניים ומסתכל בראי, כיצד אני יודע לפעול נכון? והרי אני רואה תמונת ראי של הפעולה! את היכולות האלה מאפיינות **מערכות בקרה**. למשל, מערכות שפותחו על ידי האדם, כמו מנגנון המשוב בדוד החימום שמייצר טמפרטורה רצויה, או המנגנון שמאפשר למטוס לנחות נחיתה חלקה בשדה התעופה ללא התערבות טייס.

בכדי לבדוק את השאלה, עלינו להבין את הבסיס של מערכות המוח המעורבות ועקרונות פעולתן. לשם כך עסקנו בלמידת הידע הקיים בתחומי בקרה תנועתית ותפיסה פעילה באמצעות סקר ספרות (פרק 1); וכן ביצענו ניסוי המדגים את תהליכי הלמידה במערכות תפיסה פעילה (פרק 2).

נפנה לשאלת המחקר משני כיוונים מרכזיים: ראשית, בחקירת אזורי המוח המופעלים בעת תפיסה חושית פעילה. בחלק זה נפנה ונחקר שאלות המאפשרות לנו להבין למה ואיך מערכת העצבים המרכזית (CNS - Central nervous system, כוללת את אזורי המוח וחוט השדרה) מבצעת את תהליך התפיסה החושית הפעילה. שאלות כגון:

- כיצד התפעול של חלקי מוח המופעלים בעת תפיסה חושית פעילה, מאפשר פעולה ותפיסה חושית?
- מהי הייחודיות של אזורים אלו, המאפשרת להם לשלוח פקודות מוטוריות, לנתח אותות תחושתיים לביצוע פעולה ואת יכולת התפיסה?

השלב השני והמרכזי בדרך לפתרון השאלה יהיה בעזרת ניתוח מודל החיזוי של מערכת העצבים המרכזית (CNS). מודל זה חוזה פעולה ושינוי חיזוני עתידי נתון, ולפי אותות תחושתיים מסוגל לבדוק אם הפעולה או השינוי התבצעו כצפוי. הוידוא קורה על ידי השוואה בין החיזוי של הפעולה או השינוי החיצוני לבין הביצוע המעשי של הפעולה או קבלת אותות תחושתיים מאותו השינוי. במקרה שאחד שונה באופן דרסטי מהשני, ה-CNS מסוגל להסיק שהפעולה ו/או החיזוי לא התבצעו כפי שחזה, והוא מסוגל לתקן את החיזוי והפקודה המוטורית בשביל התוצאה הרצויה על ידי תהליכי למידה. במודל החיזוי נדון בהרחבה בסקירת הספרות (1.2.2).

בנוסף לשאלת החקר המרכזית, נחקר מספר שאלות נלוות:

- כיצד המערכת העצבית המרכזית (CNS) חוזה פעולה, ואילו סוגים של חיזוי היא מבצעת?
- כיצד ה-CNS מחליטה איך לבחור את הפעולה היעילה ביותר מתוך אפשרויות רבות ומהי הסיבה לבחירתה?

1.2. סקירת ספרות

1.2.1. אנטומיה פונקציונלית

בחלק זה של הפרק נסקור את מושג האנטומיה הפונקציונלית ואת תרומתה להבנת למידה סנסו-מוטורית (קרלסון, 2001). האנטומיה הפונקציונלית מתארת את המערכות הגופניות המעורבות בתהליכי תחושה ותנועה, שהן מרכיבים מרכזיים בלמידה מסוג זה. כלל תתי-הפרקים הכלולים בסעיף 1.2.1 מבוססים על תיאור מפורט זה מתוך ספרו של קרלסון.

1.2.1.1. התפתחות מערכת העצבים המרכזית ואזוריה השונים

התפתחות מערכת העצבים המרכזית (CNS) מתחילה בשלב מוקדם, כאשר היא מתחלקת לשלושה חלקים. חלקים אלה מתפתחים בהמשך לחדרים, ובונים את שלושת האזורים המרכזיים של המוח. אחד מאזורים אלה הוא המוח הקדמי, הכולל את הטלאנצפלוֹן (The telencephalon) - החלק הקדמי של אזור זה. הטלאנצפלוֹן מכיל את עיקר שתי ההמיספרות המוחיות, ששכבתם החיצונית נקראת הקורטקס המוחי (The cerebral cortex).

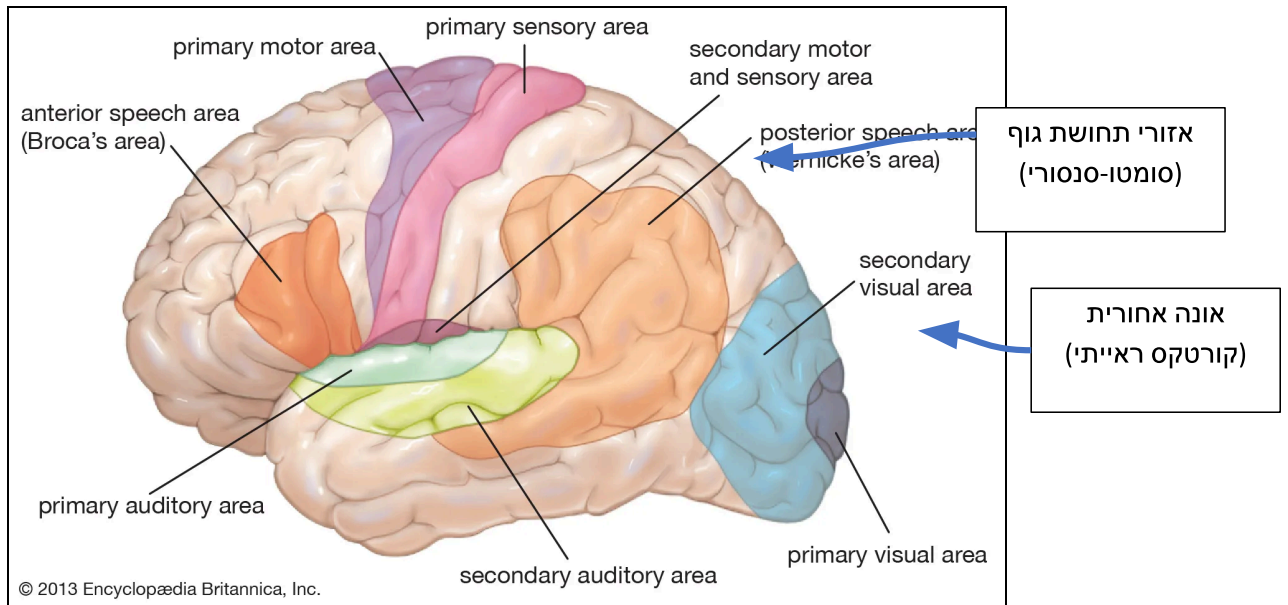
המוח מחולק לארבע אונות עיקריות: האונה המצחית (Frontal lobe), האונה הקודקודית (Parietal lobe), האונה הרקתית (The temporal lobe) והאונה העורפית (Occipital lobe). הקורטקס עוטף את ההמיספרות ומתאפיין בשטח פנים גדול, הבנוי ממעניות (קפלים קטנים), חריצים (קפלים עמוקים) ורכסים (הנמצאים בין

החריצים או המעניות). מבחינה היסטולוגית, הקורטקס מורכב מהחומר האפור, שצבעו נובע מריכוז גבוה של תאי עצב (כ-50,000 ל-3 מ"מ) ותאי גליה (מספר דומה, בנוסף לתאי העצב), ומהחומר הלבן שצבעו נובע ממספר גבוה של אקסונים (כ-4 ק"מ ל-3 מ"מ).

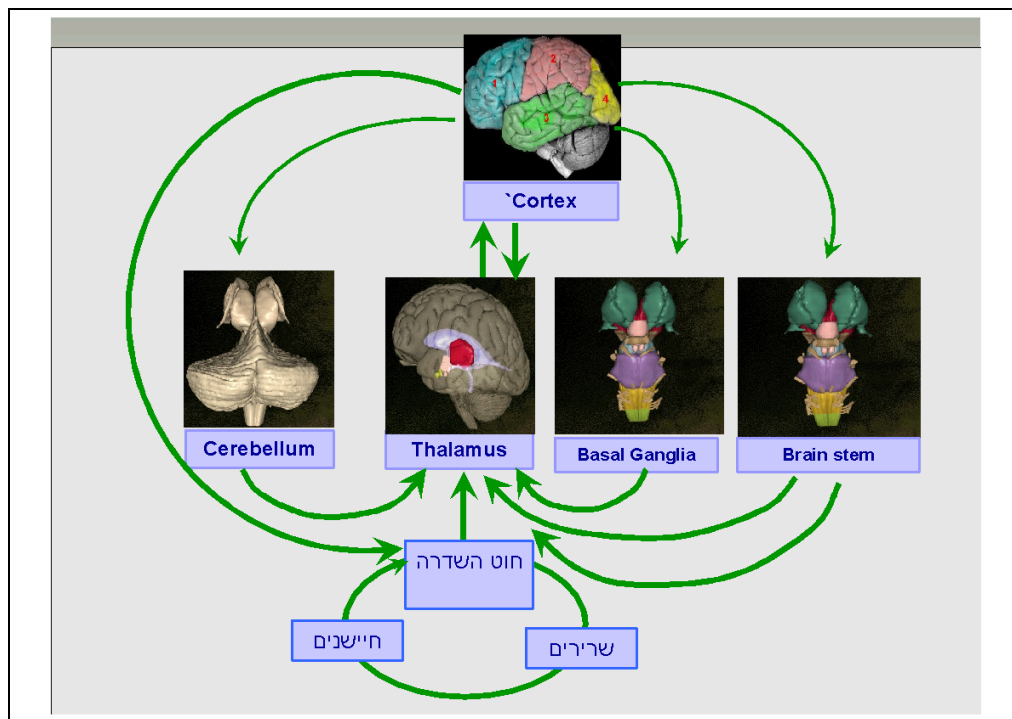
בין אזורי המוח השונים (ציור 1.1) נמצא כאלה המקבלים בעיקר מידע חושי, כמו הקורטקס הראייתי הראשוני (Primary visual area), הממוקם בחלק האחורי של המוח, קורטקס השמע הראשוני (Primary auditory area), הקורטקס הסומטו-סנסורי הראשוני (אדום), המכונה Primary sensory area, שאחראי על קבלת מידע חושי מחלקי הגוף. בצמוד אל האזור הסנסורי נמצא הקורטקס המוטורי הראשוני (Primary motor area) הממוקם באונה הקדמית (Frontal lobe).

כל אזור סנסורי ראשוני בקורטקס שולח מידע לאזורים אחרים, חלקם המאופיינים במבנה רקמה שונה (ציטוארכיטקטורה - סוגי תאי העצב שברקמה) ונקראים בספרות הקלאסית אזורים אסוציאטיביים. חלק מאזורים אלה ממוקמים בחלקים יותר אחוריים של המוח, ומקבלים בעיקר מידע תחושי, ואזורים אסוציאטיביים אחרים נמצאים באונה הקדמית ועוסקים יותר בתכנון פעולות.

חשוב לציין שכל אזור סנסורי מקבל קלט מהאזורים האסוציאטיביים ש אליהם הוא שלח מידע. כלומר: המוח בנוי לולאות של קשרים (ציור 1.2).



ציור 1.1: אזורי המוח השונים.
בציור מודגמים אזורים תפקודיים של "קליפת המוח".



ציור 1.2: מבנה לולאות של המוח.
בציור מוצגות לולאות של קשרים בין חלקי המוח השונים.

הספרות הקלאסית מייחסת לקורטקס (קליפת המוח) בקרה של מספר תהליכים חשובים: תפיסה, זיכרון, מחשבה ומודעות לתחושות ולפעולות.

אזורים מעניינים במיוחד ונעסוק בהם כאן - הם האזורים הקולטים שפת דיבור ומייצרים דיבור. אזורים אלה מתאפיינים בקשרים מיוחדים בין תחושות שונות (כמו שמיעת דיבור). דוגמה לכך היא אזור ברוקה, אשר נמצא אצל רוב האנשים באונה המצחית של ההמיספירה, לרוב - בצד השמאלי. אזור זה אחראי על הפעלת תנועות ועל השטף השפתי בעת הפקת הדיבור.

בנוסף לכך, קיים אזור ורניקה, אשר בדומה לאזור ברוקה, נמצא גם הוא בהמיספירה הדומיננטית. אולם, בשונה מברוקה, הוא ממוקם דווקא בצד האחורי של האונה הרקתית, ותפקידו לעבד קלט חושי ראייתי ושמיעתי.

בקורטקס של אונת המצח מתרחשים גם תהליכים של תכנון תנועות, וזאת תוך שילוב מידע מקליפת המוח התנועתית ומאזורים סנסוריים או אסוציאטיביים אחרים.

כדי להמחיש זאת, ניתן להדגים את היחס בין הקורטקס המוטורי הראשוני לקורטקס האסוציאטיבי המוטורי באמצעות אנלוגיה: אם הקורטקס המוטורי הראשוני הוא הפסנתר, אזי הקורטקס האסוציאטיבי המוטורי הוא הפסנתרן. כלומר, בעוד שהקורטקס המוטורי הראשוני מבצע את התנועות בפועל, הקורטקס האסוציאטיבי המוטורי הוא זה שמתכנן ומכוון את התנועות הללו.

המוח הקדמי כולל גם את הדיאנצפלון, הממוקם בחלק האחורי והצר של המוח הקדמי. הדיאנצפלון מורכב משני מבנים עיקריים וחשובים: התלמוס וההיפותלמוס.

לעניין מחקרנו חשוב לציין את התלמוס, שמשמש כתחנת ממסר מרכזית - רוב הקלט העצבי העובר לקורטקס עובר דרכו, והוא מכיל גרעינים שונים המקבלים מידע חושי ומעבירים אותו לאזורים הרלוונטיים בקורטקס. תחנת ממסר זו עוסקת גם בעיבוד מידע תנועתי ומתקשרת עם הגנגליונים הבסיסיים (Basal Ganglia), אשר ממוקמים מתחת לחלקים הקדמיים של החדרים הצדיים. הגנגליונים הבסיסיים קושרים בין אזורים המייצרים דופמין לבין גרעיני התלמוס ומשם אל הקורטקס הקדמי. כלומר, תפקידם של הגנגליונים הבסיסיים הוא ככל הנראה לבקר וללמוד קישורים בין תחושות לביצוע פעולות, תוך "למידת-חיזוק" (reinforcement learning). כך שבסופו של דבר התלמוס והגנגליונים הבסיסיים מייצרים לולאת קישורים בין רוב אזורי קליפת המוח.

המוח האמצעי מקיף את תעלת המוח וכולל שני חלקים עיקריים: הטקטום והטגמנטום.

הטקטום נמצא בחלק הגבי של המוח האמצעי וכולל את התללים העליונים, המהווים חלק ממערכת הראייה ואחראים בעיקר על תגובה לגירויים נעים, ואת התללים התחתונים, המהווים חלק ממערכת השמיעה.

מתחת לטקטום נמצא הטגמנטום, הכולל את החלק הקדמי של תצורת הרשת - מבנה דליל דמוי רשת הממלא את ליבת גזע המוח. תצורת הרשת מקבלת מידע תחושי ממסילות שונות ושולחת אקסונים

לקורטקס, לתלמוס ולמוח השדרה, תוך מילוי תפקידים במערכות השינה, הקשב, מתח השרירים, תנועה ורפלקסים חשובים.

הטגמנטום מכיל גם מספר בלוטות האחראיות על תנועות העיניים, וכן את החומר האפור המרכזי הנמצא סביב תעלת המוח. החומר האפור מורכב בעיקר מגופי תא של נוירונים וממלא תפקידים הקשורים בהתנהגויות מיניות כמו לחימה והזדווגות. בנוסף, בטגמנטום נמצא הגרעין האדום - גרעין גדול המקבל קלט מהמוחון ומהקורטקס המוטורי ושולח אקסונים לנוירונים המוטוריים של מוח השדרה.

המוח האחורי מקיף את החדר הרביעי וכולל את המטאנצפלוון, המורכב מהמוחון ומהגשר. המוחון מקבל מידע מכל האזורים האחראים על פקודות מוטוריות ומתאם ביניהם. הוא נראה כמו קטן, מכוסה בקורטקס מוחני ובעל מערכת גרעינים עמוקים המעבירים ממנו מידע. הגשר מכיל גרעינים הקשורים למצבי שינה וערות, וכן גרעין גדול המקשר בין הקורטקס המוחי למוחון.

כפיס המוח (Corpus Callosum) הינו רצועה ארוכה של אקסונים המחברת בין ההמיספרות המוחיות, כך שכל חלק בהמיספרה אחת מחובר לחלק המקביל לו בהמיספרה השנייה. חיבור זה מאפשר תקשורת בין האזורים המקבילים (בניתוח המוח החצוי, כפיס המוח נחתך באמצע).

במוח אין אזור אחד בלבד שאחראי על חיזוי, תנועה או פעולה. במקום זאת, יש כמה מערכות שונות שפועלות יחד ומתקשרות זו עם זו. הסקירה שמדובר עליה מתארת את הקשרים בין המערכות האלו – וחשוב ומעניין במיוחד להסתכל על המבנה של הקשרים ביניהן (ראו ציור 1.3).

המערכות האלו מפוזרות ברחבי מערכת העצבים המרכזית (CNS), וכולן יחד מאפשרות לאדם לפעול ולהתנהג.
לדוגמה:

- הקורטקס (קליפת המוח) אחראי להבין מידע שמגיע מהחושים (כמו מגע או ראייה) ולשלוח פקודות תנועה לשרירים.
- התלמוס מעביר מידע בין חלקים שונים במוח, ופועל כמו תחנת ממסר.
- המוחון (צרבלום) מקבל גם את המידע התחושתי וגם את הפקודות המוטוריות – ומתאם ביניהם, כך שהתנועה תהיה מדויקת ומתואמת.

בסופו של דבר, אפשר להגיד שהמוח כולו פועל כמו מנגנון אחד משולב, שבו כל החלקים עובדים יחד בהרמוניה.

1.2.1.2. הבסיס העצבי של תפקודי המוח

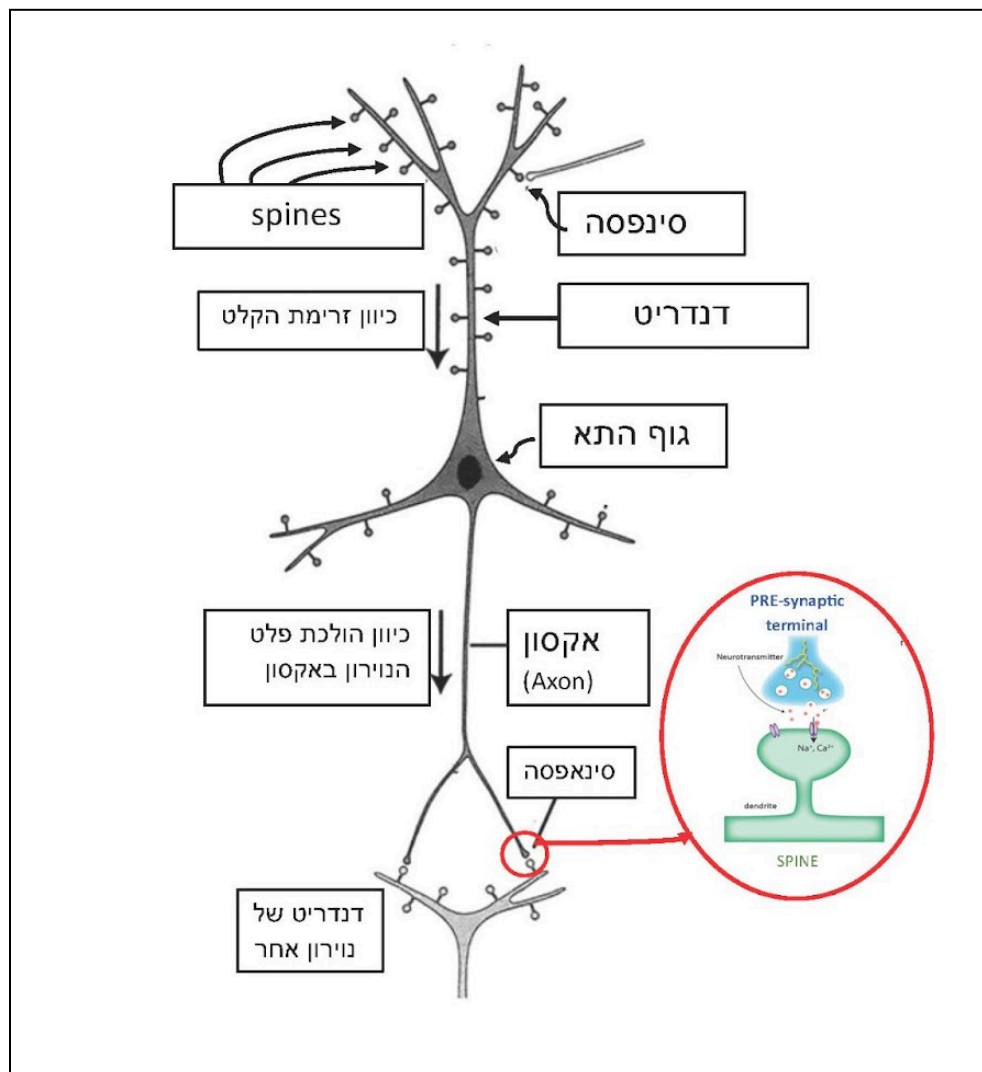
הבסיס העצבי של תפקודי המוח כולל את תאי העצב, את הקישוריות ביניהם ואת אופן העברת המידע.

בחלק הקודם (1.2.1.1. אנטומיה פונקציונלית) דן המבוא באזורים תפקודיים של המוח. כל התפקודים האלה נוצרים בכל אזורי מערכת העצבים המרכזית (אזורי המוח השונים וחוט השדרה), על ידי **תאי העצב (נוירונים)** ותאים אחרים המשתתפים בפעילותם ומבקרים גם את "תחזוקת" המוח (**תאי גליה**).

הנוירונים הם האחראים לקליטה, לעיבוד ולהעברה של מידע בכל הגוף, ומשחקים תפקיד מרכזי בתפקודים שהזכרנו: תחושה, תנועה ותהליכים קוגניטיביים גבוהים (כמו שפה). בפרק זה נדון בקצרה בתפקוד החשמלי של נוירונים, העברת מידע ביניהם (העברה סינפטית) ויצירת רשתות עצבים העומדות בבסיס הסתגלות ולמידה.

הנוירונים מאופיינים כבעלי הרכיבים העיקריים הבאים (ציור 1.3):

1. **גוף התא (cell body)** מתאפיין בתכונה ייחודית ושונה מכל שאר תאי הגוף: נוירונים הם "אקסיטבילים" - כלומר: הם יכולים לייצר פעילות חשמלית ייחודית (שתוסבר להלן).
2. **דנדריטים:** שלוחות מסועפות המגיעות אל גוף התא ומכילות אתרים בעלי מבנה מיוחד - סינפסות. הסינפסות קולטות מידע מתאי עצב אחרים, אותם הדנדריט מעביר כמתח חשמלי לגוף התא.
3. **אקסון:** שלוחה ארוכה אשר עשויה גם היא להתפצל ומוליכה את המידע החשמלי מגוף התא לתאים אחרים על ידי התקרבות לאתרים סינפטיים של תאים רבים אחרים.
4. **אתרים סינפטיים:** אלה האתרים בהם נוצרים הקשרים בין הנוירונים. ברבים מן התאים ישנם בדנדריטים אתרים ייחודיים בצורה הקרויה "spine", בהם נמצאת הסינפסה.



ציור 1.3: מבנה סכמטי של הפעילות החשמלית של נירון.
מבנה הנורון, חלקיו השונים וכיוון העברת האות החשמלי.

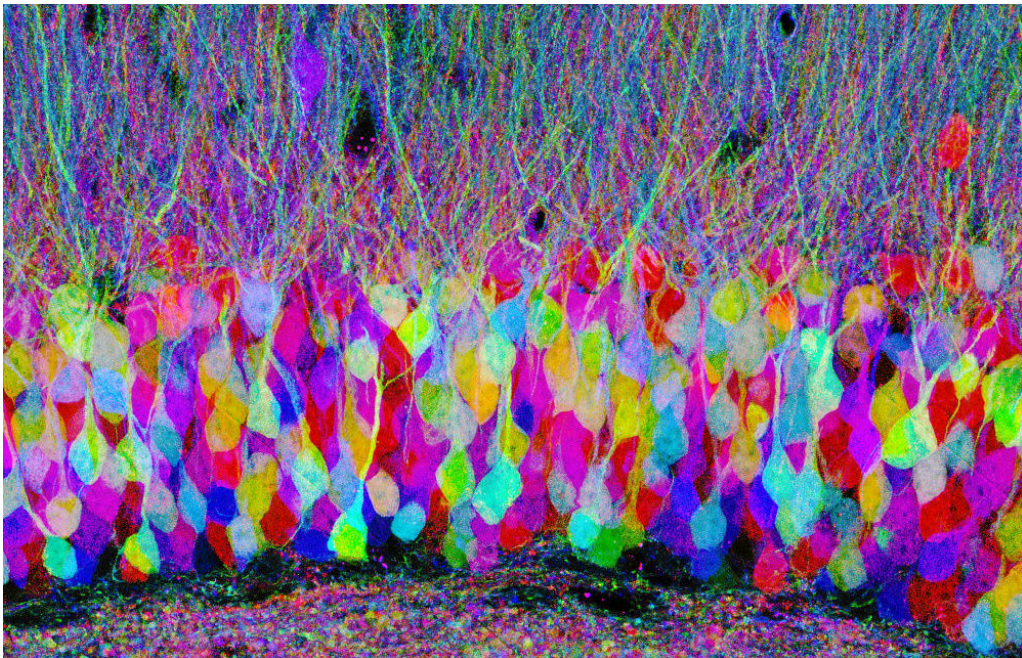
משמעות המונח "אקסיטביליות" היא שהנורון עשוי לעבור שינוי מהיר (בתוך כאלפית השנייה) במתח החשמלי שלו (הנוצר על ידי הפרש המתח האופייני בין תוכם של התאים לנוזל שמחוץ לתאים). שינוי זה מתעורר בדרך כלל באזור התחברות האקסון עם גוף התא. התהליך מתחיל בשינויים קטנים במתח התא (פוטנציאל סף), שנגרמים בדרך כלל מהעברה סינפטית. כאשר מגיע הסף, יתחיל פוטנציאל פעולה (המכונה גם "Spike"), הוא מתפשט לאורך האקסון וזהו בעצם הסיגנל שנירון מעביר לתאים אחרים.

תהליך העברה סינפטית ויצירת פוטנציאלי פעולה הוא-הוא המייצר תקשורת עצבית מדויקת והפעלה מתואמת של מערכת העצבים (כולל תקשורת בין אזורים שונים במוח ובכל מערכת העצבים עד להפעלת השרירים). כלומר - זוהי הפעילות הנדרשת לכל פונקציות המערכת, מגירויים פשוטים ועד תגובות מורכבות.

לסיכום, פעילות חשמלית והעברה סינפטית בתאי עצב הם מרכיבים בסיסיים במארג התפקודי של מערכת העצבים, המאפשרים את כל הרב-גוניות ואת המהירות של תפקודי מערכת העצבים כולה.

1.2.1.3. רשתות עצבים

תאי עצב במוח מייצרים מערכת סבוכה מאוד של קשרים. לשם הדגמה, במילימטר מעוקב ישנם בערך 100,000 נוירונים, כאשר כל אחד מהם מקבל קלט (סינפטיים) ממספר רב של תאים אחרים (בסדר גודל של עשרות אלפים!) ומשפיע דרך האקסון המתפצל של כל נוירון על אלפי נוירונים אחרים. כלומר - כל איזור קטנטן, והרבה אזורים שונים מתאפיינים במערכת קשרים עצומה בגודלה. אלה הן רשתות העצבים המוחיות, המהוות את הבסיס לתפקוד המוח. אלה הן הרשתות בהן נוירונים, דנדריטים, אקסונים, וסינפסות מייצרים למידה, תפיסה פעילה, מחשבה, תפקודי שפה, זיכרון וכדומה.



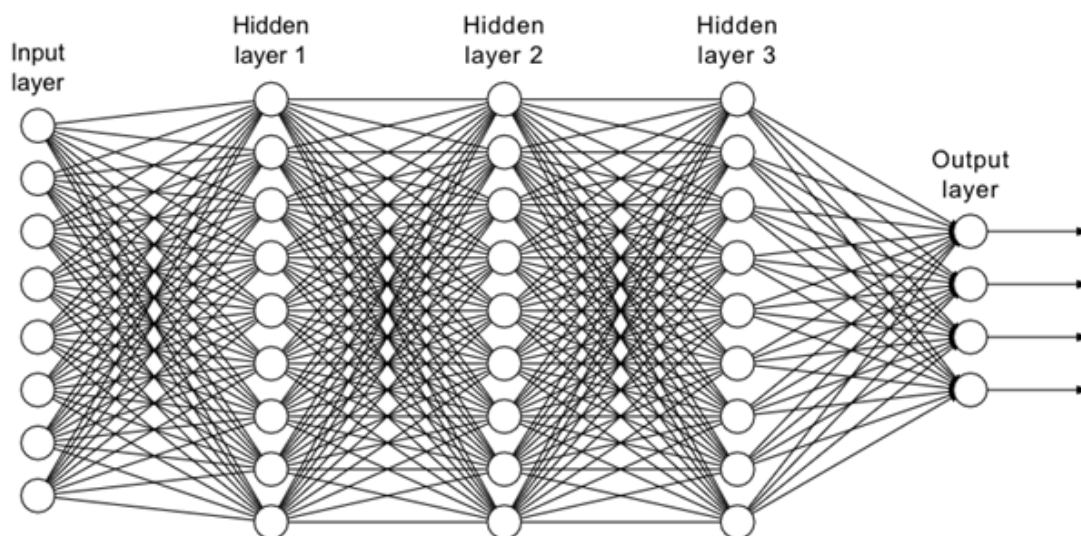
ציור 1.4: רשת עצבים מקומית.

הדמיה של אוכלוסיית תאים כפי שנדגמו ממוח עכבר לאחר טיפול "אופטוגנטי", המאפשר לראות סוגים שונים של תאים ברמת מוח צפופה. גודל האיזור המצולם כאן הוא פחות ממילימטר אחד.

בהשראה מרשתות ביולוגיות של המוח, התפתח תחום חישובי-פיזיקלי לפיתוח רשתות עצבים מלאכותיות, שהן מודלים המחקים בעצם את פעולת המוח. רשתות מלאכותיות אלה מורכבות גם הן מ"נוירונים מלאכותיים" המדמים בשיטות מתמטיות שונות נוירונים וסינפסות. אין בהכרח חיקוי מדויק של הפרטים הביולוגיים, אבל יש באופן ברור השראה של מבנה המוח על ההתפתחות שאנו עדים לה לאחרונה: תחום ה-AI Artificial intelligence של רשתות עצבים מלאכותיות, שיוצרות לבצע תפקודים כמו ראייה, זיהוי פנים או קול, ביצוע תנועה וכו', וכמובן גם תפקודים גבוהים יותר כמו הבנת שפה (כולל כתיבה ודיבור), בשיטות של "למידה עמוקה", שם שנגזר מכך שרשתות עצבים מלאכותיות אלה הן בעלות שכבות רבות (בדומה למוח!).

רשתות עמוקות הביאו לפריצות דרך משמעותיות בתחומים כמו זיהוי תבניות (למשל - זיהוי פנים), עיבוד שפה טבעית, זיהוי תמונות ועוד. מאחר והן מאפשרות למערכות ללמוד ולהשתפר בדומה לאופן שבו מוח

אנושי לומד בכל מהלך חייו, שיטות אלה ממשיכות להתפתח ולהשתכלל לכיוונים שאין לדעת את סופם. יש גם תקווה, וגם לא מעט דאגה, בניסיון להבין לאן יובילו רשתות עצבים מלאכותיות אלה את האנושות.



ציור 1.5: תיאור תרשימי של "רשת עמוקה"

עקרונות הפעולה של רשת כזו דומים לחלק מהעקרונות של רשתות המוח. למשל, שכבת הקלט (input layer) יכולה להיות קליפת המוח הראשונית ($V1$), אליה מגיעים גרוי אור. הנוירונים באזור זה שולחים מידע אל קליפות מוח גבוהות יותר (כמו $V2, V3, V4$) בהן מבוצעים, למשל, הליכים של זיהוי אובייקטים בקלט הראייתי, עד ששכבת הפלט יכולה להחליט מה תוכן הקלט הראייתי (למשל, "ראיתי פנים של אדם מסוים").

1.2.2. מודל החיזוי – תפיסה פעילה

בחלק זה נעסוק במודל החיזוי – תפיסה פעילה – ובתרומתו להבנת האופן שבו מערכת העצבים המרכזית (CNS) מנבאת ומתאמת פעולות ותפיסות (Wolpert & Ghahramani, 2000). כלל הסעיפים ותתי-הפרקים הכלולים תחת סעיף 1.2.2 מבוססים על מודל זה כפי שתואר במאמרם של Wolpert ו-Ghahramani. בהתאם להסבר שהובא בחלק הקודם, המודל מסייע לחזות מצבים עתידיים, פעולות ושינויים, במטרה לאפשר למערכת העצבים לזהות האם התרחשות כלשהי תואמת את התחזית – ובמקרה שלא, לתקן את הפעולה או להתאים את התגובה בהתאם.

אך ישנן עוד מספר סיבות הכרחיות לקיומו של מודל החיזוי הזה:

1. הוא מאפשר תפעול של מניפולציה מיומנת ועדינה, כגון פעולות עדינות בידיים, ניהול כלים שבריריים וכדומה.

2. הפחתת השפעתם של עיכובים במשוב בלולאות סנסומוטוריות (sensorimotor loops) -
עיכובים במשוב בלולאות סנסומוטוריות (sensorimotor loops) מגיעה ממלולאה שאפשר להיכנס אליה עקב חיזוי לא מדויק, וניסיון תיקון מוגזם (לדוגמה כיווץ יתר של השריר). מה שיכול לגרום ל־CNS לנסות לתקן פעם נוספת את התנועה (הרפיית יתר של השרירים יחסית לצורך של הפעולה הנדרשת), ולתקן שוב בתנועה מוגזמת, והלולאה נמשכת (פירוט של חלק זה בהמשך).
קיומו של מנגנון חיזוי מאפשר שליחת תיכון לפעולה מותעת באופן מדויק יותר, ומכך להימנעה מתיקון יתר, ולולאות כאלו.
 3. תכנון מסלול לפעולה עתידית רצויה - החיזוי לא רק מוודא הוצאה לפועל מדויקת של הפעולה, אלא גם מאפשר שבין אינספור האפשרויות שהפעולה יכולה להתבצע בהם, הגוף יבצע אחת ספציפית (ראה להלן: "הסקה בייסיאנית").
 4. שיפור המידע החושי הרלוונטי - על ידי שילוב המידע החושי הנתפס והחיזוי של המידע החושי הרצוי, אפשר לשפר ולמקד את החוויה החושית של הפעולה.
 5. שיפור בשליטה המוטורית הכוללת - החיזוי מאפשר את כל הפעולה המוטורית של הגוף.
- בחלק זה נחקור את הדרך שבה אנו חוזים, וכיצד החיזוי מאפשר לנו את כל היכולות שפורטו בפסקה הקודמת.

1.2.2.1. לולאות סנסומוטוריות - sensorimotor loops

עיכובים בהעברת האותות החושיים: מערכת העצבים המרכזית (CNS) מקבלת מידע חושי שעובר עיכובים משמעותיים בדרכו. עיכובים אלה עלולים להוביל למצב, שבו המידע שמגיע למוח אינו משקף את המצב העדכני של הגוף והסביבה. בנוסף, האותות החושיים עשויים להכיל רעש, מה שמקשה על קבלת תמונה מדויקת של המצב.

פתרון המוח - שימוש במודלים פנימיים: כדי להתגבר על אתגרים אלה, המוח משתמש במודלים פנימיים מתוחכמים (עליהם נרחיב בקטע הבא). מודלים אלה מאפשרים למוח לחזות את המצב העתידי של המערכת, ובכך לפצות על העיכובים והרעשים במידע החושי. לדוגמה, בזמן משחק טניס, המוח משתמש במודל קדמי כדי לחזות את מיקום הכדור ואת התנועה הנדרשת להכאתו.

שילוב המידע והמודלים במוח: המוח משלב באופן מתוחכם את המידע החושי המתקבל יחד עם החיזויים של המודלים הפנימיים והסקה בייסיאנית (Bayesian inference). שילוב זה מאפשר למערכת העצבים המרכזית לבצע חיזוי מדויק של פעולות ושינויים עתידיים בסביבה החיצונית. המודלים הפנימיים, שהם חלק בלתי נפרד ממנגנון בקרת התנועה והתפיסה החושית, מתמחים בתפקידים שונים: הדמיית הפעולה והשלכותיה, ואופטימיזציה של הפעולה הרצויה.

1.2.2.2. מודלים של חיזוי

ישנם שני מודלים מרכזיים: מודל קדמי ומודל הפוך. שני המודלים האלה עובדים ביחד על מנת ליצור חיזוי מדויק ככל האפשר של הסביבה ולהתאים את פעולות האדם לחיזוי שהתבצע.

1.2.2.2.1. מודל קדמי - Forward Model

תפקידו של המודל הקדמי הוא לנבא כיצד בסופו של דבר הפעולה תתבצע ותשפיע על הגוף וסביבתו, לפי פקודות התחלתיות כלשהן. זאת הוא עושה על ידי ניבוי ההשלכות התחושתיות שהגוף יחוש כתוצאה מפקודה מוטורית כלשהי. חיזוי זה מאפשר למוח לצפות את המשוב החושי שיורגש בזמן ובסיום ביצוע הפעולה.

החיזוי הזה מאפשר למערכת העצבית המרכזית (CNS) להשוות בין המשוב החושי הצפוי לבין המשוב החושי הנתפס בזמן אמת, ולפי השוואה זו לזהות שגיאות ולהתאים את הפקודות המוטוריות לביצוע הפעולה באופן מדויק יותר.

1.2.2.2.2. מודל הפוך - Inverse Models

מודל הפוך פועל בדרך דומה מאוד למודל הקדמי, אך בעוד שהמודל הקדמי מנבא את ההשלכות שתהיינה לפעולה (את סוף הפעולה), מודל הפוך מנבא את הפקודות המוטוריות הנדרשות כדי לבצע את הפעולה או המטרה הרצויה. המודל הזה מתרגם את הרצונות של מערכת העצבים המרכזית (CNS) לפעולות אמיתיות שהגוף מבצע.

המודל ההפוך והמודל הקדמי יחד מאפשרים למידה אדפטיבית ומוטורית טובה. המנגנון המשותף פועל כך: חיזוי של פקודות מוטוריות הנדרשות לביצוע משימה ופעולה על ידי המודל ההפוך, ואימות שההשלכות החושיות אכן קרו כפי שהמודל הקדמי חזה. המוח מסוגל לוודא שהפקודות המוטוריות שהמודל ההפוך שלח היו מדויקות ולתקן אותן במקרה הצורך.

1.2.2.3. פישוט המידע הנתפס

בשביל לחזות באופן יעיל פעולה ודרך לביצוע פעולה, המוח צריך לסנן את כמויות המידע שהגוף והעולם החיצוני מציגים. המוח אינו יכול לעבד את כל המידע שיש בגוף בכל פעם שינסה לפעול, וכמו כן הוא אינו יכול לחשב את כל העצמים שאיתם הוא מקיים אינטראקציה.

אשר על כן, במקום להפנים את כל המידע החושי שאנו מקבלים בכל רגע נתון, ה-CNS מסנן את המידע לפרטים הנדרשים בלבד. נסביר את התהליך הזה בקצרה על ידי שלושה שלבים עיקריים (יש לציין שאפשר להעמיק רבות בנושא זה, ומה שנציג כאן הם שלבים ומרכיבים כוללים למדי).

1.2.2.3.1. מצב הגוף והסביבה - state

השלב הראשון שה-CNS מבצעת הוא חישוב המצב הרלוונטי המיידי של חלקי הגוף והסביבה: פרטים כגון מיקום היד ביחס לאובייקט חיצוני, תנוחת הגוף הכוללת, התנועה המחושבת של כדור שעף לכיוון האדם שרוצה לתפוס אותו וכדומה.

1.2.2.3.2. הקונטקסט של הפעולה - context

הקונטקסט של הפעולה כולל את כל המידע הרלוונטי לפעולה, שלא נכלל במרכיב הקודם, ה"state". בעוד ה"state" מחשב את המצב המיידי הרלוונטי של הגוף והסביבה, הקונטקסט מחשב את ההיסטוריה והחיבור הרגשי שיש לאדם עם הפעולה, וכיצד הם משפיעים על ביצוע הפעולה. חלק זה קובע, לדוגמה, שבעבודה עם כלים מזכוכית הפעולה צריכה להתבצע באופן זהיר יותר, או שכוס עם אדים מחזיקה כנראה נוזל חם, כמו גם בהקשרים רגשיים יותר, כגון: חפץ שהיה שייך למישהו שיקר לך - תנהג בו בזהירות רבה יותר.

1.2.2.3.3. פקודה מוטורית - Motor command

לפי תהליך החיזוי, המבוצע על ידי מודל החיזוי הקדמי (Forward Model) והמודל ההפוך (Inverse Model), בהתחשב במצב של הגוף (state) ובקונטקסט (context) של הפעולה, מערכת העצבים המרכזית (CNS) יוצרת ושולחת פקודה מוטורית עבור הפעולה הרצויה (Motor command generation). זהו השלב שבו החיזוי יוצא לפועל ובו ה-CNS מסוגלת לבדוק אם חזתה את הפעולה באופן נכון וכיצד יש לתקן את אופן ביצוע וחיזוי הפעולה.

1.2.2.4. הסקה בייסיאנית

תהליך קבלת החלטות במערכת המוטורית שלנו, בנוסף למה שהסברנו עד כה, נשען על גישה בייסיאנית מתוחכמת, המאפשרת הערכה מדויקת של אפשרויות וניבוי תוצאות. המנגנון מבוסס על שני מרכיבים עיקריים: הסבירות (Likelihood) וה-Prior (ההנחה המקדימה, מונח מקביל ל"קונטקסט"). הסבירות בוחנת את ההסתברות לקבלת משוב חושי מסוים, תוך יצירת מודל מקדים של הפעולה (המודל הקדמי). ה-Prior מספק הקשר רחב יותר על אופן שינוי הקשרים לאורך זמן (כפי שהסברנו ב-"קונטקסט של הפעולה"). חוק בייס קובע ש:

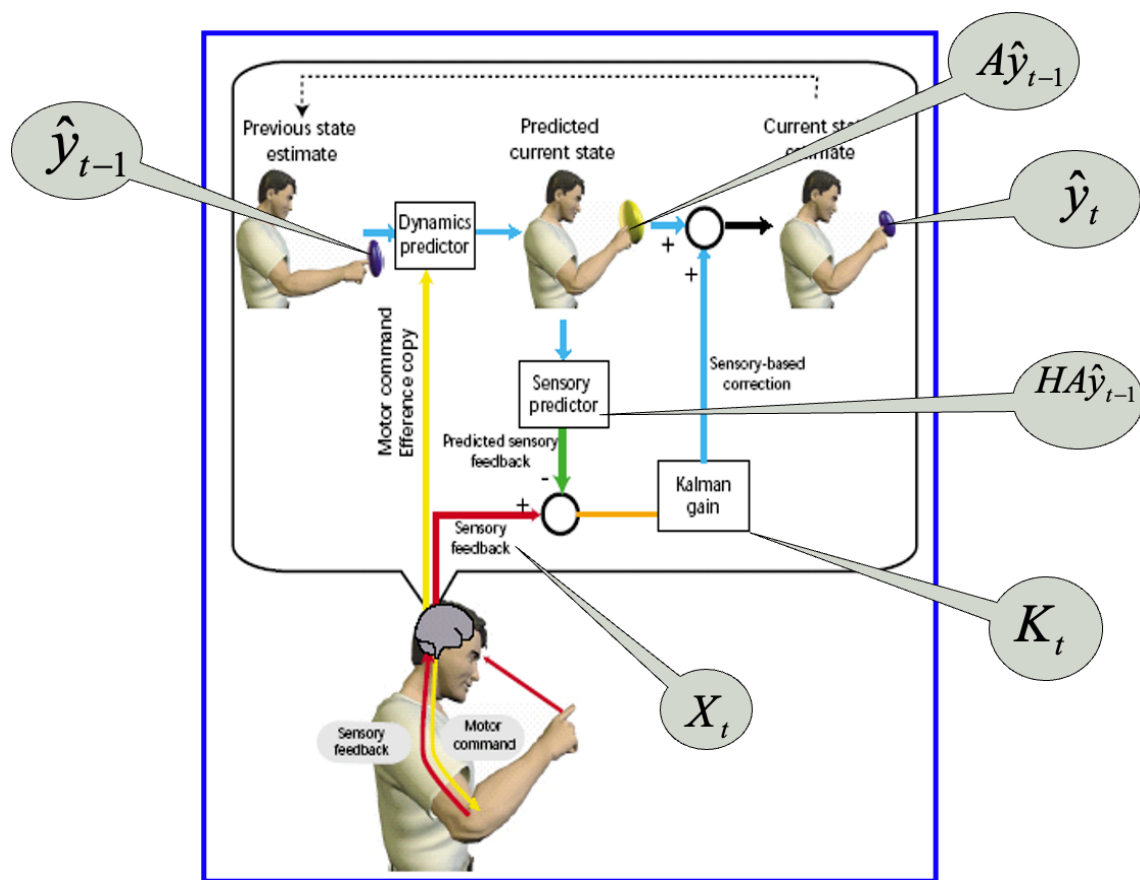
$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)}$$

ומאפשר לעדכן את ההסתברות של היפותזה A (ה-Prior) על סמך המידע החדש B (ה-Likelihood). באמצעות חוק זה המוח מסוגל לשלב מידע ולכוון את ההנחות בזמן אמת.

דוגמה טובה לתהליך זה היא הרמת קרטון חלב ריק: כשאנו מרימים חפץ שנראה מלא אך למעשה הוא ריק, המוח מיידית מתאים את המודלים החזויים למציאות, תוך תיקון ההנחות הראשוניות ברמת דיוק מרשימה. מערכת כזו תוארה כבר לפני 25 שנה! [1] (Wolpert & Ghahramani, 2000) והיא ניתנת לתיאור וחישוב מתמטי בעזרת המשוואה הבאה (kalman filter):

$$\hat{y}_t = A\hat{y}_{t-1} + K_t(X_t - H A \hat{y}_{t-1})$$

משמעות המשתנים במשוואה מתוארת בתמונה להלן (ציור 1.6). בדוגמה זו פועלת המערכת כדי להזיז את היד באופן מדויק ממקום אחד (y הנתון בזמן t-1) אל מקום אחר (שיהיה y בצעד הזמן הבא t):



ציור 1.6: תהליך החיזוי.

בתמונה זו מוצגים כל חלקי החיזוי, יחד עם כל המשתנים במשוואת kalman filter.

כפי שאמרנו לעיל, אפשר להעמיק רבות בחלק זה של מערכת החיזוי. אך בגלל מגבלות המחקר והנושא של מאמר זה, נסתפק במידע שהבאנו עד כה.

1.3. היפותזת המחקר

היפותזת המחקר שלנו היא שהמוח פועל במנגנון של "בקר-חזאי אדפטיבי". זאת אומרת שתהליך התפיסה החושית הפעילה, הוא מנגנון המבקר את התנועה והפעולה של הגוף, המאפשר למידה אדפטיבית. המנגנון מבקר את התנועה הזאת על ידי חיזוי של הפעולה ותוצאות התפיסה החושית שהגוף יחוש במהלך הפעולה, ואדפטציה ותיקון טעויות של החיזוי בסביבה משתנה. את התיקון המוח מבצע על ידי השוואת המשוב החושי הנתפס בזמן ביצוע הפעולה, למשוב החושי החזוי בעת שליחת הפקודות המוטוריות. ככל שהמשוב החושי הנתפס והמשוב החושי החזוי דומים יותר זה לזה, המוח מסיק שהפעולה התבצעה באופן קרוב יותר לפעולה הרצויה, ולהיפך.

התהליך הזה מאפשר לימוד ואדפטציה של מצב הבקר הרצוי, על ידי בדיקת רמת הסטייה של הפעולה (מההשוואה בין המשוב החושי הנתפס, לנחזה) ותיקון לאורך זמן של הפעולה כתגובה לביצוע לא מדויק שלו. הניסוי יסוב סביב נושא הלמידה והאדפטציה שהמערכת הכוללת של "תפיסה חושית פעילה" מאפשרת.

1.4. דיון במשמעות התוצאות האפשריות

ישנן מספר משמעויות, שאלות והשלכות למערכת החיזוי של המוח. נפרט כמה מהן:

1. כמה מהחווייה החושית שלנו היא באמת המשוב החושי הנתפס, וכמה באמת מגיעה מהמשוב החושי החזוי? תשובה לשאלה זו יכולה ללמד אותנו למשל על אפקט "הפלסיבו".
2. האם הלמידה המוטורית מאפשרת לימוד של כלל קבוע? כלומר, אם הנתונים הנוכחיים של מצב מסוים ישתנו, האם הקונקס המוטורי שלנו ידע ליישם את הכלל שנלמד גם על המערך החדש? או שמא הוא יפעיל את ההתנהגות שנלמדה רק במצב שבו היא נרכשה?

1.5. הניסוי שיתבצע

מטרת הניסוי היא לבחון כיצד האדם מסתגל לשינויים בסביבה באמצעות תהליכי אדפטציה ולמידה סנסורי-מוטורית. נתמקד באופן שבו התפיסה החושית הפעילה ומנגנוני החיזוי הפנימיים תורמים להתאמה בין הפעולות שהאדם מבצע לבין התוצאות שהוא חווה.

הניסוי המתוכנן (visuo-motor rotation) הוא ניסוי פסיכופיזי, שבו המשתתפים נדרשו להתמודד עם שינוי סביבתי בלתי צפוי החורג מהציפיות המוקדמות שלהם על סמך מערכת הלמידה. בפרק 2 נפרט את מטרות הניסוי, השיטות ומערך המחקר. לאור תוצאות הניסוי, שיפורטו בפרק 3, פרק 4 ידון בהרחבה בשאלה: האם הניסוי תומך בהיפותזת המחקר שלנו או שולל אותה?

1.6. אופן השימוש בבינה מלאכותית

בעבודה זו נעשו שלושה סוגי שימוש בבינה מלאכותית: עזרה בניסוח המידע; כתיבת קוד למערכות המשחק ולניתוח הנתונים; ועזרה בסיכום חומרים משניים.

עזרה בניסוח: שימוש זה בבינה מלאכותית מבוסס בעיקר על העברת פרקים שאני כתבתי דרך יישומי בינה מלאכותית (בעיקר chatGPT ו-claude.ai) על מנת לקבל הערות על כתיבת הפרקים, לתקן שגיאות כתיב ופיסוק. בפרק 3 חלק מתתי-הפרקים נכתבו בעזרת AI, אך תהליך הכתיבה התבצע אך ורק עם הסבר מפורט ומדויק ממני על תוכן תת-הפרק ועל אופן הכתיבה הנדרש. לאחר כל שימוש בבינה מלאכותית באופן זה, ביצעתי עריכה משל עצמי על תוכן הפרק לפני הוספתו לעבודה. יודגש כי לא נעשה כל שימוש ב-AI כמקור מידע.

כתיבת קוד: לצערי, הידע שלי בכתיבת קוד מצומצם מאוד, לכן כמעט כל הקוד שהשתמשתי בו, הן לבניית המשחק והקבצים לעיבוד נתוני המשחק, והן לניתוח הנתונים הסטטיסטיים, יוצרו בעזרת בינה מלאכותית. אך כל זאת עם הסבר מפורט מאוד על הצרכים שלי לקוד המיוצר. כל תהליך של כתיבת קוד נעשה בשיחה מתמשכת, עם רצף של הצעות קוד על ידי הבינה המלאכותית ובקשות שלי לשינויים ודיוקים. כך שגם כל קבצי הקוד, יוצרו לפי בקשותי ורעיונותי בלבד, בלי כל תוספות מהבינה המלאכותית. הרעיונות והעיצוב לכל קובץ, בין אם הן היו למשחק, קבצי עיבוד הנתונים או ניתוחם, היו פרי עיצובי, כשהבינה המלאכותית הייתה הכלי ליצירת הקוד המתאים.

סיכום חומרים משניים: לבסוף, השתמשתי ביישומי בינה מלאכותית לסיכום מאמרים משניים. הכוונה למאמרים שלא נכללו בעבודה עצמה, אך היו שימושיים לרכישת ידע כללי בנושא.

חשוב להדגיש שבעבודה זו אין אף פרט מידע שמקורו מבינה מלאכותית. כל השימוש ב-AI היה לעריכה, יצירה הכפופה להנחיות הדוקות ומחמירות או עזרה בהבנה של מידע ששאבתי ממאמרים מדעיים או מהמנחה שלי. בסוף העבודה מופיע נספח פרומפטס לדוגמה (6.9).

2. שיטות המחקר והמערך הניסויי

2.1. מטרות הניסוי

מטרת הניסוי היא לבדוק אדפטציה ולמידה סנסורי-מוטורית באדם. נבחן כיצד תהליך התפיסה החושית הפעילה ומודל החיזוי שדנו בו בפרק המבוא, מאפשרים לאדם להתאים את התנהגותו לשינויים בסביבה וליחסים בין פעולותיו לתוצאותיהן.

בניסוי זה נתמקד בלמידה מרומזת (implicit learning), למידה אשר מאפשרת ל-CNS להתאים את הפקודות המוטוריות להבנה שלה מהסביבה באופן לא מודע. ישנו סוג למידה מרכזי נוסף הרלוונטי למחקר זה, הנקרא למידה מפורשת (explicit learning). למידה זו היא למידה מודעת, בה האדם משנה את התנהגותו לפי חוקים חיצוניים מובנים. למשל: "אם אתה רואה עיגול אדום - הזז את היד ואם העיגול ירוק - אל תזיז את היד". הניסוי שנבצע כאן נועד לבדוק למידה מרומזת, בה אין הוראת אבחנה. החומר הנלמד יהיה: "הזז את היד באופן שסמן על המסך יפגע בעיגול האדום המסומן". כאן, הלמידה מתרחשת על ידי שינויים, שאינם תמיד מורגשים בקשר שבין התנועה לתוצאותיה. בדיעבד, ייתכן שמספר משתתפים בניסוי חוו למידה מפורשת, בגלל סיבות שנפרט בהמשך.

במחקר זה נבחן את יכולת הלמידה המרומזת והאדפטציה הסנסורי-מוטורית של האדם, באמצעות ניסוי שבו שלושה שלבים מרכזיים:

1. **תנועה ישרה:** בחלק הראשון המשתתף יבצע פעולה מוטורית חוזרת ונשנית של תנועת יד אל מטרה על מסך המחשב, עד להשגת קריטריון לביצוע יעיל של המשימה, שנמדד לפי זמן ביצוע המשימה ולפי המסלול שביצעה היד (הקריטריון: מסלול סמן על המסך יהיה קרוב לקו ישר).
2. **רוטציה:** בחלק זה נשנה את אופן ביצוע המשימה, מבלי לומר דבר לנבדק. המחשב יניע את הסמן בזווית שנקבעה מראש, כלומר: כדי להניע את הסמן בקו ישר אל מטרה על מסך, הנבדק יצטרך ללמוד (ללא רמז מהנסיין) להזיז את היד בזווית היחס למקום המטרה. שינוי זה יאפשר לנו לבחון כיצד המערכת המוטורית מתאימה את עצמה לתנאים החדשים.
3. **חזרה לתנועה ישרה:** לבסוף נחזור לפעולה המקורית (כמתואר בשלב 1), כדי לבדוק האם הלמידה בשלב 2 מתפוגגת והלמידה הראשונית (בשלב 1) נלמדת מחדש (אותה איכות מסלול וזמן השלמת המשימה שהמשתתפים השיגו בשליטה הראשונה).

2.2. השערות המחקר

השערת העבודה היא, שבמהלך הניסוי נראה דפוסי למידה והסתגלות שונים בכל אחד מהשלבים. בשלב הראשון, בו השליטה רגילה, אנו מצפים שהמשתתפים יגיעו לרמת ביצוע גבוהה מהר למדי. זאת מאחר שמשתמשי העולם המודרני בעבר מחשב, רגילים ליחס לינארי ישיר וקבוע בין תנועת היד לתנועות סמן על המסך. בשפת התפיסה הפעילה: המוח של רוב הנבדקים כבר למד בעבר לנבא לאן יזוז הסמן כאשר הנבדק מזיז את היד לכיוון מסוים.

יתר על כן: בניסוי שלנו המשתתפים מתאמנים לפני שלב 1 כדי להכיר את מערכת הניסוי. מספר הניסיונות משתנה בהתאם להצלחת המשתתף, אך לא עובר מעל 10 ניסיונות. ניסיונות מוקדמים אלו, מוודאים התחלה שווה ככל האפשר של רמת יכולת בין המשתתפים השונים בתחילת הניסוי עצמו (במיוחד בין משתתפים עם ניסיון שונה במשחקי מחשב, בהנחה שללא הניסיונות המוקדמים משתתפים בעל ידע נרחב במשחקי מחשב יהיו בעלי יתרון משמעותי במשחק).

בשלב השני יתקיים סיבוב של 25 או 35 מעלות בתנועת הסמן על מסך המחשב. כאן אנו מצפים לראות מיד עם השינוי ירידה משמעותית בביצועים. ירידה זו צפויה להיות חדה יותר בקבוצה בה הייתה סטייה של 35 מעלות לעומת הקבוצה בה הייתה סטייה של 25 מעלות. הנחת העבודה שלנו היא, שככל שהסטייה גדולה יותר, כך נדרשת התאמה גדולה יותר של המערכת המוטורית. עם זאת, אנו מצפים שאחרי מספר תרגילים המשתתפים ישפרו את ביצועיהם בהדרגה עד לרמת ביצוע טובה (תנועת סמן קרובה ככל האפשר לקו ישר), גם אם לא זהה לרמה שהשיגו בשלב הראשון.

בשלב השלישי והאחרון, כשנחזיר את השליטה למצבה הרגיל ("תנועה ישרה"), אנו משערים שנראה שוב ירידה זמנית בביצועים, אך הפעם, כך אנו מצפים, נראה "התאוששות" מהירה יותר. זאת מכיוון שהמשתתפים כבר למדו והתנסו בשליטה הרגילה בשלב הראשון ובמהלך חייהם. השיפור המהיר הצפוי בשלב זה יכול להעיד על שימור הלמידה המקורית למרות ההפרעה שנוצרה בשלב השני.

השערות המחקר מבוססות על מערכות "התפיסה הפעילה" במוח, שנסקרו במבוא.

2.3. מערך המחקר

2.3.1. שיטת המחקר

מחקר זה נעשה בשיטה פסיכופיזית. **פסיכופיזיקה** היא ענף בפסיכולוגיה, העוסק ביחס שבין פעולות וגירויים פיזיים לבין התחושות הפסיכולוגיות המתעוררות אצלו כתוצאה מחשיפה זו. בחירת השיטה נבעה מהערכה, שהשיטה יכולה לספק תובנות מעניינות על מנגנוני "תפיסה פעילה" של המוח. זאת, מבלי לחדור לתוכו ובלי להפעיל שיטות מורכבות לחקר המוח כמו שיטות רישום פעילות המוח עצמו.

השיטה הפסיכופיזית מאפשרת לנו לחקור את פעילות המוח באופן עקיף. יתרון מרכזי של השיטה הוא היכולת לצפות בתהליכי למידה והסתגלות בזמן אמת, בלי להתערב בתהליך הטבעי. כשמשתתף משפר את ביצועיו לאורך זמן או מצליח להתגבר על השינוי בשליטה, אנחנו יכולים ללמוד על תהליכי הלמידה וההסתגלות המוטורית המתרחשים במוח.

2.3.2. משתני המחקר

- **משתנים בלתי תלויים:** סוג השליטה (רגילה/מסובבת), נקודות ההתחלה השונות.
- **משתנים תלויים** (פרמטרים של ההתנהגות הנלמדת): זמן הגעה למטרה, המסלול שנלקח, יעילות המסלול ומספר ניסיונות כושלים.
- **משתני בקרה:** גיל המשתתפים, ניסיון במשחקי מחשב, יד דומיננטית וסוג למידת המשתתף הנבחן (את סוג הלמידה של הנבחן לא נוכל לדעת בוודאות, אך נוכל לשער אותו על פי השאלון שהמשתתפים ימלאו, עליו נרחיב בהמשך).

2.3.3. אוכלוסיית המחקר

אוכלוסיית המחקר היא נערים בגיל תיכון (הגיל הממוצע הוא 15.2). רוב המשתתפים היו בעלי יד ימין דומיננטית.

בסך הכל היו 26 משתתפים. חצי מהם היו על שליטה מסובבת לימין וחצי על שליטה מסובבת לשמאל (בהמשך נפרט בדיוק מה הכוונה וכן מה הסיבה לחלוקה זו).

בשלב השליטה המסובבת, אצל מחצית (13) מהמשתתפים הייתה זווית הסטייה של 35 מעלות ואצל מחציתם (13) הייתה זווית סטייה של 25 מעלות.

2.3.4. אתיקה

במחקר זה הקפדנו על שמירת זכויות המשתתפים וכללי האתיקה המחקרית. המשתתפים קיבלו הסבר מקדים שהניסוי הוא חלק מעבודת גמר במדעי המוח, וההשתתפות הייתה התנדבותית לחלוטין. הבהרנו למשתתפים שהם רשאים להפסיק את השתתפותם בכל שלב וכי הם יכולים לקחת הפסקה קצרה אם הם חשים עייפות.

לצורך שמירה על פרטיות המשתתפים, למרות איסוף השמות בטופס ה-forms שיצרנו, ניתוח הנתונים ובדיווח התוצאות כל משתתף מזוהה באמצעות מספר בלבד. בסיום הניסוי, סיפקנו למשתתפים הסבר מקיף על מטרות המחקר והתיאוריות העומדות מאחוריו.

2.3.5. כלי המחקר

כלי המחקר כוללים את מערך המשחק ושאלון ה-forms.

2.3.6. מהימנות ותוקף

כדי לוודא את מהימנות מערכת המדידה שלנו, בבדיקות שלנו מצאנו שתהליך מדידת הזמן מדויק ביותר, עם סטיית תקן זניחה. בנוסף קצב דגימת נקודות של כל מסלול גבוה ביותר, מה שמבטיח לנו דיוק גבוה ביותר באיסוף הנתונים (ראו נספח 6.2 : מהימנות ותוקף הניסוי).

2.4. מהלך המחקר

אנו נבצע ניסוי אדפטציה סנסורית מוטורית : visuomotor rotation.

לפני תחילת "מפגש ניסיוני" עם הנבדק, כל משתתף ממלא פרטים במסמך forms שימש את מערך הניסוי (בלי לחשוף פרטים אישיים מזהים).

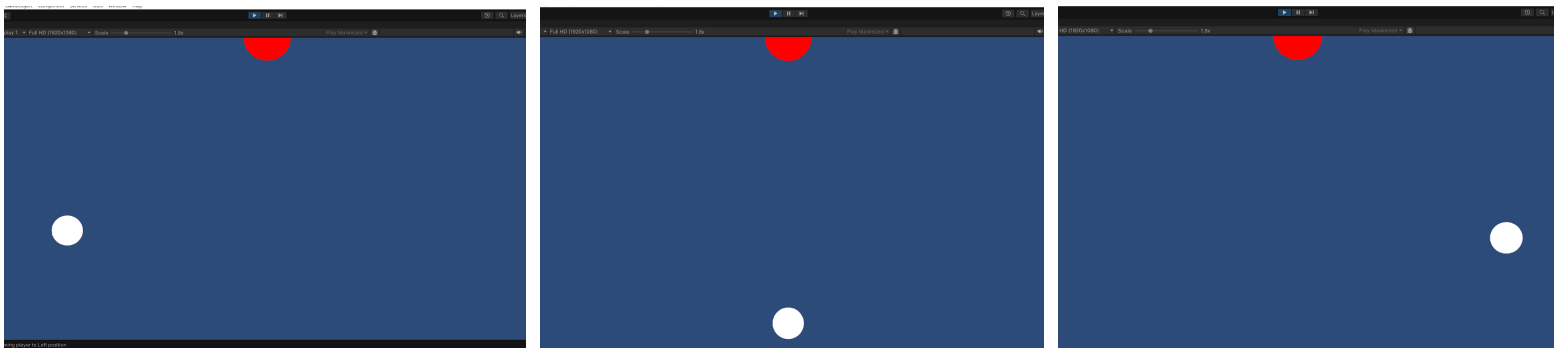
בתחילת המפגש הניסיוני, הנבדק יקרא בקצב שנוח לו הוראות למהלך הניסוי (ראו נספח 6.5 : הוראות לנבדק). כל משתתף יקבל אותן ההוראות בדיוק. לאחר שהמשתתף אישר שהבין את ההוראות, יתחיל לבצע את משחק המחשב. המשחק מורכב מתרגילים נפרדים המופיעים ברצף מתמשך.

2.4.1. המשחק (חוקים בסיסיים)

המשתתף שולט בעיגול הלבן באמצעות ג'ויסטיק. המשחק בנוי מתרגילים נפרדים : בכל תרגיל על הנבדק לגרום להזזת הסמן (עיגול לבן) מנקודת ההתחלה אל המטרה (עיגול אדום), שנמצא בכל התרגילים במרכז המסך, בתוך פחות מ-2.5 שניות. אם הנבדק מצליח במשימה והסמן הגיע את המטרה, יישמע צליל "הצלחה" והמטרה תפעם. אם הנבדק לא הצליח להגיע למטרה בפחות מ-2.5 שניות - יישמע צליל "שגיאה" והעיגול הלבן ירעד בצבע אדום. צליל ה"הצלחה" או ה"שגיאה" מסמן סיום של תרגיל בודד. הזזת הסמן של

המשתתף חזרה לנקודת התחלה חדשה מסמנת את תחילתו של התרגיל הבא. מיקום נקודת ההתחלה משתנה בין שלוש אפשרויות: 45 מעלות ימינה מהמטרה, ישירות מתחת למטרה, או 45 מעלות שמאלה, כולן במרחק קבוע של 8 יחידות מהמטרה (תמונה 2.1).

כדי לבדוק האם קיימת נקודת התחלה מועדפת עבור משתתף מסוים, יצרתי מערכת של נקודות התחלה קבועות מראש, זהות בכל אחד משלושת שלבי השליטה. נקודות ההתחלה חולקו באופן שווה - שמונה ניסיונות לכל אחת משלוש נקודות התחלה שונות (ימין, מרכז, שמאל), מתוך סך של 24 ניסיונות. הסדר של נקודות ההתחלה נקבע מראש כך שבכל שלישייה של ניסיונות הופיעו שלוש נקודות התחלה שונות, בסדר רנדומלי. סידור זה נועד לאפשר רמת ניסיון דומה (ככל האפשר) בין נקודות ההתחלה, ולצמצם את השונות בין משתתפים (ראו נספח 6.6: "נקודות התחלה" – לסדר המדויק של נקודות ההתחלה בכל סוג שליטה).



תמונה 2.1: נקודות ההתחלה.

נקודות התחלה (משמאל לימין): נקודת התחלה שמאלית, נקודת התחלה אמצעית ונקודות התחלה ימנית. העיגול הלבן הוא סמן על המסך שהמשתתף שולט בו והעיגול האדום הוא המטרה.

הכנה למשחק:

נאפשר לנבדק לנסות כמה פעמים להגיע למטרה לפני תחילת הניסוי עצמו (סיבוב ניסיון). זאת על מנת שבתחילת הניסוי עצמו תהיה לו היכרות עם התהליך. בנוסף, זה מצמצם שינויים כתוצאה מניסיון קודם, כפי שהסברנו לעיל (2.2).

שלב ראשון - שליטה רגילה:

- הנבדק שולט על הדמות באמצעות שליטה רגילה של 360 מעלות.
- הנבדק מבצע 24 ניסיונות מוצלחים של הגעה למטרה, על מנת לעבור לחלק השני של הניסוי.

שלב שני - שליטה מסובבת:

- שלב זה מתחיל אחרי תום השלב הראשון (24 הגעות למטרה בפחות מ-2.5 שניות).
- השליטה מתחלפת ל-35 או-25 מעלות שמאלה או ימינה (בהמשך תפורט הסיבה לכיוונים השונים ורמות הסטייה השונות).
- נדרשים 24 ניסיונות מוצלחים במצב שינוי השליטה על מנת לעבור לחלק האחרון בניסוי.

שלב שלישי - חזרה לשליטה רגילה:

- חזרה לשליטה רגילה, ללא הסטה יזומה מצד המערכת.
- נדרשים 24 ניסיונות מוצלחים נוספים עם שליטה רגילה על מנת לסיים את הניסוי.

הגבלות:

- העיגול הלבן אינו יכול לחרוג מגבולות המסך.
- זמן מקסימלי של תרגיל מוצלח: 2.5 שניות. המשחק אינו מחשיב ניסיון לא מוצלח (יותר מ-2.5 שניות) ב-24 הניסיונות של הנבדק בכל סוג שליטה. אם היה ניסיון לא מוצלח, המשחק חוזר לניסיון הקודם, והמשתתף ינסה שוב עד להשגת הצלחה.
- חובה להשלים 24 ניסיונות מוצלחים בכל שלב.

נתונים שנרשמים בניסוי:

2. זמני השלמת המשימה - נמדדים בכל ניסיון בודד, מתחילת תזוזת הסמן במחשב עד הגעת הסמן לנקודת המטרה. נתון זה מאפשר לראות את השוני בתפקוד המשתתפים בין סוגי השליטה, וכמו כן את העדפת המשתתף, בין המסלול הישר ביותר לבין זמן ההשלמה הקצר ביותר. בטבלה 2.1 מוצגת דוגמה למדידת הזמנים.

מס' נבדק	זמן השלמת המשימה: שליטה רגילה 3 תרגילים ראשונים	זמן השלמת משימה: שליטה מסובבת (רוטציה) 3 תרגילים ראשונים	זמן השלמת המשימה: שליטה שלישית (שליטה רגילה אחרי רוטציה) 3 תרגילים ראשונים
1	1.464	1.572	1.499
2	1.453	1.49	1.6
3	1.435	1.673	1.487

טבלה 2.1: דוגמאות לנתוני המשחק בשליטות השונות.

הטבלה מציגה את זמן ההשלמה הממוצע של שלושת הניסיונות הראשונים של שלושת המשתתפים הראשונים.

2. מסלולי תנועה מקוריים - בודקים את המיקום של הדמות כל 0.033 שניות. קצב הדגימה של 0.033 שניות (כ-30 פעמים בשנייה, 30Hz) הוא הקצב המינימלי הנחוץ כדי לתעד שינויים זמניים משמעותיים בתנועת יד של המשתתף. מאחר שזמן התגובה המינימלי לגירוי חזותי הוא כ-0.2 שניות, דגימה בקצב מהיר פי 6 מאפשרת ניתוח לא רק של ההחלטות הסופיות אלא גם של תהליך קבלת ההחלטות המוטוריות.

3. מסלולי תנועה מנורמלים - המסלולים המקוריים, אחרי שעברו מטריצת סיבוב (ראו נספח 6.7.1: קוד לסיבוב ונירמול מסלולים גרפיים באמצעות מטריצה סיבובית). זאת על מנת להציג את המידע באופן אינטואיטיבי יותר.

4. ניסיונות כושלים - מספר הניסיונות הכושלים בכל סוג שליטה.

5. יעילות המסלול (בהשוואה למסלול ישיר) - השוואה למסלול ישיר כמדד ליעילות מועילה מכמה סיבות:

1. היא מודדת באופן אובייקטיבי את דיוק התנועה – מסלול קרוב לקו ישר מעיד על יעילות גבוהה יותר.

2. היא מאפשרת השוואה בין משתתפים וניסיונות שונים.

סטטיסטיקות מוצגות:

1. יעילות ממוצעת לכל שלב (יעילות המסלולים של הנבדק לעומת מסלול ישר).
2. זמנים ממוצעים.
3. אחוזי הצלחה (כמה ניסיונות כושלים היו).
4. השוואה ויזואלית בין המסלולים.
5. מגמת עלייה או ירידה של כל סוג שליטה.

תיעוד:

תיעדתי את מהלך המחקר באמצעות צילומי מסך של התוצאות והמסלולים, שמירת קבצי CSV של הנתונים של כל משתתף (הכולל את מכלול הנתונים והסטטיסטיקות הנאספות והמוצגות), שמירת קובץ sheets עם כל התשובות והפרטים של המשתתפים וטבלאות של הנתונים שלהם.

2.4.2. מילוי שאלון למשתתף

בתחילת הניסוי כל משתתף מילא חלק אחד ב-forms עם מספר שאלות.

השאלות ששאלתי נועדו לברר משתנים נוספים שיכולים לשנות את תוצאות הניסוי אצל כל נבדק. כגון:

1. גיל המשתתף/ת.
שאלה זו נועדה להכיר את קבוצת הנבדקים ולוודא שכולם בעלי גיל דומה, כך שהתוצאות תושפעה כמה שפחות מגיל המשתתפים.
2. כמה ניסיון יש למשתתף במשחקי מחשב.
שאלה זו נשאלה בשביל לבדוק אם ניסיון קודם ישנה דרסטית את התוצאות.
הוספת שלב היכרות נועד לצמצם את הפער בין משתתפים עם ידע רב למשתתפים עם ידע מוגבל יותר.
3. מהי היד הדומיננטית של המשתתף.
שאלתי את השאלה הזאת מתוך הבחנה, במהלך תרגול כהכנה מקדימה לניסוי, שמשתתפים מסוימים מצליחים יותר בנקודת התחלה מסוימת (הימנית, האמצעית או השמאלית) משאר נקודות ההתחלה. מספר משתתפים היו עשויים להשפיע על מקרה זה. אחד מהם הוא העובדה שבסיבוב השני, עד אז, ההסטה של שליטת השחקן הייתה 35 מעלות שמאלה. חשבתי שאולי זה גורם לנקודת התחלה מסוימת להיות חלשה יותר ולאחרת להיות חזקה יותר אצל כל משתתף. בתגובה לזה יצרתי

משחק זה, שבו במקום שבמהלך השליטה המסובבת (השנייה) נזיז את השחקן שמאלה, הרוטציה תהיה לכיוון ימין. אם כיוון הסטייה באמת משפיע על נקודת התחלה חזקה או חלשה, אני מצפה שבשני המשחקים השונים (בעלי כיוון סטייה שונה) נראה נקודות התחלה חזקה וחלשה הפוכות. אך אם זו לא הסיבה לחוזק של משתתפים מסוימים בנקודת התחלה מסוימת, רציתי לבדוק אם יש קשר בין נקודת התחלה חזקה או חלשה ליד הדומיננטיות של המשתתף. לצערי לא היו מספיק משתתפים בעלי יד שמאל דומיננטית כדי שנוכל להסיק האם זה גורם משפיע או לא.

2.4.2.1. מילוי החלק השני ב-forms

אחרי שהמשתתף גמר את כל שלבי הניסוי, שאלתי אותו שתי שאלות נוספות.

1. אחרי שהשתתפת בניסוי, מה לדעתך הניסוי בודק?

2. האם יש לך שאלות? אם כן בבקשה כתוב אותן פה.

השאלה הראשונה היא זאת שחשובה לנו. הניסוי אמור לבדוק למידה מרומזת (implicit learning). בשביל למלא את ההגדרה הזאת צריך שהמשתתף לא יהיה מודע לחוקיות של השינוי המתרחש. שאלתי את השאלה הזאת, כדי לבדוק האם הוא שם לב לחוקיות כלשהי. במקרה שהתשובה שלו קרובה לחוקיות של השליטה המסובבת, אפשר להניח שהלמידה שלו היתה למידה מפורשת ומודעת.

דוגמה למשתתף שאולי זיהה את חוקיות הניסוי, היה משתתף מספר 26 שהיה עם סטייה של 35 מעלות בשליטה המסובבת. כתשובה לשאלה "אחרי שהשתתפת בניסוי, מה לדעתך הניסוי בודק?" המשתתף ענה: "לא בטוח לאיזו מטרה הניסוי אבל במהלך הניסוי השליטה שונה כך שהיה קשה יותר להיות מדויק למספר רב של נסיונות". התשובה הזאת היא לא תשובה חד משמעית, אך היא אולי מראה שהלמידה הייתה מודעת.

2.4.3. אופן ביצוע הניסוי

כפי שציינתי, בניסוי היו 26 משתתפים, כולם בהתנדבות מלאה ועם הבנה של מטרת הניסוי.

- למשתתפים 10-1, 24-26 נקבעה סטייה של 35 מעלות בשלב השני.

- למשתתפים 23-11 נקבעה סטייה של 25 מעלות בשלב השני.

הבחירה בשתי רמות שונות של סטייה (25 ו-35 מעלות) נבעה מהעובדה שבסטייה של 35 מעלות, היה לי חשש שמספר די גבוה של משתתפים שמו לב לחוקיות (או לפחות לשינוי דרמטי) במהלך הניסוי, מה שישנה את סוג הלמידה הנחקר, מלמידה מרומזת ללמידה מפורשת.

הסיבה שמלכתחילה לא הגדרתי את רמת הסטייה לזווית קטנה (25 מעלות ומטה) הייתה מתוך רצון למצוא את האיזון בין מובהקות סטטיסטית בין סוגי השליטה לבין סוג הלמידה הנבחן. באופן די אינטואיטיבי הנחתי שסטייה גדולה יותר תראה שוני מובהק סטטיסטית גדול יותר בין סוגי השליטה (מה שאכן התברר בתוצאות הניסוי, בפרק ג'), אך המחיר למובהקות הגדולה יותר של רמת הסטייה הזאת, היא האפשרות שהלמידה שונתה מלמידה מרומזת למפורשת.

2.4.4. תפקיד התלמיד בניסוי

הרעיון לניסוי הגיע מהמנחה שלי, פרופ' אילון ועדיה. אחרי שהיה לנו רעיון בסיסי, התחלתי לקודד את משחק המחשב, תוך שימוש באפליקציות כגון chatgpt.com ו-claude.ai בשביל הקידוד. לאחר חודשיים-שלושה והרבה מאוד שינויים והצעות מהמנחה שלי, היה לי המשחק הסופי.

חלק מהמשתתפים הבאתי מהכיתה שלי ואחרים הובאו על ידי אחראי עבודות הגמר בישיבה שלי, אייל נתיב. הניסוי התבצע במרכז למדעי המוח באוניברסיטה העברית. אני הרצתי את הניסוי עצמו, שמרתי על הנתונים של כל משתתף במהלך הניסוי ווידאתי שהכל מתנהל כשורה. בנוסף, עיבדתי וניתחתי סטטיסטית את הנתונים של הניסוי בהדרכתם של המנחה שלי ושל המורה אשר אלטמן מהישיבה.



תמונה 2.2: ביצוע הניסוי.

אחד המשתתפים מבצע את הניסוי ומאחוריו אני, מוודא שהכל מתנהל כשורה (הצגת תמונה זו בעבודה היא באישור המשתתף שבתמונה).

2.5. המבחנים הסטטיסטיים לניתוח הנתונים

סוג מבחן	מטרת המבחן	מדוע נבחר מבחן זה	הנתונים שננתח
מבחן Shapiro-Wilk	בדיקת סוג הנתונים : התפלגות נורמלית או לא נורמלית	כדי לקבוע אם נשתמש במבחנים פרמטריים או לא-פרמטריים	זמנים. יעילות. נקודות התחלה. מסלולים.
מבחן פרידמן	השוואת זמני תגובה בין שלושת השלבים (האם בכלל יש הבדל ביניהם)	מבחן לא-פרמטרי שמתאים למידות חוזרות	זמנים. יעילות. נקודות התחלה. מסלולים.
מבחני Wilcoxon Pairwise	השוואה בין כל שני שלבים בנפרד (איפה ההבדל)	לבדוק בין אילו שלבים קיים שינוי מובהק	זמנים. יעילות. מסלולים.
מבחן Mann-Whitney U	השוואת קבוצות רוטציה (35° מול 25°)	השוואה בין שתי קבוצות נפרדות כאשר הנתונים אינם נורמליים	זמנים. יעילות.
רגרסיה לינארית	בדיקת מגמת למידה לאורך הניסיונות	למדוד עד כמה המשתתפים השתפרו לאורך זמן	זמנים. יעילות.
מבחן Kruskal-Wallis	השפעת נקודת ההתחלה על הדיוק	מבחן לא-פרמטרי להשוואת קבוצות מרובות	מסלולים.
קורלציית Spearman	בדיקת מגמת למידה לאורך הניסיונות	לבדוק האם יש שיפור הדרגתי עם הזמן	מסלולים.

טבלה 2.2: סוגי המבחנים הסטטיסטיים.

בטבלה זו מוצגים המבחנים הסטטיסטיים בהם נשתמש לנתח את נתוני המשתתפים,
כולל מטרת המבחן, למה בחרנו דווקא בסוג המבחן הזה ואילו נתונים העברנו בכל סוג מבחן.

רשימת המבחנים בהרחבה:

● מבחן Shapiro-Wilk

המבחן בודק אם התפלגות הנתונים מתקרבת להתפלגות נורמלית (באמצעות השוואה להתפלגות נורמלית אידיאלית עם תוצאה בין 0 ל-1), וזאת כדי לקבוע האם ניתן להשתמש במבחנים פרמטריים. במחקר שלנו (ראו פרק ג') נתוני המדדים – כגון זמני תגובה, יעילות המסלול ודיוק המסלול – אינם מתפלגים נורמלית ($p < 0.05$), ולכן הבחירה במבחן זה הייתה חיונית לבדיקת התפלגות הנתונים והחלטה על המעבר למבחנים לא-פרמטריים.

● מבחן פרידמן

מבחן זה מאפשר השוואה בין יותר משתי קבוצות במדידות חוזרות באותו נבדק, ללא דרישה להתפלגות נורמלית. במחקר שלנו, שבו נמדדו שלושה שלבים (שליטה רגילה ראשונה, מסובבת ורגילה שנייה) באותם המשתתפים, מבחן פרידמן עונה על השאלה האם קיימים הבדלים מובהקים בין השלבים – דבר שמדגיש את השפעת סוגי השליטה על ביצועי המשתתפים.

● מבחן Wilcoxon Pairwise

כלי זה משמש להשוואה בין שני תנאים או שלבים במדידות תלויות, כאשר הוא מעריך את דירוג ההבדלים בין זוגות המדידות. הבחירה בו מתבססת על הצורך במחקר לזהות בצורה מדויקת את המעברים המשמעותיים (למשל, מעבר בין שליטה רגילה למסובבת ובין מסובבת לרגילה שנייה), ובכך מספק תשובה לשאלה באילו שלבים מתרחש שינוי משמעותי במדדים הנמדדים.

● מבחן Mann-Whitney U

מבחן זה משווה בין שתי קבוצות בלתי תלויות על בסיס דירוג הנתונים, ללא הנחת התפלגות נורמלית. הוא נבחר במחקר שלנו כאשר נדרש להשוות בין קבוצות שונות – כמו משתתפים שקיבלו רוטציה של 35° לעומת 25° או השוואה בין כיווני סטייה (ימינה מול שמאלה) – וכך עונה על השאלה האם יש הבדל מובהק בביצועים בין תנאים או קבוצות שונות.

● רגרסיה ליניארית

כלי זה בוחן את הקשר הליניארי בין משתנה תלוי למשתנה מסביר ומספק משוואה שמייצגת את הקו הטוב ביותר להסבר הקשר (באמצעות שיטת המינימום ריבועים). במחקר שלנו נרשמו מגמות למידה – לדוגמה, ירידה בזמני התגובה עם התקדמות הניסיונות – ולכן רגרסיה ליניארית מאפשרת להמחיש בצורה מתמטית את השיפור בביצועים לאורך הזמן ולהציג את תהליך ההסתגלות של המשתתפים.

● מבחן Kruskal-Wallis

מבחן זה משווה בין יותר משתי קבוצות בלתי תלויות על בסיס דירוגים, והוא מתאים במיוחד לנתונים קטגוריים או דירוגיים כאשר אין הנחת נורמליות. במחקר שלנו, כאשר אנו בודקים השפעות משתנים כגון מיקום נקודת ההתחלה (ימנית, מרכזית ושמאלית) על זמני התגובה, מבחן

Kruskal-Wallis עונה על השאלה האם משתנה זה משפיע באופן מובהק על ביצועי המשתתפים – דבר שמצביע על עומס קוגניטיבי שונה עבור נקודת ההתחלה המרכזית.

● קורלציית Spearman

מבחן זה בודק את עוצמת וכיוון הקשר בין שני משתנים על בסיס דירוגים, מבלי להניח התפלגות נורמלית. במחקר שלנו, בו נצפו מגמות הדרגתיות כגון שיפור בתנועת ההתחלה או דיוק המסלול עם התקדמות הניסיונות, קורלציית Spearman מאפשרת לבדוק האם קיים קשר הדרגתי בין המשתנים ואיך הוא משתנה עם הזמן – ובכך מספקת הבנה מעמיקה של מגמות הלמידה.

סיכום כללי:

כל אחד מהמבחנים נבחר בהתבסס על מאפייני הנתונים במחקר שלנו (כגון גודל המדגם והיעדר התפלגות נורמלית) ועל שאלות המחקר המרכזיות – האם הנתונים מתפלגים נורמלית, האם יש הבדלים בין תנאים או קבוצות שונות, והאם קיימת מגמת למידה לאורך הזמן. הבחירה במבחנים אלו, כפי שמתואר בפרק ג', מאפשרת לנו לבחון בצורה מדויקת את השפעות סוגי השליטה, מיקום נקודות ההתחלה, כיווני הסטייה ורמת הרוטציה על ביצועי המשתתפים.

3. תוצאות הניסוי

3.1. הקדמה

בפרק זה נציג את הממצאים שלנו מהנתונים השונים שאנחנו שומרים ממהלך הניסוי. נציג את הנתונים המקוריים, הנתונים המעובדים והמבחנים הסטטיסטיים שאנו מעבירים את המידע דרכם, כמו כן את התוצאות של כל מבחן סטטיסטי ומשמעותו.

בפרק 4 נעבור על התוצאות של המבחנים הסטטיסטיים שנבצע בפרק זה ונסיק מהן מסקנות לגבי שאלות המחקר השונות שלנו.

3.2. הצגת הנתונים ועיבודם

בחלק זה נציג את הנתונים שקיבלנו מהניסוי וכל עיבוד שהנתונים עברו לקראת המבחנים הסטטיסטיים.

שלושת הנתונים שאנחנו אוספים הם: זמן ביצוע המשימה, יעילות המסלול בהשוואה לקו ישר ומסלולי המשתתף עצמם.

1. זמן - את זמן השלמת המשימה אנו בודקים מתחילת התזוזה של המשתתף, עד להגעת הדמות למטרה. את הנתון הזה אנו בודקים בכל ניסיון ובכול סוג שליטה, אבל מציגים אותו בנפרד לכל סוג שליטה.

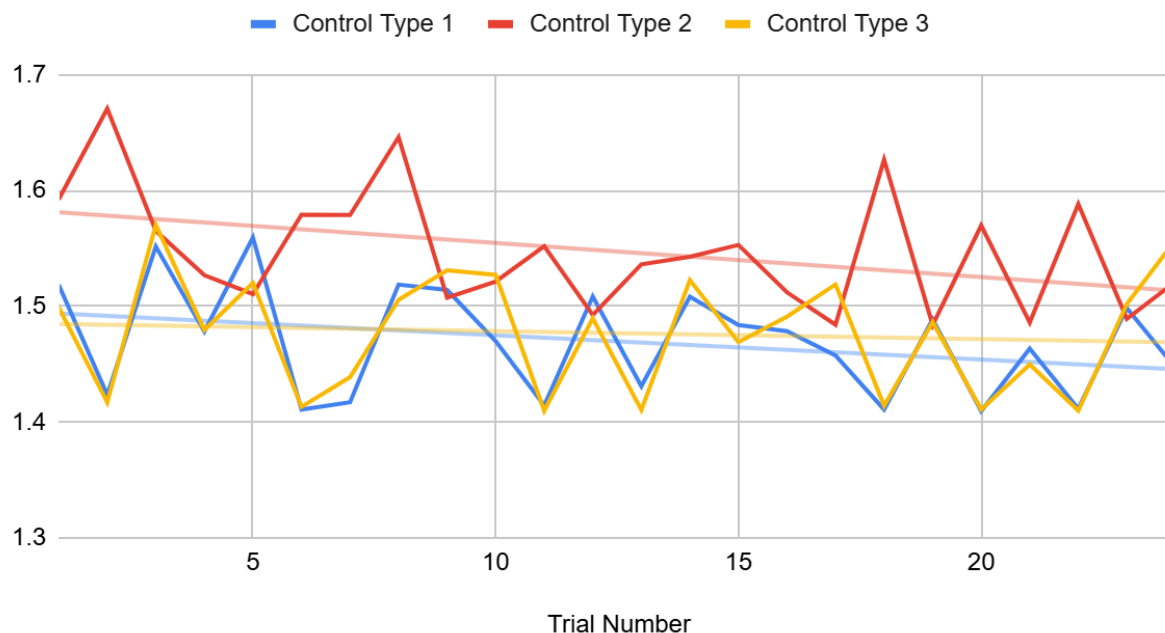
2. יעילות - נתון זה בודק את דיוק המסלול, זאת באמצעות השוואת האורך של המסלול שנלקח מול קו ישר מנקודת ההתחלה לנקודת המטרה.

3. לבסוף, אנו בודקים את המיקום של הדמות כל 0.033 שניות, על מנת שנוכל לראות את המסלול המדויק שהמשתתף לקח בכל ניסיון.

3.2.1. זמן השלמת המשימה

זמן השלמת המשימה מאפשר לנו להבין כמה דברים לגבי ביצוע המשימה. הדבר המרכזי שהוא מאפשר זה בדיקת העדפה של המשתתפים, בין המסלול הישר ביותר (שאנו יכולים לראות בנתונים של יעילות המסלול) לבין הזמן הקצר ביותר. בנוסף, בפשטות נתון זה מביא ממד נוסף לבדיקת הנתונים.

Increasing trends in the various types of control. Time



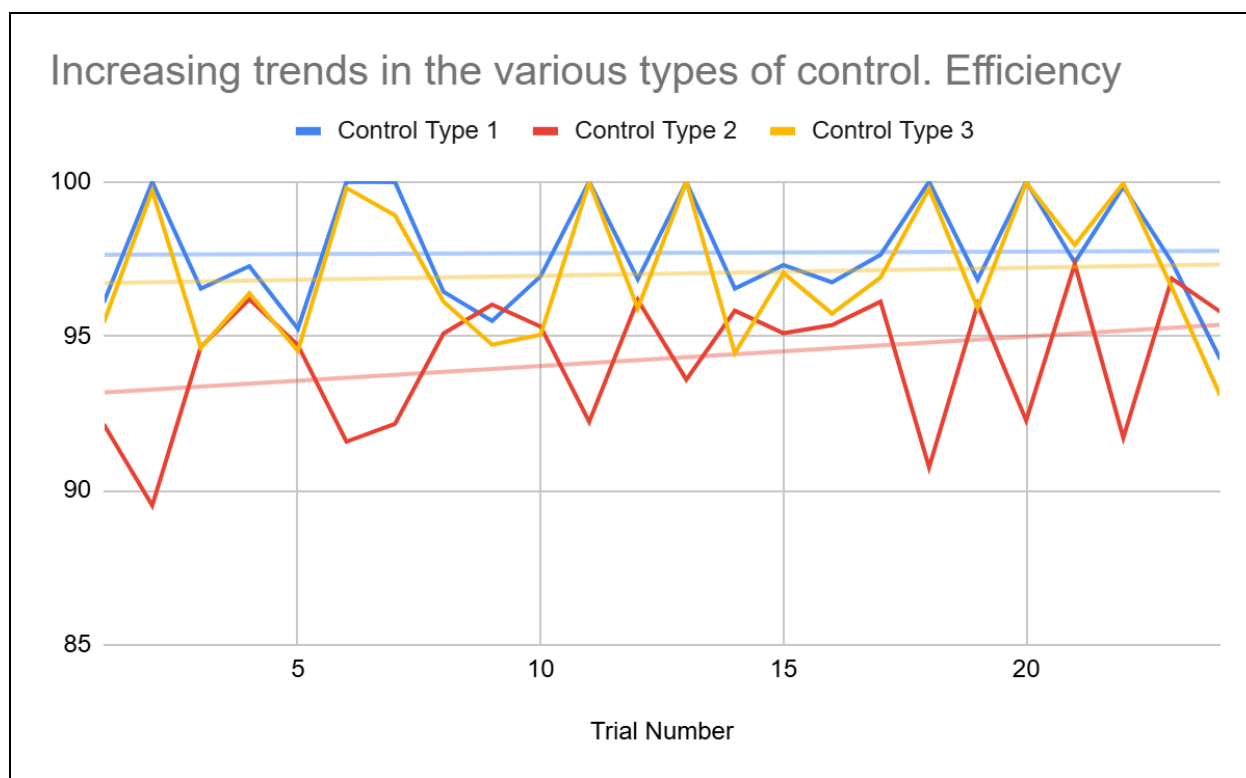
גרף 3.1: זמן השלמת המשימה.

גרף זה מראה את זמן ביצוע המשימה (ציר ה-Y) ומספר הניסיון (ציר ה-X). הקו הכחול מייצג את שלב 1 (שליטה רגילה ראשונה), הקו האדום את שלב 2 (שליטה מסובבת) והקו הצהוב את שלב 3 (שליטה רגילה שנייה). הקווים הבהירים מייצגים את קווי המגמה של שלושת השלבים, בהתאמה לצבעים.

בגרף 3.1 (זמן השלמת המשימה) אפשר להבחין בבירור שיש הבדל בין סוגי השליטה, ועוד יותר מכך שניכר שיפור במהלך כל אחד מסוגי השליטה. מעניין לראות ששני שלבי השליטה הרגילה (כחול וצהוב) דומים מאוד זה לזה, עובדה שיכולה אולי ללמד שהלמידה נשמרה מהשלב הראשון. דבר מעניין נוסף הוא, שהשליטה המסובבת (אדום) נראית כמעט כמו תמונת ראי לשני סוגי השליטה האחרים. בהבחנה זו נדון בהרחבה בפרק דיון ומסקנות (4.3.2).

3.2.2. יעילות המסלול

יעילות המסלול מאפשרת לנו לראות את התמונה הרחבה יותר של המסלולים שנלקחו, באמצעות בדיקת התוואי הממוצע של המסלול לעומת קו ישר. זה מאפשר לנו להבין האם וכמה היה שיפור במסלול שנלקח בכל סוג שליטה ומה היתה מהירות האדפטציה המוטורית הנלמדת.



גרף 3.2: יעילות המסלול.

גרף זה מראה את יעילות המסלול (ציר ה-Y) ומספר הניסיון (ציר ה-X). הקו הכחול מייצג את שלב 1 (שליטה רגילה ראשונה), הקו האדום את שלב 2 (שליטה מסובבת) והקו הצהוב את שלב 3 (שליטה רגילה שנייה). הקווים הבהירים מייצגים את קווי המגמה של שלושת השלבים, בהתאמה לצבעים.

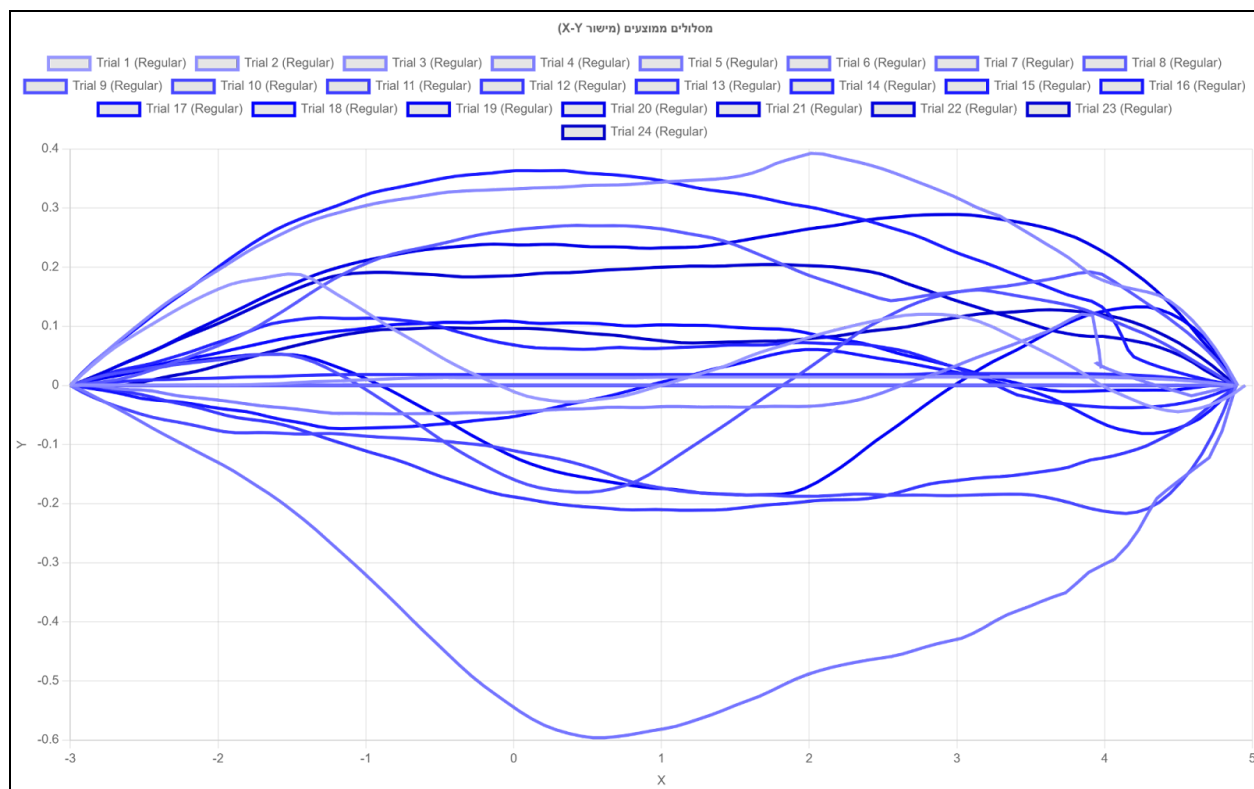
גרף 3.2 (יעילות המסלול) מציג תוצאות דומות מאוד לגרף 3.1 (זמן השלמת המשימה): בין שני סוגי השליטה הרגילים מתקיים דמיון רב, בעוד שהשליטה המסובבת כמצופה מתחילה ברמת ביצוע פחותה בהרבה ובמהלך הניסיונות משתפרת. אך פעם נוספת, מה שמעניין הוא ששתי השליטות הרגילות והשליטה המסובבת נראות כמעט לחלוטין כמו תמונת ראי (דבר שיידון כאמור בתת-פרק 4.3.2).

3.2.3. נתוני המסלול המדויקים

נתוני המסלול המדויקים מאפשרים לנו לבחון מקרוב את התנהגויותיהם והעדפותיהם של המשתתפים, כולל תופעות כגון תיקון יתר במהלך המסלול, הזווית ההתחלתית של כל ניסיון והשיפור שלה לאורך כל סוג שליטה. הגרפים הבאים (3.3, 3.4, 3.5) מציגים את המסלולים הממוצעים של המשתתפים בעלי סטייה ימינה.

בגרף 3.3 (מסלולים של משתתפים זוגיים – שליטה 1) ניתן לראות כי בשליטה הרגילה הראשונה, מאחר ואין רוטציה בשלב זה, רוב המסלולים ישרים יחסית – כלומר, הם נעים בקו ישר מנקודת ההתחלה (משמאל)

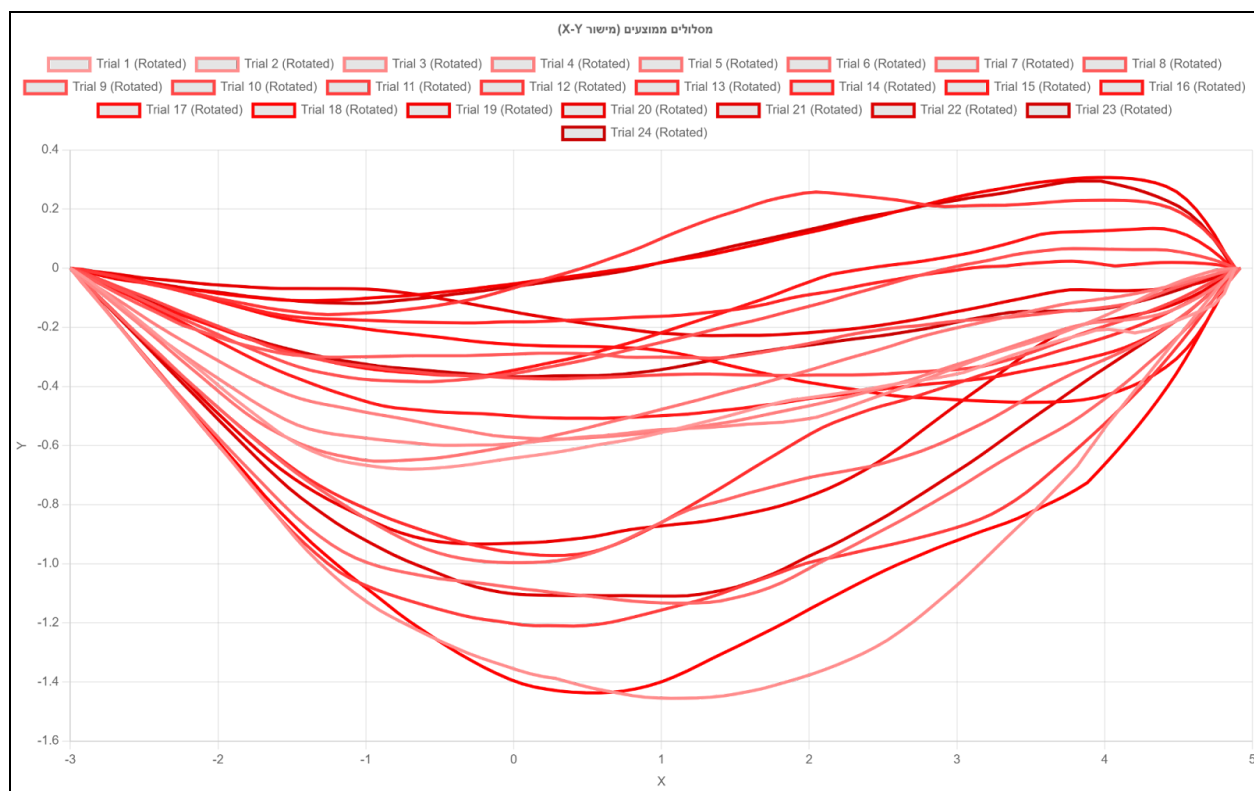
לנקודת המטרה (מימין). כמו כן, בניסיונות הפחות מדויקים, לא נראית העדפה מובהקת לכיוון מסוים (הסטייה נראית זהה בערך לימין ולשמאל).



גרף 3.3: מסלולים של משתתפים זוגיים - שליטה 1.

אלה המסלולים של השליטה הראשונה. הצבע הבהיר ביותר הוא הניסיון הראשון, עד הצבע הכהה ביותר שהוא הניסיון האחרון.

לעומת זאת, בגרף 3.4 (מסלולים של משתתפים זוגיים – שליטה 2) ניתן לראות בבירור את השפעת הרוטציה שהופעלה בשלב זה. מעבר לכך, ניתן להבחין בהתאמה מוטורית מסוימת לאורך שלב זה, שכן לא כל הזוויות ההתחלתיות שומרות על אותה רוטציה. למעשה, חלק מהמשתתפים התחילו להתקרב לקו הישר מול נקודת המטרה, מה שמעיד על תהליך של הסתגלות (הרחבה נוספת - בניתוח סטטיסטי בפרק זה).

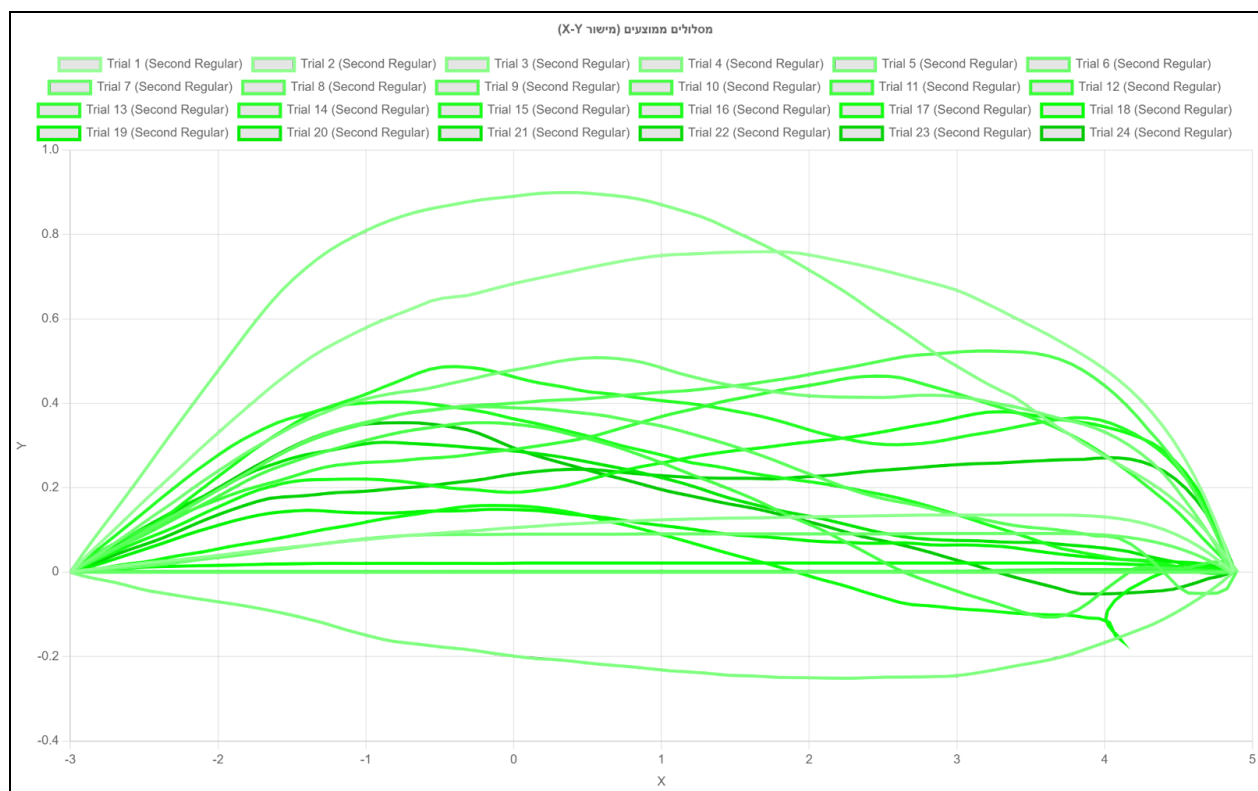


גרף 3.4: מסלולים של משתתפים זוגיים - שליטה 2.

אלה המסלולים של השליטה המסובבת. הצבע הבהיר ביותר הוא הניסיון הראשון, עד הצבע הכהה ביותר שהוא הניסיון האחרון.

לבסוף, בגרף 3.5 (מסלולים של משתתפים זוגיים – שליטה 3) ניתן לראות שיפור משמעותי בעת החזרה לשליטה הרגילה. הדבר בא לידי ביטוי בכך שרוב המסלולים מתחילים בקו ישר לעבר המטרה, והרוטציה שהייתה בגרף 3.4 נעלמה.

נקודה מעניינת נוספת היא האפשרות של תיקון יתר במעבר בין השליטות. ניתן להבחין כי המסלולים שאינם ישרים לחלוטין מציגים רוטציה הפוכה לזו שהופיעה בשליטה המסובבת (גרף 3.4). תופעה זו עשויה להעיד על ניסיון פיצוי של המשתתפים בעקבות ההתאמות שביצעו בשליטה המסובבת.



גרף 3.5: מסלולים של משתתפים זוגיים - שליטה 3.

אלה המסלולים של השליטה הרגילה השנייה. הצבע הבהיר ביותר הוא הניסיון הראשון, עד הצבע הכהה ביותר שהוא הניסיון האחרון.

הנתונים המדויקים של המסלול הם הנתונים שעברו את כמות העיבוד הגדולה ביותר בחלק זה של העבודה. נתונים אלה מחולקים לשתי קבוצות מובהקות:

- קבוצת נתונים שעברה מטריצה סיבובית, שנועדה לאחד את כל נקודות ההתחלה לנקודה אחת ויחידה (גרפים 3.3, 3.4 ו-3.5).
 - הנתונים המקוריים של המסלול (גרפים 3.14, 3.15 ו-3.16), הכוללים את נקודות ההתחלה המקוריות והשונות.
- העברת הנתונים דרך מטריצה סיבובית נועדה לבטל את מרב השינויים בין הקבוצות, שאינם נובעים מהמשתתפים עצמם.
- כמו כן, כל נתוני המסלול עברו אינטרפולציה (הוספת נקודות נוספות בין הנקודות הקיימות), זאת במטרה לנרמל את כמות הנתונים בכל מסלול. העובדה שכל המסלולים זהים באורכם לאחר ביצוע האינטרפולציה, נועדה להקל על ביצוע המבחנים הסטטיסטיים.

3.3. ניתוח סטטיסטי של הנתונים

בחלק זה ננתח את הנתונים שאספנו במהלך הניסוי ונעביר אותם בניתוחים סטטיסטיים (המפורטים לעיל בתת-פרק 2.5), שנוכל להסיק מסקנות מתוצאות הניסוי לשאלות החקר השונות שלנו.

3.3.1. בדיקה מקדימה: נורמליות הנתונים - מבחן Shapiro-Wilk

ביצענו את מבחן Shapiro-Wilk בשלושת סוגי הנתונים השונים – זמן השלמת המשימה, יעילות המסלול ונתוני המסלול המדויקים (נתוני X ו-Y של מהלך כל מסלול) לכל מסלול. תוצאות המבחן הראו כי בכל סוג שליטה (שליטה רגילה – 1, שליטה מסובבת – 2 וחזרה לשליטה רגילה – 3) הערך p היה גדול מ-0.05, מה שמעיד על כך שהנתונים אינם מתפלגים נורמלית בכל הנתונים.

תוצאות מבחן Shapiro-Wilk לזמן השלמת המשימה:

- שליטה רגילה (חלק 1): סטטיסטיקה = 0.519, $p < 0.05$
- שליטה מסובבת (חלק 2): סטטיסטיקה = 0.692, $p < 0.05$
- חזרה לשליטה רגילה (חלק 3): סטטיסטיקה = 0.539, $p < 0.05$

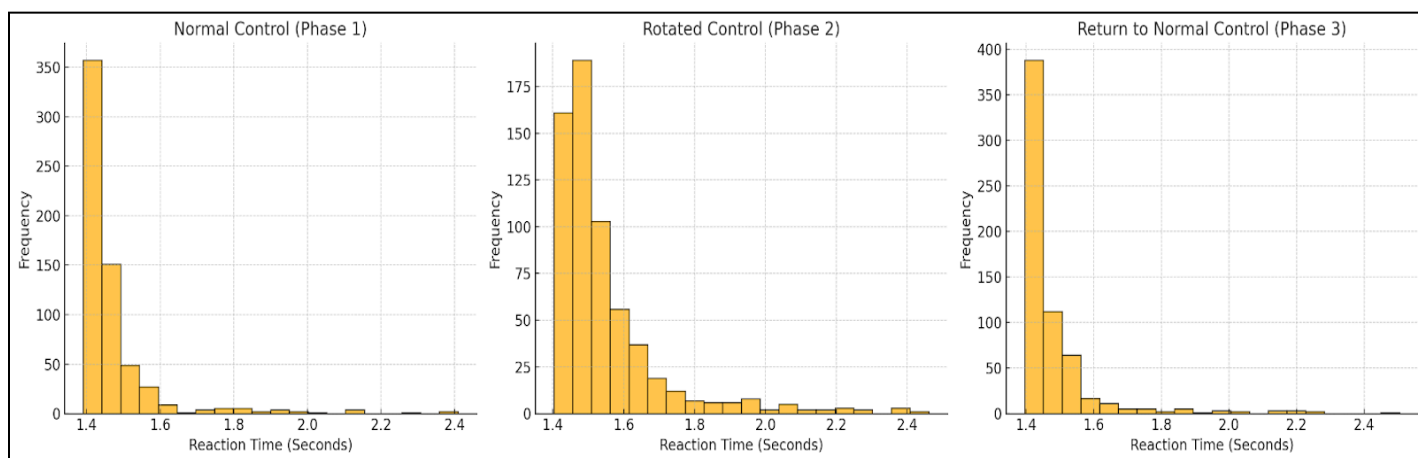
תוצאות מבחן Shapiro-Wilk ליעילות המסלול:

- שליטה רגילה (חלק 1): סטטיסטיקה = 0.904, $p = 0.027$
- שליטה מסובבת (חלק 2): סטטיסטיקה = 0.862, $p = 0.0037$
- חזרה לשליטה רגילה (חלק 3): סטטיסטיקה = 0.864, $p = 0.0041$

בדומה לשני סוגי הנתונים לעיל, נתוני נקודות X ו-Y של נתוני המסלול המדויקים הראו גם הם התפלגות א-נורמלית.

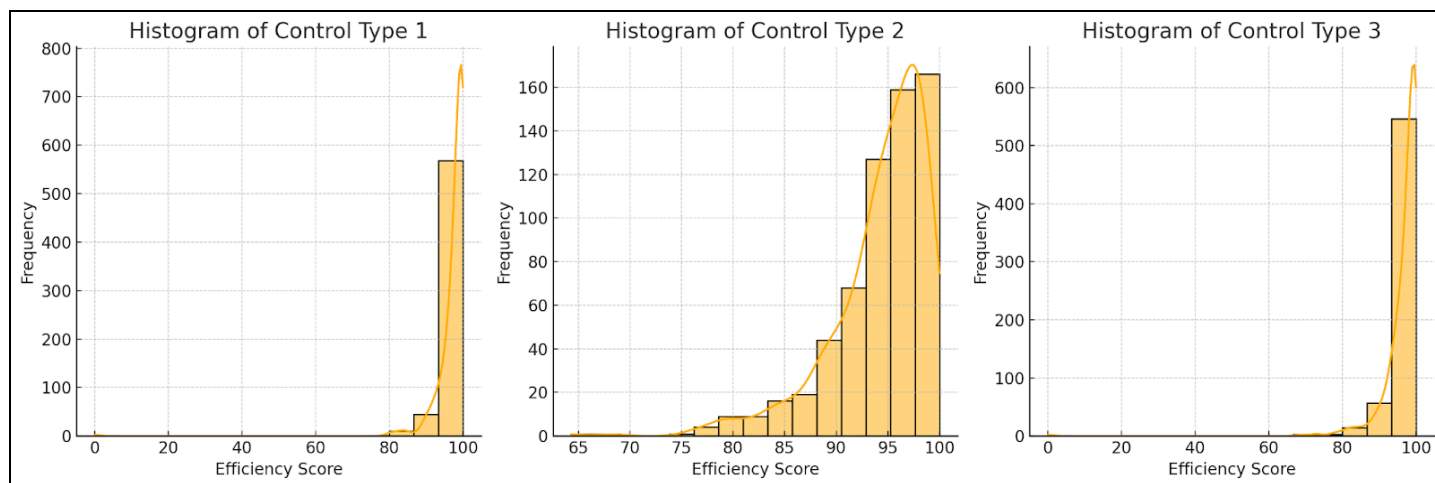
הגרפים המצורפים (גרף 3.6 – התפלגות זמני הגעה למטרה וגרף 3.7 – התפלגות יעילות המסלול) מראים כי התפלגות הנתונים אינה נורמלית: ההתפלגויות מציגות זנב מתמשך ושונות ברורה בין סוגי השליטה, כאשר השליטה המסובבת מציגה את הווריאציה הגדולה ביותר.

מכיוון שהתפלגות הנתונים אינה נורמלית, החלטנו להשתמש במבחנים לא-פרמטריים להמשך הניתוח. הסיבה לכך הוא שמבחנים פרמטריים (כגון מבחן T) מסתמכים על כך שהנתונים מתפלגים נורמלית, מה שעלול להביא לתוצאות שגויות במקרים שהנחה זו אינה קיימת.



גרף 3.6: התפלגות זמני הגעה למטרה.

גרף זה מציג את ההתפלגות של זמני הגעה למטרה בכל סוג שליטה (משמאל לימין): שליטה רגילה ראשונה, שליטה מסובבת ושליטה רגילה שנייה. אנו רואים שהתפלגות זמני השליטה אינה התפלגות נורמלית אלא התפלגות עם "זנב".



גרף 3.7: התפלגות יעילות המסלול.

הגרף מציג את מבנה הנתונים לפני השוואה נוספת, בכל סוג שליטה (משמאל לימין): שליטה רגילה ראשונה, שליטה מסובבת ושליטה רגילה שנייה.

3.3.2. זמן ביצוע המשימה

3.3.2.1. השוואת זמני תגובה בין שלבים - מבחן פרידמן

ממצאי המבחן ($p \ll 0.05$) מעידים על שינוי מובהק בזמני השלמת המשימה בין השלבים – כלומר, לפחות אחד מהשלבים מציג ביצועים שונים לעומת האחרים. תוצאה זו מצביעה על כך ששינוי סוג השליטה אכן השפיע על זמני התגובה. המשמעות היא שנוכל להתקדם בבירור ובביטחון אל ניתוחים סטטיסטיים נוספים, במטרה לזהות בדיוק את רמת השינוי ומקומו, ולאבחן באילו תנאים נרשמו השינויים על מנת להבין את הגורמים לכך.

3.3.2.2. השוואת שלבים זוגיים - Wilcoxon Pairwise

כדי להבין היכן קיים שינוי משמעותי בין השלבים, ביצענו השוואות זוגיות באמצעות מבחן Wilcoxon Pairwise. נציג את תוצאות המבחן בטבלה (3.1) ובגרף (3.8) ונסביר את משמעותן.

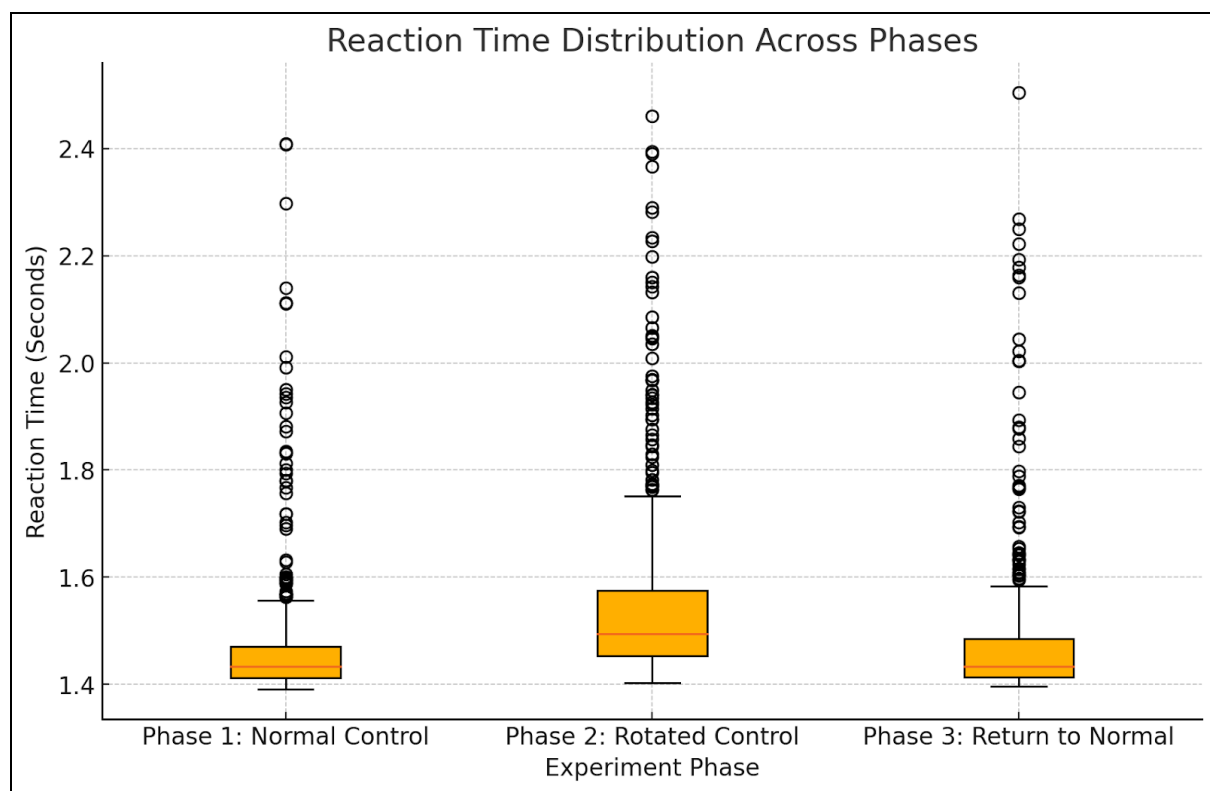
השוואת שלבים	p-value	סטטיסטיקה Wilcoxon	תוצאה
שליטה רגילה לעומת שליטה מסובבת	$p < 0.05$	37897.5	המעבר לשליטה מסובבת הביא להארכת זמני התגובה באופן מובהק.
שליטה מסובבת לעומת שליטה רגילה שנייה	$p < 0.05$	45620.0	חזרה לשליטה רגילה הורידה באופן מובהק את זמני התגובה.
שליטה רגילה ראשונה לעומת שליטה רגילה שנייה	$p = 0.176$	85231.0	אין הבדל מובהק – המשתתפים חזרו לרמות שליטה הדומות לשליטה המקורית.

טבלה 3.1: תוצאות מבחן Wilcoxon Pairwise לזמן הביצוע.

טבלה זו מראה את תוצאות המבחן בקבוצות השוואה שונות, את ערך ה-p והסטטיסטיקה מהמבחן עצמו.

התוצאות מצביעות על כך ששינוי סוג השליטה משפיע באופן מובהק על זמני השלמת המשימה. המעבר משליטה רגילה לשליטה מסובבת האריך את זמני התגובה – מה שמעיד על כך שהחיזוי המוטורי שהמשתתף פיתח בסוג שליטה רגילה (סוג 1) אבד כאשר נדרשה התאמה לשליטה מסובבת, מה שדרש תגובה שונה מהמצופה והביא לעלייה בזמני ההגעה.

לעומת זאת, כאשר המשתתפים חזרו לשליטה רגילה בשלב השני, זמני התגובה קוצרו בצורה מובהקת, מה שמרמז על שחידוש מודל החיזוי המוטורי מאפשר התאמה מחדש לסטנדרט הקיים. העובדה שאין הבדל מובהק בין שני שלבי השליטה הרגילה מצביעה על כך שהלמידה ומודל החיזוי נישמרו גם במצבים בהם נרשמה הפרעה זמנית בשל שינוי סוג השליטה.



גרף 3.8: פיזור של זמני ההגעה למטרה.

הגרף מציג את הפיזור של זמני ההגעה למטרה עבור סוגי השליטה (משמאל לימין): שליטה רגילה ראשונה, שליטה מסובבת ושליטה רגילה שנייה. בכל קופסה הקו האמצעי מציין את החציון, כאשר הקופסאות מייצגות את הרבעון הראשון והשלישי (המקיף 50% מהמשתתפים) והנקודות מחוץ לקופסאות הן הערכים הקיצוניים.

3.3.2.3. מגמת למידה לאורך הניסיונות - רגרסיה ליניארית

שלב	משוואת הרגרסיה $Y = \text{זמן השלמת המשימה}$ $X = \text{מספר ניסיון}$	p - value	תוצאה
שלב 1 – שליטה רגילה	$y^{\wedge}=1.50-0.0021x$	0.003	ירידה מתונה בזמני התגובה (0.0021) שניות בכל ניסיון)
שלב 2 – שליטה מסובבת	$y^{\wedge}=1.58-0.0029x$	0.001	ירידה משמעותית ומהירה בזמני התגובה (0.0029) שניות בכל ניסיון)
שלב 3 – שליטה רגילה שנייה	$y^{\wedge}=1.49-0.0007x$	0.362	אין שינוי משמעותי – המשתתפים כבר הסתגלו לשליטה הרגילה

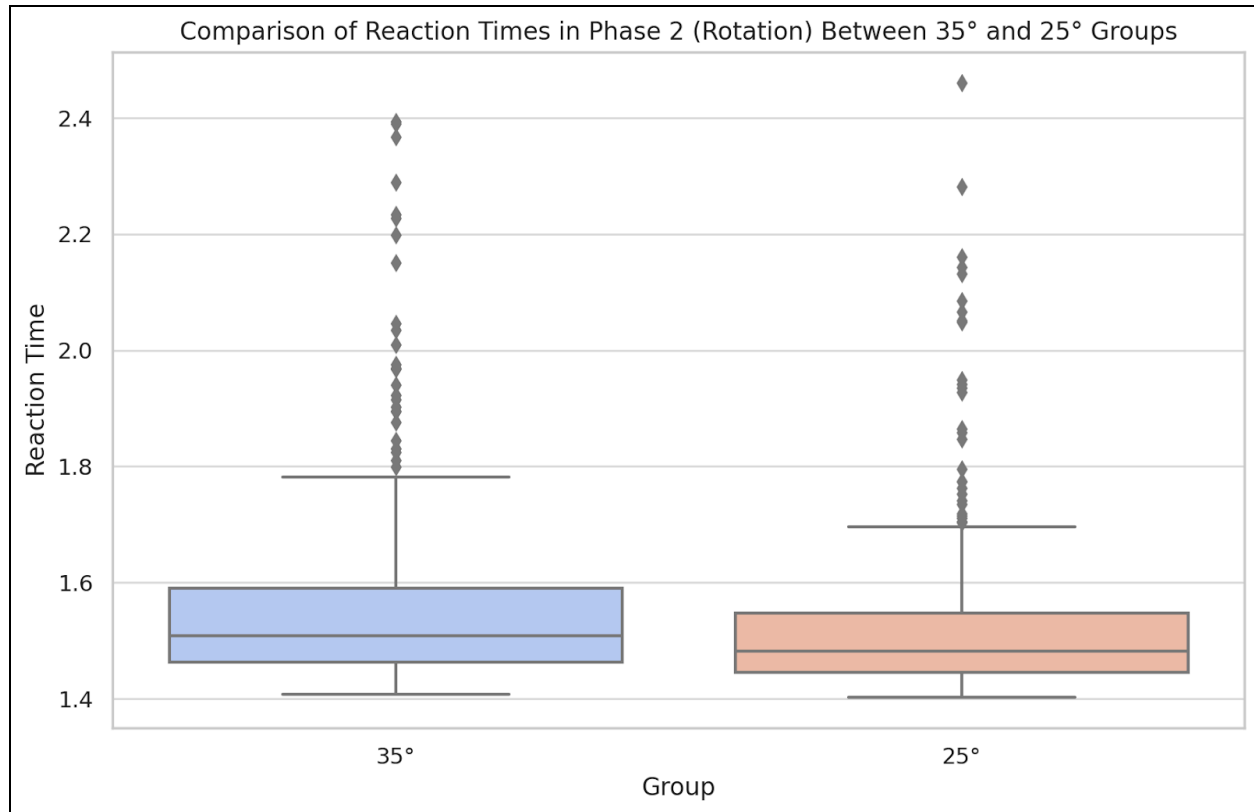
טבלה 3.2: תוצאות מבחן רגרסיה ליניארית לזמן הביצוע.

טבלה זו מראה את תוצאות המבחן בקבוצות השונות, את ערך ה-p והסטטיקטיקה המוצגת מהמבחן עצמו.

בשליטה 1 נרשמה ירידה מתונה בזמני התגובה. בשליטה 2 נרשמה ירידה מהירה יותר, המעידה על כך שהמשתתפים למדו והסתגלו בצורה יעילה לרוטציה, ובמהלך סוג שליטה זה, הצליחו להוריד את זמני השלמת המשימה באופן ניכר. בשלב 3 לא נרשם שינוי משמעותי, מה שמצביע על כך שהמשתתפים כבר הסתגלו לשליטה הרגילה בתחילת הניסוי ואין צורך בשיפור נוסף.

3.3.2.4. השוואת קבוצות הרוטציה (35° מול 25°) Mann-Whitney U

תוצאות מבחן Mann-Whitney U הראו כי משתתפי הקבוצה שהתאמנה עם רוטציה של 35° היו איטיים יותר ממשתתפי הקבוצה עם רוטציה של 25° באופן מובהק ($p = 0.030$).



גרף 3.9: הבדלים בין קבוצות הרוטציה השונות.

גרף זה מציג את ההבדל בין הקבוצה שהייתה בשליטה מסובבת של 35 מעלות לקבוצה שהייתה עם רוטציה של 25 מעלות.

גרף 3.9 מציג את ההבדל:

- קבוצת 35°: הקופסה (המייצגת את הרבעון הראשון והשלישי) ממוקמת גבוה יותר בציר ה-Y, מה שמעיד על זמני תגובה ארוכים יותר, והפיזור הרחב מצביע על שונות גבוהה – חלק מהמשתתפים הצליחו להסתגל במהירות, בעוד שלאחרים נדרש זמן רב יותר.
- קבוצת 25°: הקופסה ממוקמת נמוך יותר, מה שמצביע על זמני תגובה קצרים יותר.

תוצאות הניסוי מראות ששינוי רמת הרוטציה משפיע באופן משמעותי על ביצועי המשתתפים. בזווית רוטציה של 35° נרשמו זמני תגובה ארוכים יותר, כפי שציפינו, בשל העובדה שהשינוי שהוכנס למשימה היה אינטנסיבי וגדול יותר בהשוואה לקבוצת הרוטציה של 25°. תוצאה זו מצביעה על כך שהחיזוי המוטורי שהמשתתף פיתח בסיטואציה המקורית נפגע, מה שדרש התאמה שונה ובכך הביא להארכת זמני התגובה.

3.3.2.5. ממוצע חמשת הניסיונות הראשונים בכל סוג שליטה

בדקנו את חמשת הניסיונות הראשונים בכל שלב :

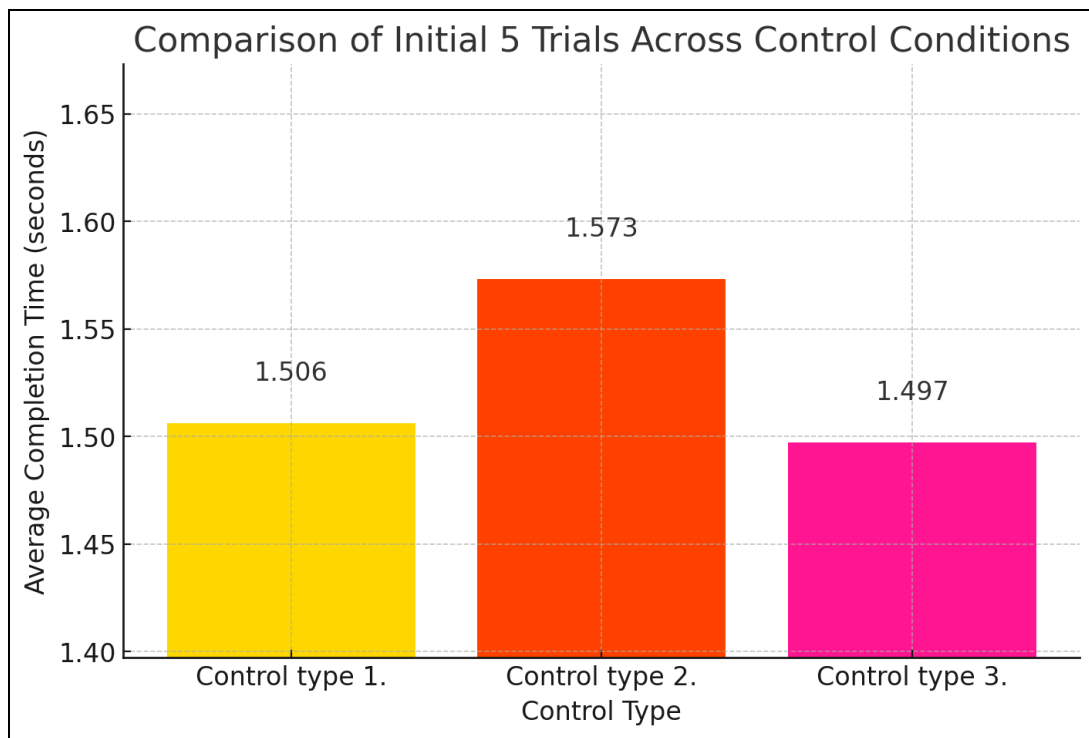
שלב	זמן תגובה ממוצע (5 ניסיונות ראשונים)
שליטה רגילה (שלב 1)	1.506 שניות
שליטה מסובבת (שלב 2)	1.573 שניות (התחלה קשה יותר)
חזרה לשליטה רגילה (שלב 3)	1.497 שניות (כמעט זהה לשליטה הרגילה)

טבלה 3.3: זמנים ממוצעים ל-5 הניסיונות השונים בכל סוג שליטה.

אפשר לראות בגרף 3.10 שכפי שציפינו, כבר בחמשת הניסיונות הראשונים של השלב הראשון ישנו זמן התחלתי טוב של 1.5 שניות.

בשלב השני רואים שהזמן עולה משמעותית, מ-1.5 ל-1.6, שזו עלייה די משמעותית בטווחים שאנו מדברים עליהם. גם הבדל זה הוא צפוי, משום שהמשתתף לא היה מוכן לשינוי הדרמטי בשליטה על הדמות.

אבל מה שבאמת מעניין הוא שבשלב האחרון, באופן כמעט מיידי הזמן נהיה טוב מאוד - טוב יותר אפילו מהשלב הראשון. זה אומר שהלמידה מהשלב הראשון נשארה איתנה, ומתי שהמשתתף הרגיש שהמשחק מחזיר אותו לסוג שליטה זה, הוא ידע להגיב באופן נכון ומהיר לשינוי. המשתתפים לא חזרו לזמני תגובה ארוכים בשלב 3. הם שמרו את הלמידה שעברו בשליטה 1 (שליטה רגילה), ולכן הביצועים שלהם חזרו להיות טובים כבר מהניסיונות הראשונים.



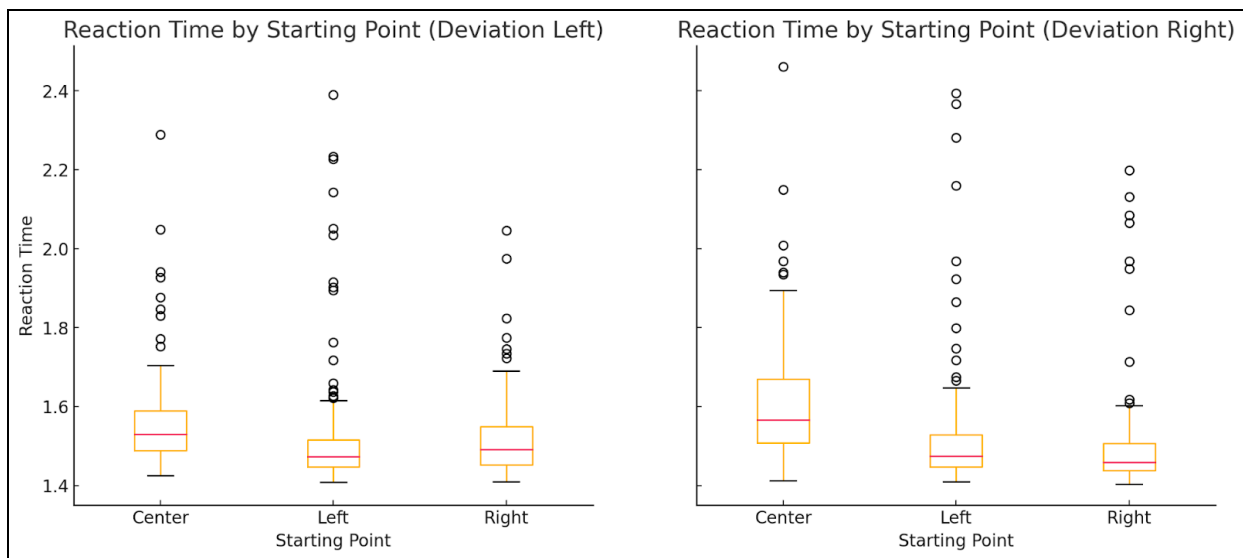
גרף 3.10: זמני השלמת המשימה ראשוניים.
 זמנים ממוצעים של חמשת הניסיונות הראשונים בכל סוג שליטה:
 שליטה רגילה - צהוב, שליטה מסובבת - אדום, שליטה רגילה שנייה - סגול.

3.3.2.6. השפעת נקודת ההתחלה על זמני השלמת המשימה (מבחן Kruskal-Wallis)

מבחן Kruskal-Wallis הראה הבדלים מובהקים בין נקודות ההתחלה.

שלב	סטטיסטיקת Kruskal-Wallis	p-value
שליטה רגילה (Normal)	292.52	$p < 0.0001$
שליטה מסובבת (Rotated)	84.11	$p < 0.0001$
חזרה לשליטה רגילה	307.61	$p < 0.0001$

טבלה 3.4: תוצאות מבחן Kruskal-Wallis לנקודות ההתחלה השונות.
 טבלה זו מראה את תוצאות המבחן בקבוצות השונות, את ערך ה-p ואת הסטטיסטיקה מהמבחן עצמו.



גרף 3.11: הבדלים בין נקודות ההתחלה בשני כיווני הסטייה.

משמאל גרף של כיוון סטייה לצד שמאל, מימין גרף של כיוון סטייה לצד ימין.

ציר $Y =$ זמני השלמת המשימה, ציר X מחולק לנקודות ההתחלה השונות (משמאל לימין): אמצע, שמאל, ימין.

בשני הגרפים אפשר לראות שנקודות ההתחלה האמצעית שונה באופן ניכר משתי נקודות ההתחלה האחרות.

מתוצאות המבחן נמצא כי נקודת ההתחלה האמצעית שונה משמעותית מהאחרות, מה שיכול להעיד על עומס קוגניטיבי גבוה יותר בקבלת החלטות (נרחיב על כך בפרק 4). חשוב לציין: לא נמצא הבדל מובהק בין נקודת התחלה ימנית לשמאלית, לא בניתוח הכללי ולא כאשר בדקנו כל אחד מכיווני הסטייה בנפרד.

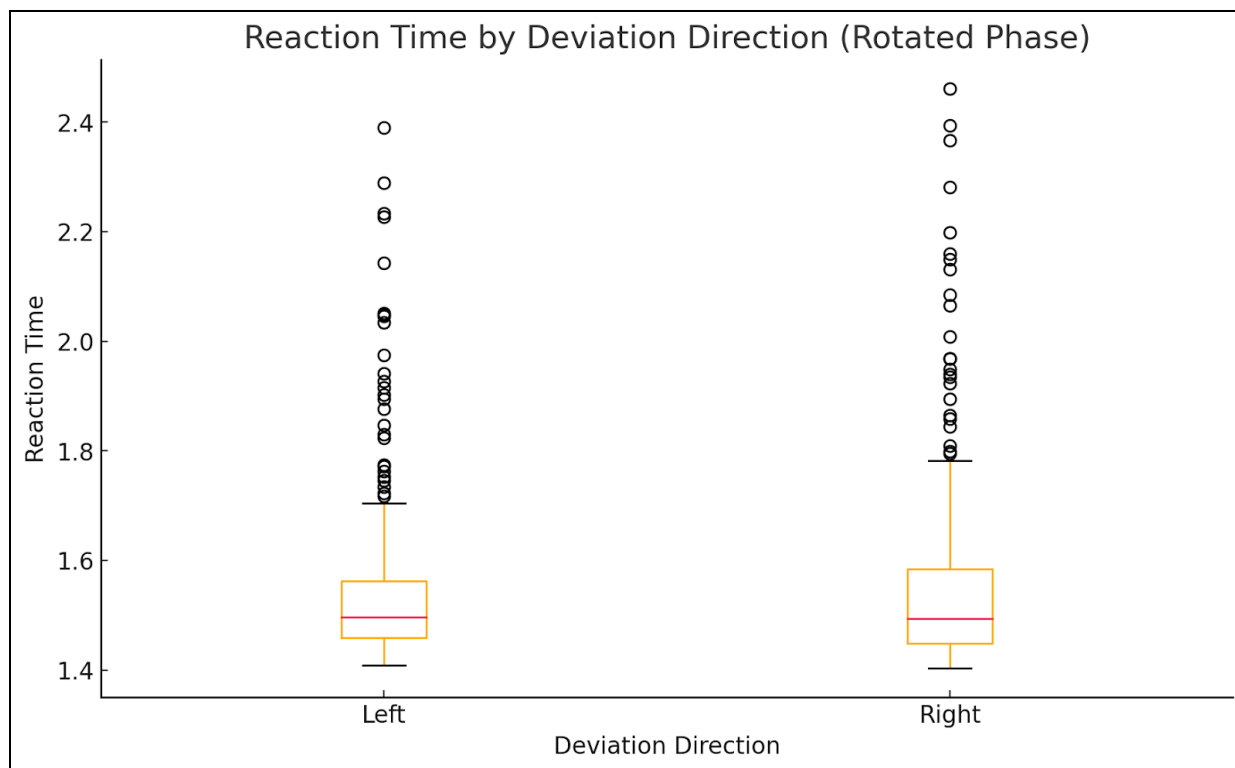
3.3.2.7. השפעת כיוון הסטייה על זמן תגובה (Mann-Whitney U)

מבחן Mann-Whitney U מצא כי אין הבדל מובהק בין משתתפים שהוסטו ימינה לעומת שמאלה.

כיווני סטייה	סטטיסטיקת Mann-Whitney U	p-value
סטייה ימנית ושמאלה	47553.5	0.62

טבלה 3.5: תוצאות מבחן Kruskal-Wallis לכיווני הסטייה השונים.

טבלה זו מראה את ערך ה-p והסטטיסטיקה המוצגת מהמבחן עצמו.



גרף 3.12: הבדלים בין כיווני סטייה שונים.
 בציר Y - זמן השלמת המשימה. בציר X - משמאל הניסיונות עם סטייה שמאלה, מימין הניסיונות עם סטייה ימינה.

בגרף 3.12 ובטבלה 3.5 אפשר לראות שאין הבדל משמעותי סטטיסטית בזמני הגעה למטרה בין כיווני הסטייה השונים. לכן, כפי שציפינו, תהליך ההסתגלות לשינוי ברוטציה אינו תלוי בכיוון הסטייה. הוא תלוי כנראה במשתנים אחרים כגון עצם קיום הרוטציה, זווית הרוטציה, מספר ניסיונות, העדפת אישיות של המשתתפים ועוד.

3.3.2.8. סיכום ניתוח זמני השלמת המשימה

1. המשתתפים השתפרו עם הזמן: למידה הדרגתית בשליטה רגילה, שיפור חד בשליטה מסובבת ושמירה על הלמידה בשלב 3.
2. השליטה המסובבת גרמה לקושי בהתחלה, אך המשתתפים הסתגלו במהירות.
3. הרוטציה של 35° הייתה קשה יותר מרוטציה של 25° .
4. המשתתפים לא איבדו את הלמידה – הביצועים שלהם חזרו לרמה רגילה מיד לאחר תום השליטה המסובבת.

5. כיוון הסטייה (ימינה/שמאלה) לא שינה את יכולת ההסתגלות – תהליך הלמידה סימטרי.
6. משתתפים שהתחילו מנקודת ההתחלה האמצעית היו שונים משמעותית מהאחרים, אולי בגלל עומס קוגניטיבי גבוה יותר בשליטה המסובבת.

3.3.3. יעילות המסלול

3.3.3.1. השוואת מסלולי התנועה בין יעילות השלבים השונים (מבחן פרידמן)

ממצאי מבחן פרידמן הראו הבדל מובהק סטטיסטית בין שלושת השלבים ($p < 0.05$). כלומר, ישנו שינוי בין יעילות המסלולים בכל סוג שליטה. תוצאה זו לא מחדשת לנו הרבה בפני עצמה, אך היא נותנת לנו ביטחון שיש שינוי בין סוגי השליטה מלכתחילה.

3.3.3.2. השוואת יעילות השלבים השונים (Wilcoxon Pairwise)

כדי להבין היכן מתרחשים השינויים, ביצענו השוואות בין כל שני שלבים בנפרד:

השוואת שלבים	p-value	מסקנה
שלב 1 → 2	$p < 0.05$	קיים שינוי מובהק – המעבר לשליטה מסובבת השפיע על המסלול והביא לעלייה בזמני התגובה ולירידה ביעילות.
שלב 2 → 3	$p < 0.05$	קיים שינוי מובהק – חזרה לשליטה רגילה שיפרה את המסלול והורידה את זמני התגובה באופן מובהק.
שלב 1 → 3	$p = 0.176$	אין שינוי מובהק – המשתתפים חזרו למסלול דומה לשליטה הראשונית.

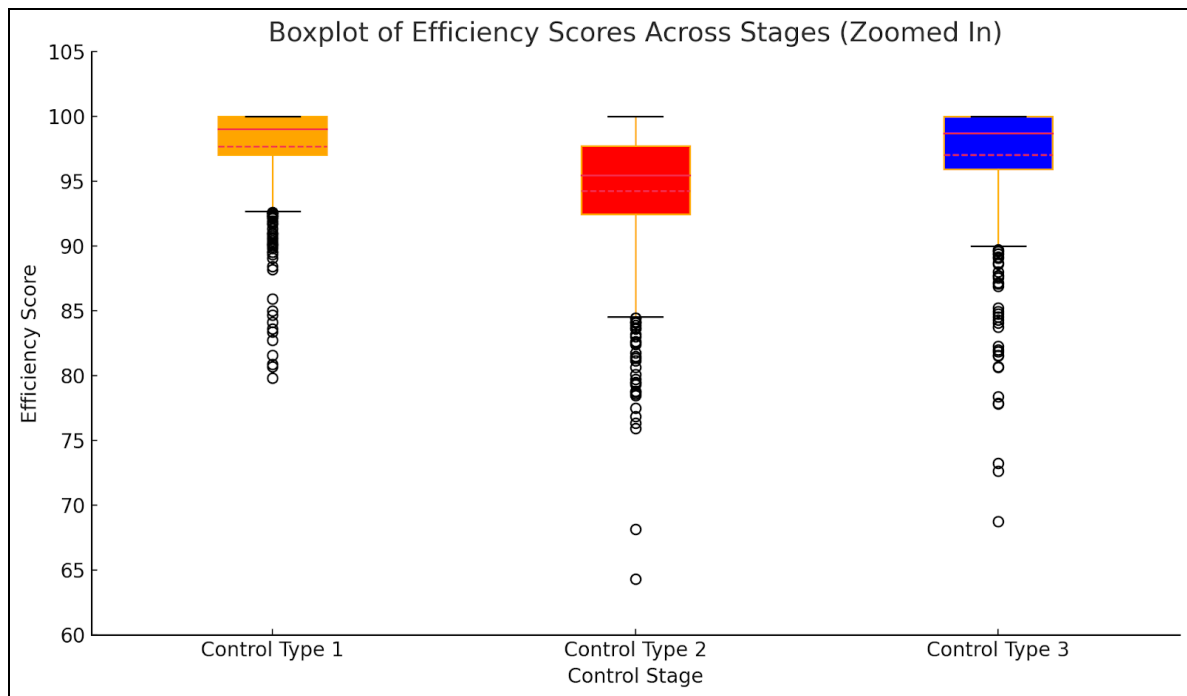
טבלה 3.6: תוצאות מבחן Wilcoxon Pairwise ליעילות שלבי השליטה השונים.

טבלה זו מראה את השלבים המשווים וערך ה-p המוצג מהמבחן.

בהתבסס על תוצאות מבחן Wilcoxon Pairwise, ניכר כי המעבר בין שליטה רגילה ראשונה לשליטה מסובבת היה מלווה בשינוי משמעותי – הכנסת הרוטציה (שליטה מסובבת) דרשה מהמשתתפים למידה מחדש והתאמה, מה שהשפיע לרעה על יעילות המסלול.

במעבר בין שליטה מסובבת לשליטה רגילה שנייה נרשם שיפור מובהק – המשתתפים הצליחו לשפר את ביצועיהם ולהשיג מסלול יעיל יותר, דבר המעיד על כך שהלמידה שנרשמה בשלב הראשון נמשכה גם כאשר נדרש מהם לנהל פעולה בצורה שונה באופן זמני.

בנוסף, העובדה שלא נרשם הבדל מובהק בין שליטה רגילה ראשונה לשליטה רגילה שנייה מצביעה על כך שהלמידה שהושגה בסוג השליטה המקורי נשמרה, גם לאחר שהמשתתף נדרש לנתב מחדש את פעולתו בשל שינוי זמני בסוג השליטה.



גרף 3.13: הבדלים בין יעילות המסלול בשליטות השונות.

הגרף מציג את יעילות המסלול עבור שלושה מצבים: שליטה רגילה ראשונה (צהוב), שליטה מסובבת (אדום) ושליטה רגילה שנייה (כחול). ניכר כי שליטה מסובבת הייתה יעילה פחות מסוגי השליטה האחרים, אשר מציגים ביצועים דומים זה לזה.

גרף 3.13 מעיד על כך שהשינויים שהוכנסו במהלך הניסוי (במיוחד המעבר לשליטה מסובבת) השפיעו באופן מובהק על ביצועי המשתתפים, ומצביע על כך שהלמידה והסתגלותם של מודלי החיזוי שדנו עליהם בפרק המבוא, נדרשו להילמד מחדש בעת שינוי משמעותי בשיטת השליטה (השליטה המסובבת), תוך שמירה על היציבות של הלמידה בכל מקרה שבו נדרש לנהל פעולה במצב של שליטה רגילה (המעבר חזרה לשליטה הרגילה השנייה).

3.3.3.3. מגמת למידה לאורך הניסיונות (רגרסיה ליניארית)

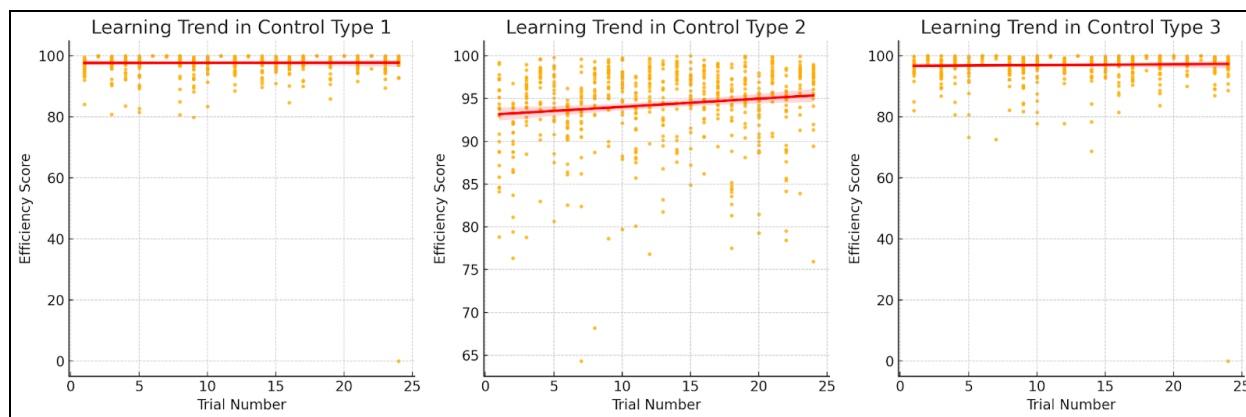
בטבלה 3.7 ובגרף 3.14 אנו רואים את התוצאות הבאות:

- **שליטה רגילה (שלב 1):** קו כמעט שטוח, המעיד על כך שאין שינוי משמעותי ביעילות לאורך הניסיונות.
- **שליטה מסובבת (שלב 2):** בתחילה נרשמה יעילות נמוכה מאוד, אך עם התקדמות הניסיונות נרשם שיפור דרמטי – מה שמעיד על למידה מהירה והסתגלות משמעותית לשינוי הרוטציה.
- **חזרה לשליטה רגילה (שלב 3):** המשתתפים חזרו לביצועים טובים מאוד, כאשר קו המגמה כמעט שטוח – מה שמצביע על כך שאין צורך בשיפור נוסף.

סוג שליטה	שיפוע הרגרסיה	p-value	R-squared	מסקנה
שליטה רגילה (שלב 1)	קרוב ל-0	$p > 0.05$	נמוך	אין שינוי משמעותי – המשתתפים לא שיפרו את יעילות המסלול בצורה בולטת.
שליטה מסובבת (שלב 2)	שיפור חיובי משמעותי	$p < 0.05$	גבוה	נרשמה למידה משמעותית – המשתתפים שיפרו באופן דרמטי את יעילות המסלול במהלך הניסיונות.
חזרה לשליטה רגילה (שלב 3)	שיפור קל	$p > 0.05$	נמוך	אין שיפור נוסף – המשתתפים כבר הגיעו לרמת ביצוע אופטימלית.

טבלה 3.7: תוצאות מבחן רגרסיה ליניארית לבדיקת מגמת למידה של יעילות המסלולים.

טבלה זו מראה את השלבים המושוים, שיפוע הרגרסיה, R-squared (מציג את משמעות הרגרסיה) ערך ה-p המוצג מהמבחן עצמו וההבנה שלנו מתוצאות אלו.



גרף 3.14: מגמת הלמידה לאורך הניסיונות.

על ציר Y יעילות המסלול ועל ציר X מספר הניסיון. קווי המגמה של סוגי השליטה בסדר עולה משמאל לימין.

תוצאות הרגרסיה מראות בצורה ברורה כי בשלב 2, כאשר המשתתפים נדרשו להתמודד עם רוטציה חדה (שליטה מסובבת), נרשם שיפור משמעותי ביעילות המסלול (מהניסיונות הראשונים, בעלי העיגולות הנמוכה ביותר, לניסיונות האחרונים, אם מסלולים יעילים בהרבה) – מה שמעיד על למידה ואדפטציה מהירה לשינוי שהוכנס. בנוסף, החזרה לשליטה רגילה בשלב 3 התבצעה במהירות, כאשר המשתתפים שמרו על ביצוע אופטימלי, מה שמצביע על כך שהלמידה שהושגה בשלב 2 נמשכה גם לאחר חזרה למצב המקורי. תוצאות אלו מעניקות לנו ביטחון בכך שמודל החיזוי הנדון במבוא (פרק 1) מצליח להסתגל לשינויים בצורה מהירה, ובכך מאפשרות הבנה מעמיקה יותר של תהליכי הלמידה וההסתגלות במהלך ביצוע משימות מורכבות.

3.3.3.4. השוואת קבוצות הרוטציה (35° מול 25°) – מבחן Mann-Whitney U

כדי לבדוק האם יש הבדל משמעותי בין שתי קבוצות הרוטציה, השוונו בין ביצועי המשתתפים ברוטציה של 35° לבין אלו ברוטציה של 25°.

קבוצה	p-value	מסקנה
35° מול 25°	$p = 0.237$	אין הבדל מובהק סטטיסטית

טבלה 3.8: תוצאות מבחן Mann-Whitney U להשוואת קבוצות הרוטציה השונות.

טבלה זו מראה את השלבים המושבים וערך ה-p המוצג מהמבחן.

בשונה מהתוצאות שקיבלנו בהשוואה בין זמני השלמת המשימה בזוויות הרוטציה השונות, כאן לא היה שינוי מובהק סטטיסטית (טבלה 3.8).

3.3.3.5. סיכום ניתוח יעילות המסלול

1. המשתתפים אכן למדו להתמודד עם שליטה מסובבת והשיפור שלהם היה מובהק סטטיסטית.
2. לא נמצא הבדל מובהק בין קבוצות הרוטציה (35° מול 25°), כלומר הקושי ברוטציה לא השפיע באופן משמעותי על מהירות הלמידה.
3. המשתתפים חזרו לביצועים דומים בשליטה הרגילה השנייה, מה שמעיד על שמירת הלמידה לאורך זמן.

3.3.4. ניתוח מסלולים מדויקים (מסלולי המשתתפים)

בחלק זה ננתח את נתוני המסלולים שהתקבלו מהניסוי ונבחן כיצד סוגי השליטה השונים משפיעים על דיוק, למידה ותיקון תנועה. הנתונים מחולקים לשתי קבוצות עיקריות: משתתפים עם סטייה ימינה ומשתתפים עם סטייה שמאלה.

מכיוון שבמסגרת השליטה המסובבת יש שני כיווני סטייה מנוגדים, יש לנתח את שתי הקבוצות בנפרד. שכן אם ננתח אותן יחד, תוצאות הסטיות יתבטלו והגרף יראה כמעט כקו ישר, מה שמעלים את יכולתנו לזהות את ההבדלים המובהקים. לכן, ננתח כל קבוצה באופן עצמאי, כדי לחשוף בצורה מדויקת את ההשפעה של השליטה המסובבת. הניתוח המרכזי יבוצע תחילה על הקבוצה עם סטייה ימינה, ובמידה והתוצאות יהיו מובהקות, נמשיך לנתח גם את הקבוצה עם סטייה שמאלה.

3.3.4.1. השוואת המסלולים המדויקים בין סוגי השליטה (מבחן פרידמן)

תוצאת מבחן פרידמן ($p < 0.0001$) מעידה באופן חד וברור שקיים הבדל מובהק סטטיסטית בדיוק המסלול בין שלושת סוגי השליטה. משמעות הדבר היא שההבדלים שנסקרו אינם מקריים, אלא נובעים מהשפעה ממשית של סוג השליטה על דיוק המסלול. תוצאה זו מאפשרת לנו להסיק שצורות השליטה השונות משפיעות באופן משמעותי על הביצוע של המשתתפים. כמו כן, תוצאה זאת מאפשרת לנו לחקור לעומק איזה סוג שליטה מביא לתוצאות מדויקות יותר, זאת על מנת לבדוק האם השוני בין שלבי השליטה השונים קיימים גם בנתון זה (המסלולים המדויקים) כפי שראינו בנתוני זמן השלמת המשימה ויעילות המסלול.

3.3.4.2. מבחני Wilcoxon Pairwise להשוואות זוגיות

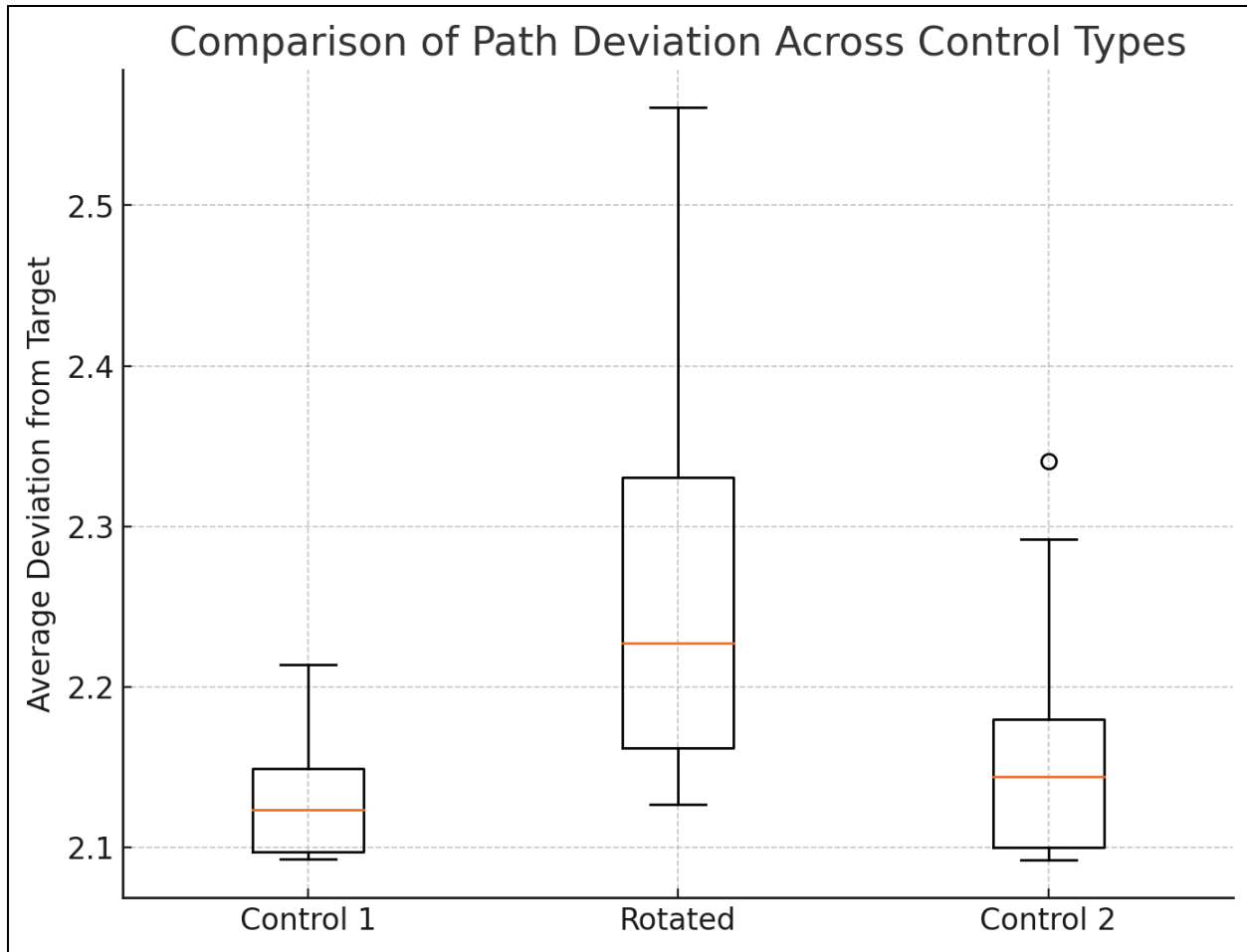
השוואת שלבים	p-value	תוצאה
שלב 1 → 2	$p < 0.0001$	שינוי מובהק – הדיוק נפגע בשליטה מסובבת
שלב 2 → 3	$p = 0.0229$	שינוי מובהק – הדיוק השתפר לאחר חזרה לשליטה רגילה
שלב 1 → 3	$p = 0.00065$	שינוי מובהק – הדיוק לא חזר בדיוק למצב של שליטה 1, כנראה נשאר קצת מהלמידה של השליטה המסובבת

טבלה 3.9: תוצאות מבחן Wilcoxon Pairwise להשוואת דיוק המסלול בין זוגות שלבים. טבלה זו מראה את השלבים המשווים וערך ה-p המוצג מהמבחן.

בגרף 3.15 המתאר את הסטייה הממוצעת מנקודת המטרה, ניכר כי:

- **בשליטה הרגילה הראשונה:** הסטייה הממוצעת נמוכה מאוד, מה שמעיד על דיוק גבוה בהגעה למטרה.
- **בשליטה המסובבת:** הסטייה גדלה באופן מובהק, מה שמעיד על הקושי שהמשתתפים חוו בהתמודדות עם הרוטציה.
- **בשליטה הרגילה השנייה:** נרשם שיפור משמעותי לעומת השליטה המסובבת, אך עדיין קיימת סטייה גבוהה יותר ביחס לשליטה הרגילה הראשונה.

ניתן להסביר תוצאה זו כהשפעת Aftereffect – בניסיונות הראשונים לאחר החזרה לשליטה הרגילה, המשתתפים עדיין הגיבו להשפעת הרוטציה, מה שהוביל להגדלת הסטייה. תופעה זו מצביעה על כך שהלמידה מהשליטה המסובבת השפיעה באופן זמני גם לאחר החזרה לשליטה הרגילה.



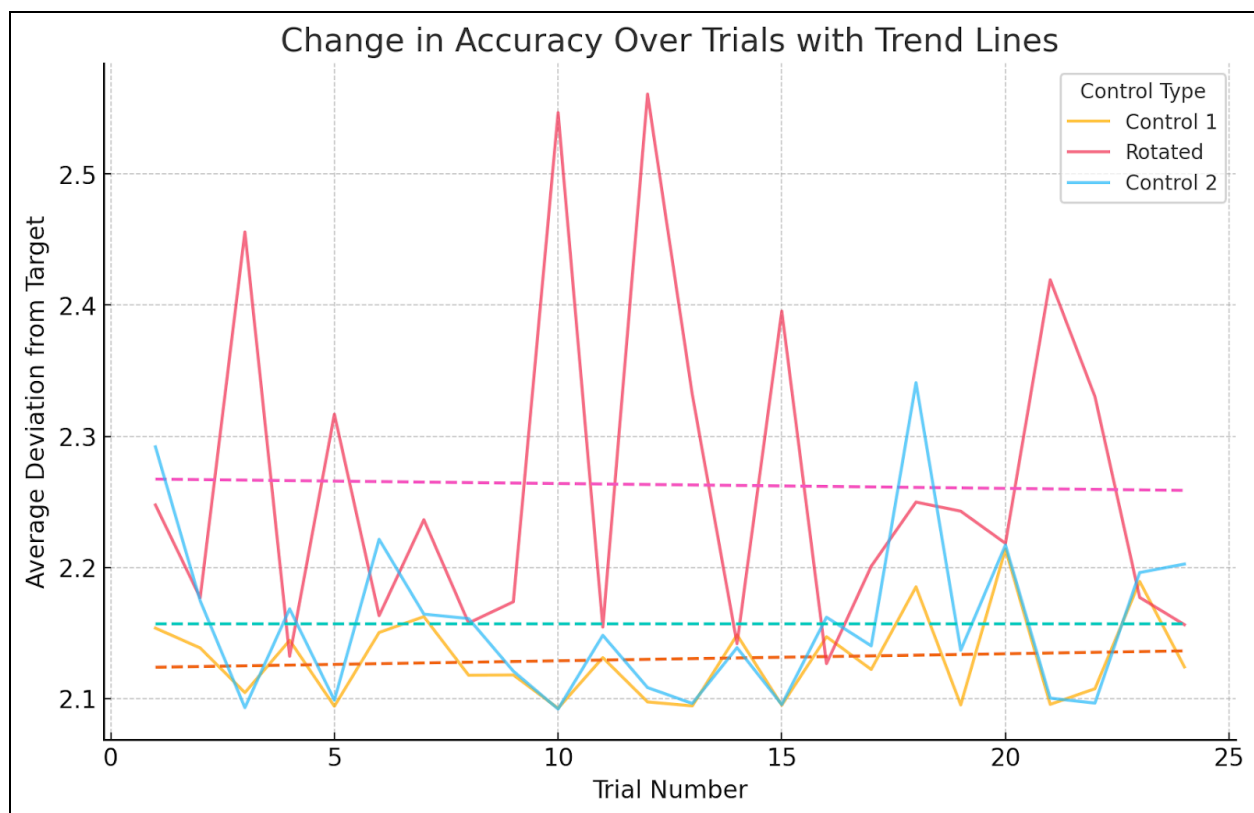
גרף 3.15: סטייה ממוצעת לנקודת המטרה.

ציר Y - סטייה ממוצעת מנקודת המטרה. ציר X מחולק לשלוש סוגי השליטה (משמאל לימין): שליטה רגילה, שליטה מסובבת ושליטה רגילה שנייה.

3.3.4.3. בדיקת שיפור הדיוק לאורך הניסיונות (קורלציית Spearman)

בדקנו האם המשתתפים השתפרו ככל שהתקדמו בניסויים:

- בשליטה רגילה 1 לא היה שינוי משמעותי.
- בשליטה מסובבת נצפתה מגמת שיפור משמעותית ($p < 0.05$). מכאן שהמשתתפים למדו לפצות על הסיבוב.
- בשליטה רגילה 2 נראה שיפור מתון יותר ביעילות המסלול (ירידה ברמת הסטייה), אך עדיין נצפתה התאמה.



גרף 3.16: מגמות שיפור של ממוצעי המסלול של המשתתפים.

על ציר ה-Y הסטייה הממוצעת מנקודת המטרה (ממוצע הסטייה של כל נתון), ציר ה-X הוא מספר הניסיון. הקו הצהוב מייצג את השליטה הראשונה והקו הכתום המקווקו את המגמה שלה; האדום את השליטה המסובבת והוורוד המקווקו את המגמה שלה; הכחול את השליטה הרגילה השנייה והירוק המקווקו את המגמה שלו.

בגרף 3.16, המציג את מגמות השיפור בממוצעי המסלול לאורך הניסיונות, ניתן לראות כיצד הסטייה הממוצעת מנקודת המטרה משתנה עם כל ניסיון. התוצאות מתאימות לציפיות שלנו:

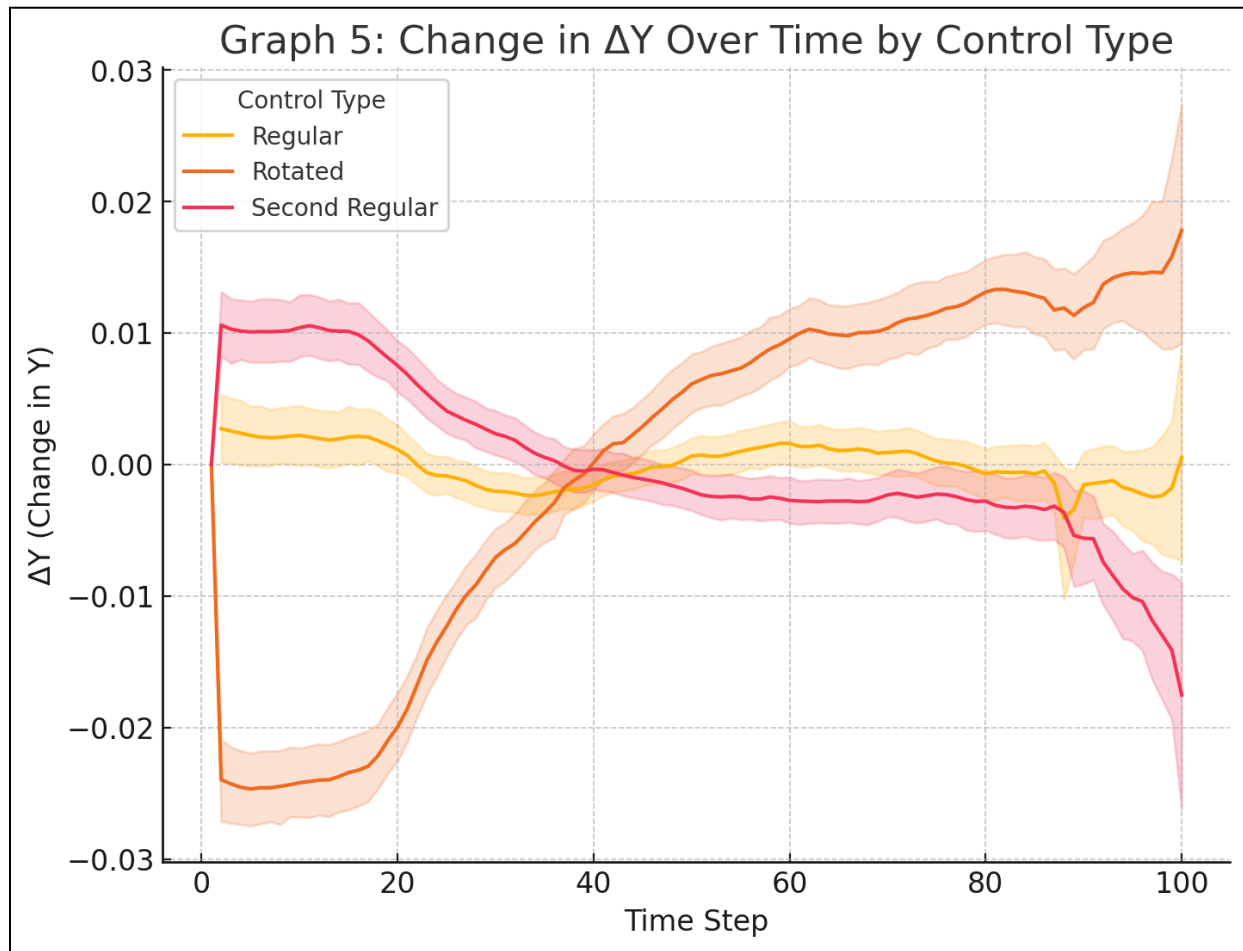
- בשליטה הראשונה לא נרשמה מגמת שיפור משמעותית.
- בשליטה המסובבת נרשמה מגמת שיפור משמעותית, המעידה על הסתגלות המשתתפים לרוטציה.
- בשליטה הרגילה השנייה נרשם גם כן שיפור. השיפור כנראה נבע מהניסיונות הראשונים בשליטה זו, שבה משתתפים היו צריכים לשנות את אופן פעולתם כדי להתאים לשליטה רגילה.

נקודת עניין בגרף היא הניסיון הראשון בשליטה הרגילה השנייה, בו נרשמה סטייה גבוהה במיוחד, מה שעשוי להעיד על השפעת המעבר בין השליטות. עם זאת, לא נרשם הבדל כה גדול בזמן השלמת המשימה של אותו הניסיון, מה שמרמז שהתיקון התרחש במהירות ואולי המשתתפים הצליחו לתקן מספיק מהר את הטעות, באופן שיקטין את כמות הסטייה מנקודת המטרה.

3.3.4.4. השפעת סוג השליטה על ΔY - Kruskal-Wallis

נוסף על כך, נבדק האם סוג השליטה משפיע על הדרך שבה המשתתפים שינו את Y לאורך המסלול. תוצאות מבחן Kruskal-Wallis הראו:

- Regular: הבדל מובהק ($p < 0.001$).
- Rotated: הבדל מובהק ($p < 0.001$), כאשר ההשפעה החזקה ביותר נצפתה כאן.
- Second Regular: הבדל מובהק ($p < 0.001$), דבר המצביע על כך שהשפעת הרוטציה נמשכה גם לאחר החזרה לשליטה רגילה.



גרף 3.17: שינוי ΔY לאורך המסלול לפי סוג שליטה.
בגרף זה מוצג ΔY (השינוי בציר Y) לאורך המסלול, כאשר הצבעים מייצגים את סוג השליטה.

בגרף 3.17 אנו רואים שני ממצאים עיקריים :

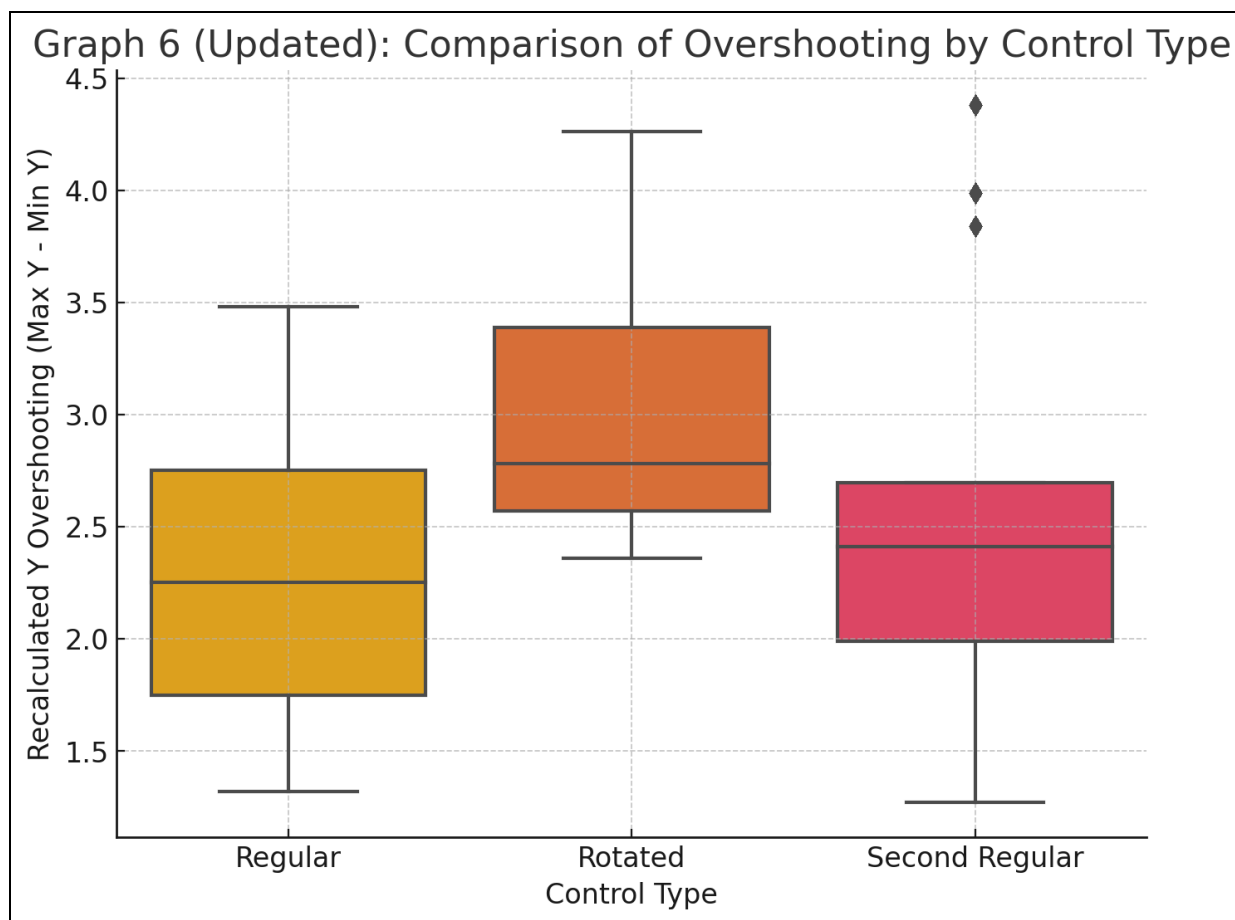
- בשליטה המסובבת (Rotated) המשתתפים מבצעים שינוי משמעותי יותר ב-Y לאורך המסלול.
- בשליטה הרגילה (Regular) יש פחות תיקון בציר Y.
- בחזרה לשליטה רגילה (Second Regular) עדיין נותרה השפעה מהשליטה המסובבת, אך בעוצמה נמוכה יותר.

בגרפים 3.17, 3.24, 3.25 ו-3.26 אנו רואים בסוף המסלול סטייה חזקה ב- ΔY . אפשר להסביר זאת בכך שככל שהמשתתף מתקרב לנקודת המטרה, זווית התיקון הנדרשת על מנת להגיע למטרה נעשית חדה יותר, מה שמתורגם לשינוי גדול ב- ΔY , אף ששינוי זה אינו מעיד על ירידה דרמטית בביצועים. כך שלמעשה התיקונים נראים גדולים יותר מכפי שהם באמת.

3.3.4.5. בדיקת תיקון יתר (Overshooting) בין שלבי שליטה

לבסוף, בדקנו האם תיקון היתר בציר Y השתנה בהתאם לשליטה. התוצאות הראו :

- Regular : הבדל מובהק ($p < 0.001$).
- Rotated : הבדל מובהק ($p < 0.001$), כאשר כאן התיקון היה הגדול ביותר.
- Second Regular : ההשפעה נמשכה ($p < 0.001$), מה שעשוי להצביע על למידה מוטורית.



גרף 3.18: השוואת תיקון יתר (Overshooting) לפי סוג שליטה.
 בגרף זה מוצגת כמות תיקון היתר (Overshooting) של המשתתפים בכל אחד מסוגי השליטה.
 בשליטה מסובבת המשתתפים ביצעו תיקוני יתר משמעותיים יותר מאשר בשליטה הרגילה.
 גם לאחר החזרה לשליטה רגילה (Second Regular), נשארה שארית של תיקוני יתר, מה שעשוי להעיד על למידה מוטורית.

3.3.4.6. בדיקת זיוק התנועה הראשונית (Wilcoxon Pairwise)

בדקנו האם המשתתפים התאימו את הזווית של הפקודה הראשונה שלהם כדי להתמודד עם השליטה המסובבת.

תוצאה: $p < 0.0001$, מכאן שקיים הבדל משמעותי בזווית התנועה ההתחלתית בין השליטות.

מבחן Wilcoxon Pairwise :

תוצאה	p-value	השוואה
שינוי מובהק – המשתתפים התאימו את הזווית לרוטציה	$p < 0.0001$	שליטה רגילה 1 ↔ שליטה מסובבת
שינוי מובהק – המשתתפים שינו שוב את הזווית	$p < 0.0001$	שליטה מסובבת ↔ שליטה רגילה 2
שינוי מובהק – עדיין נשארה השפעה מהלמידה	$p = 0.00026$	שליטה רגילה 1 ↔ שליטה רגילה 2

טבלה 3.10: תוצאות מבחן Wilcoxon Pairwise לדיוק התנועה הראשונית.

טבלה זו מראה את השלבים המושגים וערך ה-p המוצג מהמבחן.

מצאנו שיש הבדל בין הזוויות ההתחלתיות של כל סוג שליטה, מה שמצביע על כך שהיה שינוי בזווית ההתחלתית כפי שציפינו. היה שינוי מובהק בין שלבי השליטה הרגילה לבין שלב השליטה המסובבת, תוצאה הגיונית מאוד משום שאנו יודעים שתהיה תזוזה של זווית התנועה. אך באופן מעניין ראינו שגם בין שתי השליטות הרגילות (שלבים 1 ו-3) היה שינוי מובהק בין הזוויות ההתחלתיות, שינוי שעשוי לנבוע מהלמידה של הרוטציה בשליטה 2, שהשפיעה על הדיוק בשליטה 3.

לאור בדיקה זו, אנו יודעים שיש שינוי בזווית ההתחלתית בין סוגי השליטה השונים. אך מה שמעניין אותנו לבדוק זה האם היה שיפור בתוך כל סוג שליטה: האם החיזוי של זווית הרוטציה הצליח להתאקלם לשינוי, ולשנות את הפקודות המוטורית הנשלחות לביצוע המשימה באופן מדויק יותר לאורך סוג השליטה? לכן ביצענו את המבחן הבא: חישוב השיפוע ההתחלתי של תנועת המשתתפים.

3.3.4.7. מגמת שינוי השיפוע ההתחלתי לאורך הניסיונות (מתאם Spearman)

כדי להעריך את השפעת השליטה המסובבת והחזרה לשליטה הרגילה אחריה על תחילת מסלול של המשתתפים, חישבנו את שיפוע הרגרסיה הלינארית עבור 20 הנקודות הראשונות של כל ניסיון. גישה זו מאפשרת לנו לבחון בצורה מדויקת את כיוון התנועה המוקדם של המשתתפים, במקום להסתמך על וקטור יחיד בין הנקודה הראשונה לנקודה ה-20. הסתמכות על הווקטור מתעלמת מהקונטקסט שבין הנקודה הראשונה לנקודה ה-20.

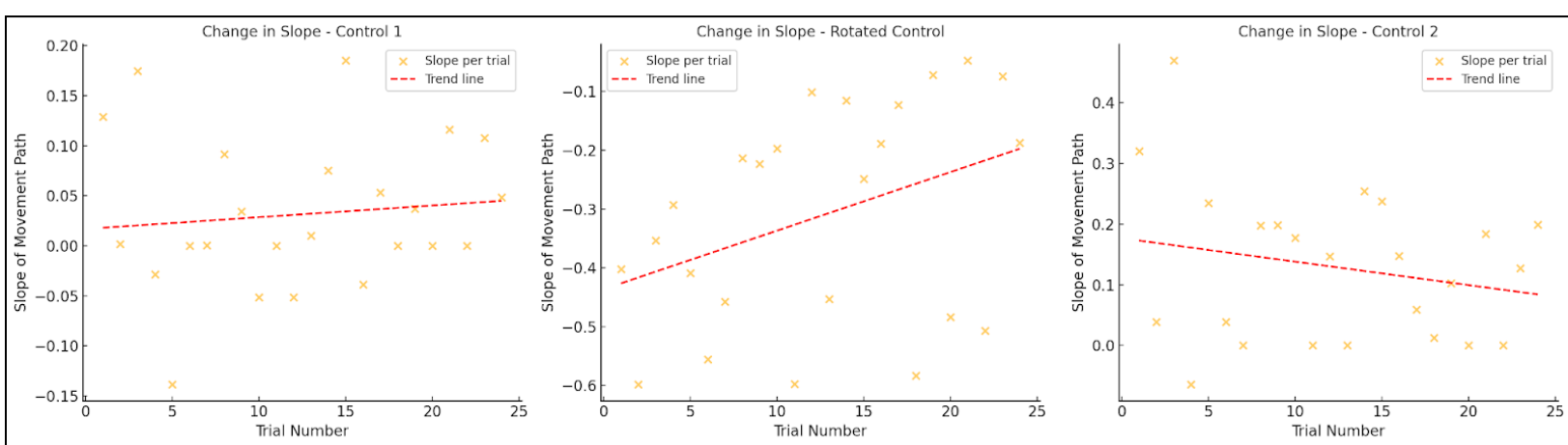
כדי לבדוק האם המשתתפים שיפרו את התאמתם לשליטה המסובבת עם הזמן, ניתחנו את המתאם בין מספר הניסיון לבין השיפוע ההתחלתי.

תוצאות מבחן מתאם Spearman :

שליטה רגילה (Control 1) – אין מגמת שינוי משמעותית ($p = 0.62$).

שליטה מסובבת (Rotated Control) – מתאם חיובי מובהק סטטיסטית ($p = 0.04$, $p = 0.42$), מה שמראה שהמשתתפים למדו עם הזמן להפחית את הסטייה.

חזרה לשליטה רגילה (Control 2) – אין מגמת שינוי ברורה ($p = 0.52$), מה שמעיד על שונות גבוהה בתגובות המשתתפים לאחר החזרה.



גרף 3.19: מגמות שיפור של זווית התחלתית.

ציר Y - זווית התחלתית. ציר X - מספר ניסיון. שלושת הגרפים (משמאל לימין): שליטה רגילה ראשונה וקו מגמה, שליטה מסובבת וקו מגמה, שליטה רגילה שנייה וקו מגמה.

כדי להמחיש את מגמת השינוי, יצרנו גרפי פיזור לכל שליטה עם קו מגמה שמראה האם השיפועים השתפרו עם הזמן (גרף 3.19):

1. בשליטה הרגילה הראשונה, אין שינוי מובהק.
2. בשליטה המסובבת, רואים בבירור שהשיפועים הולכים ומתקרבים לאפס (מתקרבים לשיפוע ישיר מול המטרה), כלומר המשתתפים למדו להתמודד עם הרוטציה ולא רק לבצע התאמה מהירה אחרי תחילת המסלול.
3. בחזרה לשליטה רגילה, הפיזור גדול ואין מגמה ברורה. מה שיכול ללמד על קושי מסוים בחזרה לשליטה רגילה.

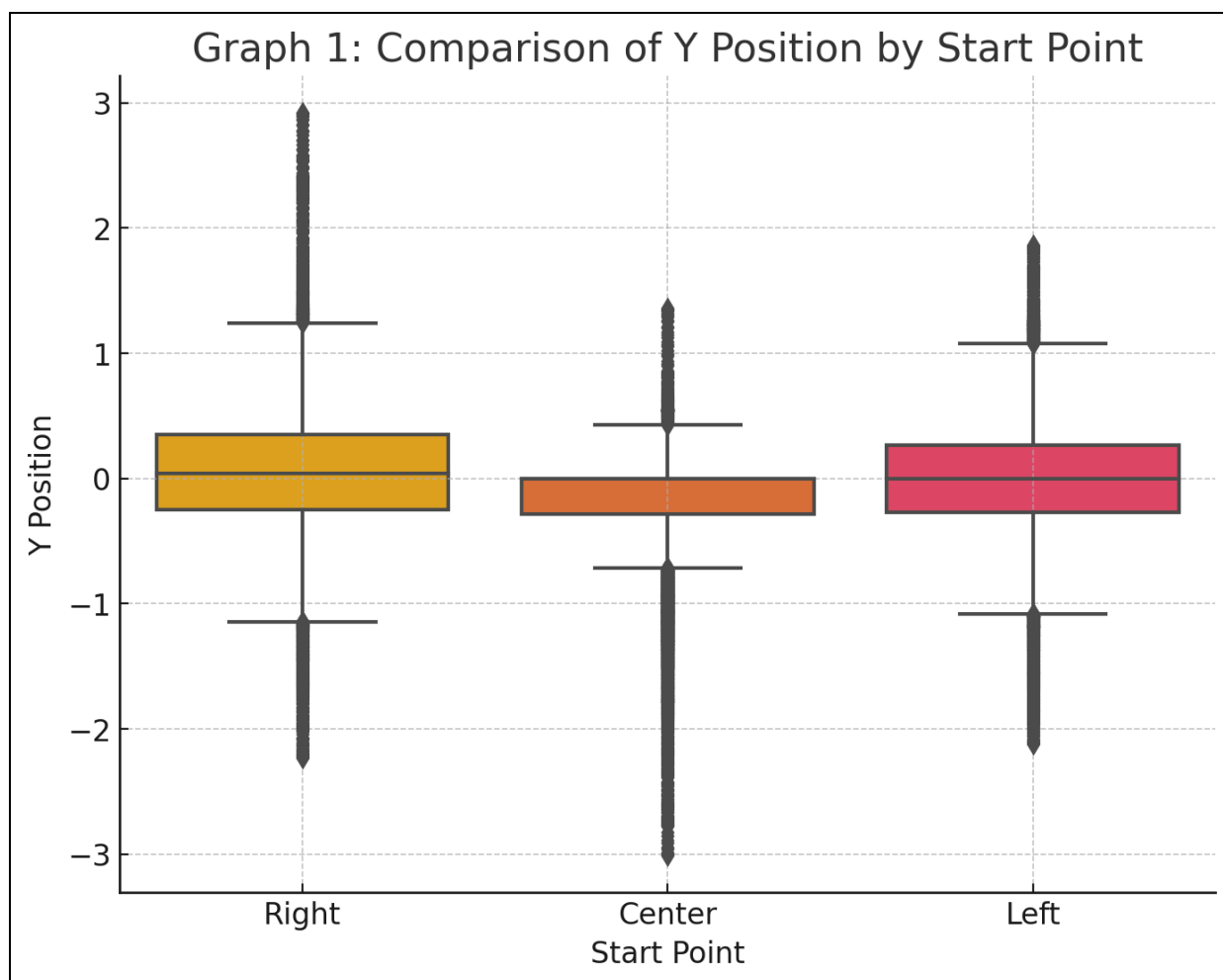
3.3.4.8. ניתוח מסלולי המשתתפים - סיכום ביניים

1. בשליטה הרגילה הראשונה (Control 1) השיפועים היו קרובים לאפס, מה שמראה שהתנועה הראשונית הייתה כמעט אנכית ללא סטיות משמעותיות.
2. בשליטה המסובבת (Rotated Control) נמצאו שיפועים שליליים משמעותיים (-0.40 עד -0.60 בממוצע), מה שמעיד על כך שהמשתתפים סטו מהכיוון האופטימלי כתוצאה מהרוטציה הכפויה.
3. בחזרה לשליטה רגילה (Control 2) השיפועים חזרו להיות חיוביים, אך עם שונות גבוהה יותר, מה שמעיד על כך שהמשתתפים לא חזרו מיידית לשליטה מדויקת לחלוטין - ייתכן שבגלל אפקט למידה (Aftereffect).

3.3.4.9. השפעת נקודת ההתחלה על הדיוק במסלול

3.3.4.9.1. בדיקת השפעת נקודות ההתחלה השונות על המסלולים - Kruskal-Wallis

בכדי לבדוק את ההשפעה של נקודת ההתחלה על מיקום התנועה, ניתחנו את ערכי X ו- Y עבור כל קבוצה. בבדיקת ציר X לא מצאנו הבדל מובהק בין נקודות ההתחלה ($p = 0.42$), כלומר המשתתפים התחילו ממיקומים שונים אך ניהלו מסלולים דומים לרוחב. לעומת זאת, בציר Y נמצא הבדל מובהק ($p < 0.001$), מה שמעיד על כך שאכן היה שינוי מובהק כלשהו בין המסלולים שהתחילו מנקודות התחלה שונות. חשוב לציין שההבדל לא מגיע מהגובה של נקודות ההתחלה, למרות שבניסוי עצמו מיקום ה- Y אכן שונה בין נקודות ההתחלה. הנתונים שניתחתי בחלק זה הם נתונים מנורמלים (שעברו מטריצה סיבובית), זאת על מנת שלא יהיו הבדלים בנקודות ההתחלה של המסלולים. נרמול זה של הנתונים מבטיח שכל הבדל שיש או אין במסלולים, הם במהלך המסלול עצמו, ולא דרך משתנה קבוע שמשפיע (כגון מיקום ה- Y בנקודת ההתחלה).



גרף 3.20: השוואת מיקום Y בין נקודות ההתחלה.

בגרף זה מוצג ערך ה-Y של המשתתפים בכל אחת מנקודות ההתחלה (משמאל לימין): ימין, מרכז, שמאל.

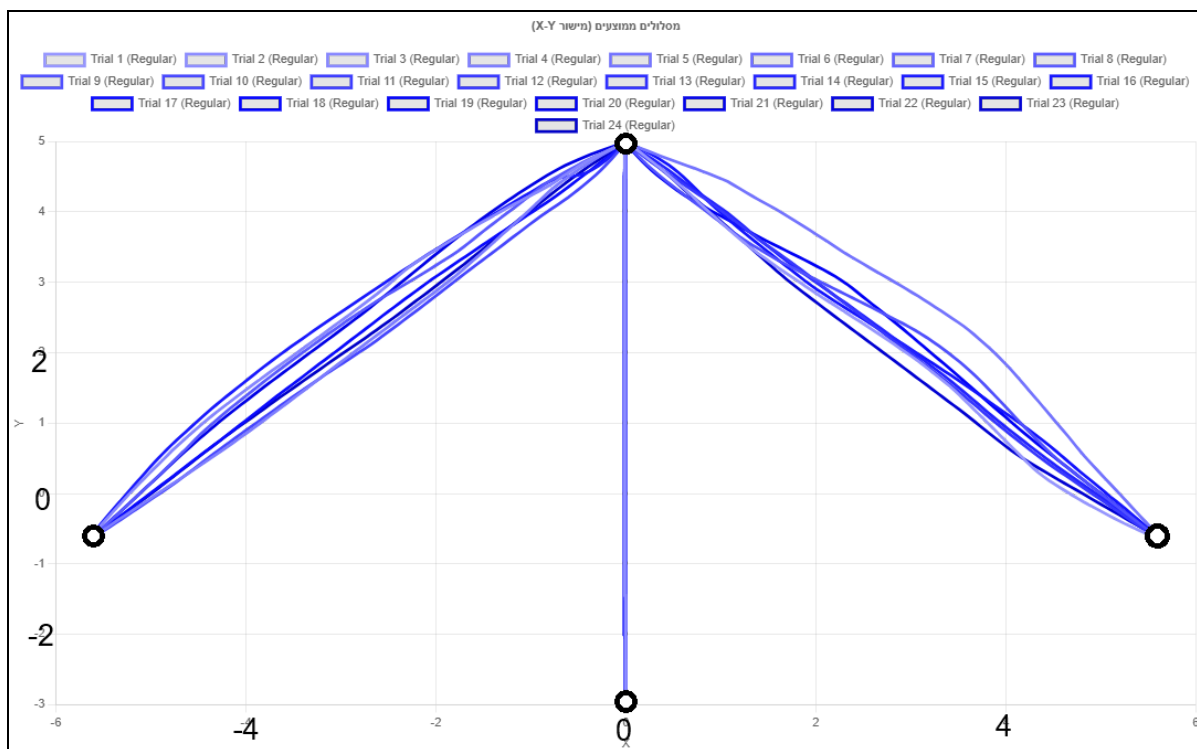
המשתתפים שהתחילו מנקודת Center (מרכז) נמצאים קרוב יותר ל-0 ב-Y

המשתתפים שהתחילו מנקודות Right (ימין) ו-Left (שמאל) נמצאים במיקומים גבוהים ונמוכים יותר ב-Y

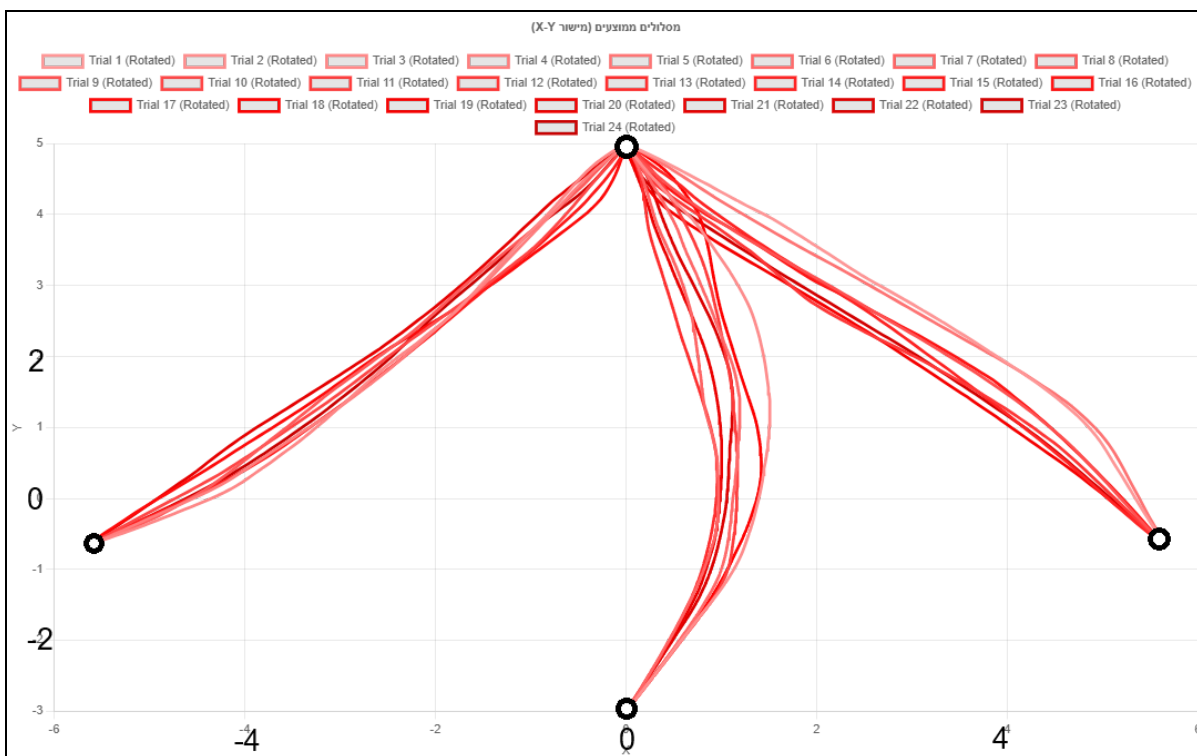
יש שונות גבוהה יותר בערכי Y בקרב המשתתפים שהתחילו מהקצוות (ימין/שמאל) לעומת המרכז.

בגרף 3.20 אפשר לראות את השוני בערך ה-Y בין הניסיונות המתחילים מנקודות ההתחלה השונות. אנו רואים שההבדל הגדול ביותר בין נקודות ההתחלה אכן נמצא בנקודת ההתחלה האמצעית (כמו שמצאנו בניסוח זמן השלמת המשימה מנקודות התחלה שונות). לעומת נקודת ההתחלה האמצעית שהכי קרובה לערך $Y = 0$, נקודות ההתחלה הימנית והשמאלית הם עם ערכי Y מגוונים יותר, מה שאומר שבממוצע המסלולים היו פחות מדויקים מנקודת ההתחלה האמצעית.

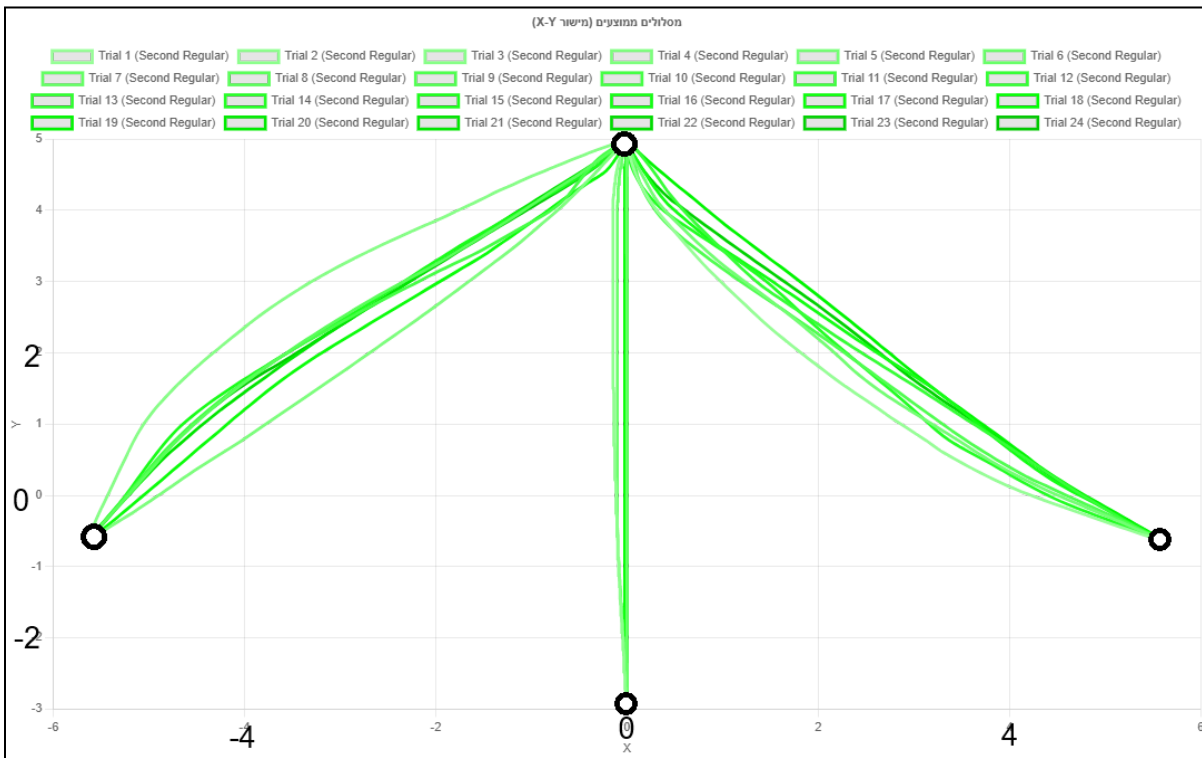
כדי להמחיש את ההבדלים בין נקודות ההתחלה השונות, מוצגים גרפים של המסלולים המקוריים מתוך הניסויים (ראו נספח 6.7.2 לגבי תהליך יצירת גרפי המסלול). גרפים אלו מסייעים בהבנה אינטואיטיבית של ההבדלים בין נקודות ההתחלה, ומדגישים את הייחודיות של נקודת ההתחלה האמצעית בהשוואה לשאר.



גרף 3.21: מסלולים מקוריים מנקודות ההתחלה השונות - שליטה 1.
ממוצע שליטה 1 של המשתתפים עם כיוון סטייה ימינה.



גרף 3.22: מסלולים מקוריים מנקודות ההתחלה השונות - שליטה 2.
ממוצע שליטה 2 של המשתתפים עם כיוון סטייה ימינה.



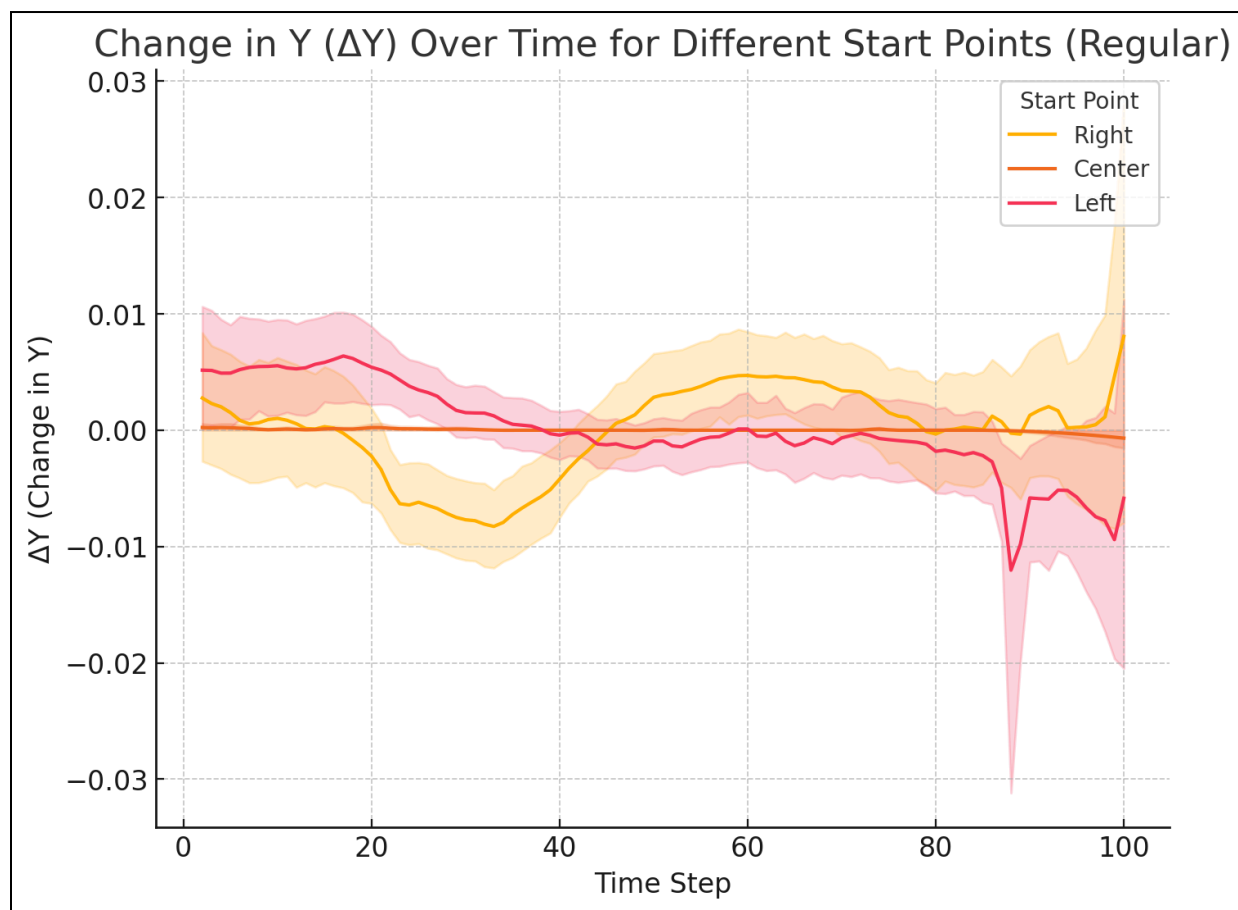
גרף 3.23: מסלולים מקוריים מנקודות ההתחלה השונות - שליטה 3.
ממוצע שליטה 3 של המשתתפים עם כיוון סטייה ימינה.

שלושת הגרפים (3.21, 3.22, ו-3.23) מראים את ההבדלים בין נקודות ההתחלה: בשתי השליטות הרגילות, המסלול האמצעי נראה הכי מדויק בעוד שתי נקודות ההתחלה הצדדיות (ימינה ושמאלה) נראות פחות מדויקות, ואף בשליטה הרגילה השנייה זזות נגד כיוון הסטייה בשליטה המסובבת (ממצא זה יכול להגיע מתיקון יתר כתגובה למעבר בין השליטה המסובבת, לשליטה הרגילה השנייה).

לעומת זאת בשליטה המסובבת אפשר לראות שנקודת ההתחלה האמצעית היא הכי פחות מדויקת, והסטייה נראית הכי ברור. את ההבחנה של ייחודיותה של נקודת ההתחלה האמצעית אנו רואים גם בניתוחים האחרים שנבצע בהמשך הפרק, ונדון בנוגע לממצא זה באריכות בפרק 4.

3.3.4.9.2. בדיקת השינוי בציר Y לאורך המסלול - ΔY - Kruskal-Wallis & Dunn's Test

לצד הבדלים במיקום ההתחלתי, בדקנו האם המשתתפים תיקנו את התנועה שלהם באופן שונה בהתאם לנקודת ההתחלה. מבחן Kruskal-Wallis הראה הבדל מובהק בשינוי בציר Y לאורך המסלול ($p < 0.001$), מה שמצביע על כך שהקבוצות לא רק התחילו ממיקומים שונים אלא גם ביצעו תיקונים שונים במהלך התנועה בכל נקודת ההתחלה שונה. תוצאות מבחן Post-Hoc Dunn הראו שההבדלים בין Right, Center, ו-Left כולם היו מובהקים ($p < 0.001$), דבר שמחזק את ההנחה שכל קבוצה פיתחה דפוסי תיקון שונים בציר Y.

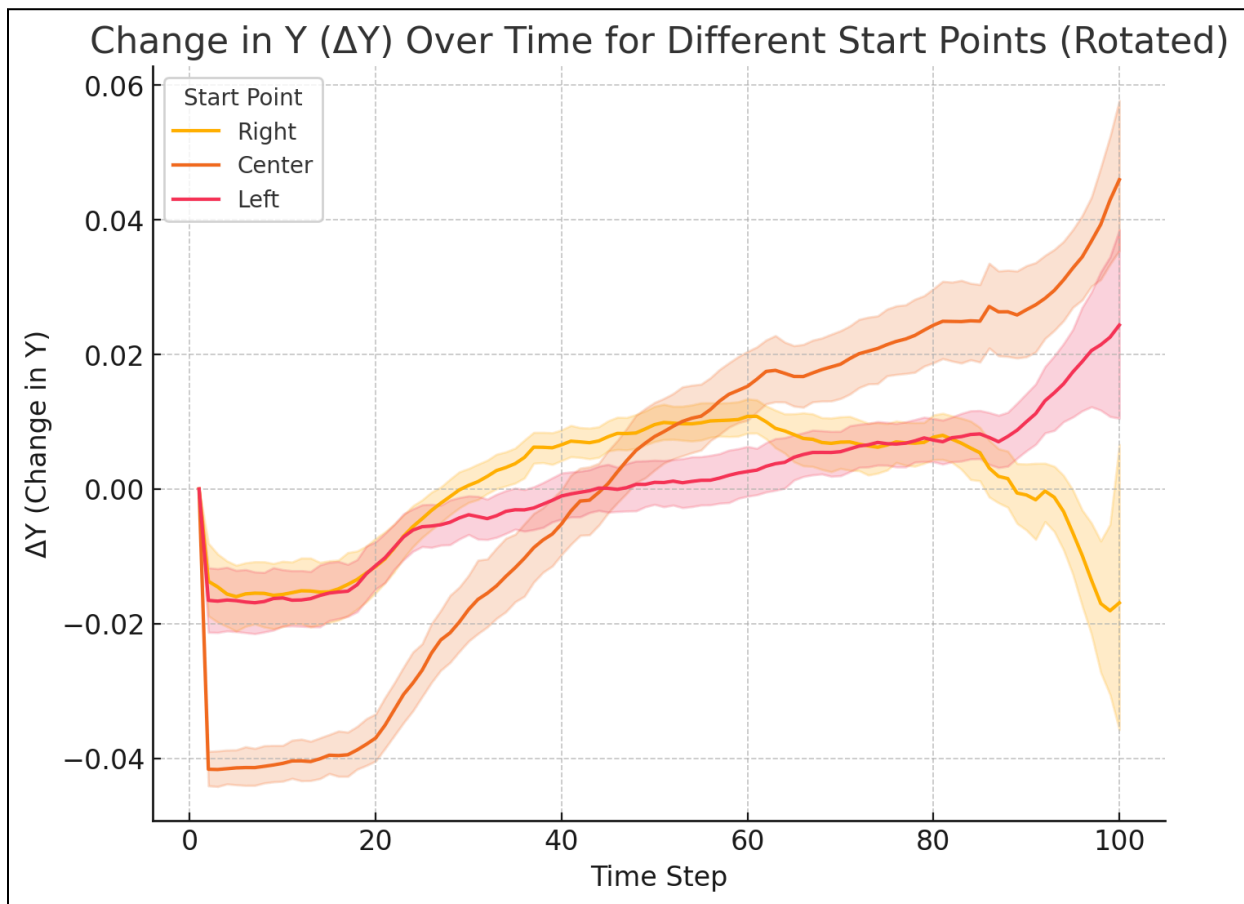


גרף 3.24: דלתא Y של נקודות ההתחלה בשליטה רגילה 1.

בגרף זה מוצג ΔY (השינוי בציר Y) לאורך זמן עבור המשתתפים כאשר הם נמצאים במצב שליטה רגילה (Regular), תוך השוואה בין שלוש נקודות התחלה שונות (Right, Center, Left).

בגרף 3.24 אנו רואים את השוני בין נקודות ההתחלה:

- המשתתפים שהתחילו מנקודות Right ו-Left שומרים על שינוי מתון ב- Y לאורך המסלול.
 - המשתתפים שהתחילו מ- $Center$ מציגים בשליטה זו כמות קטנה מאוד של סטייה.
 - ב- $Time Step$ הסופי, נראים תיקוני יתר (Overshooting), במיוחד עבור המשתתפים שהתחילו מנקודות קיצוניות (ימין/שמאל).
- כל נקודת התחלה שונה מעט מהאחרות, אך פעם נוספת נקודת ההתחלה האמצעית מראה דפוסי התנהגות ייחודיים. בעוד שבנקודות ההתחלה הימנית והשמאלית המסלולים משתנים לכל אורכם (מתקדמים לעבר דיוק), המסלולים אשר התחילו מנקודת ההתחלה האמצעית ישרים בצורה יוצאת דופן.



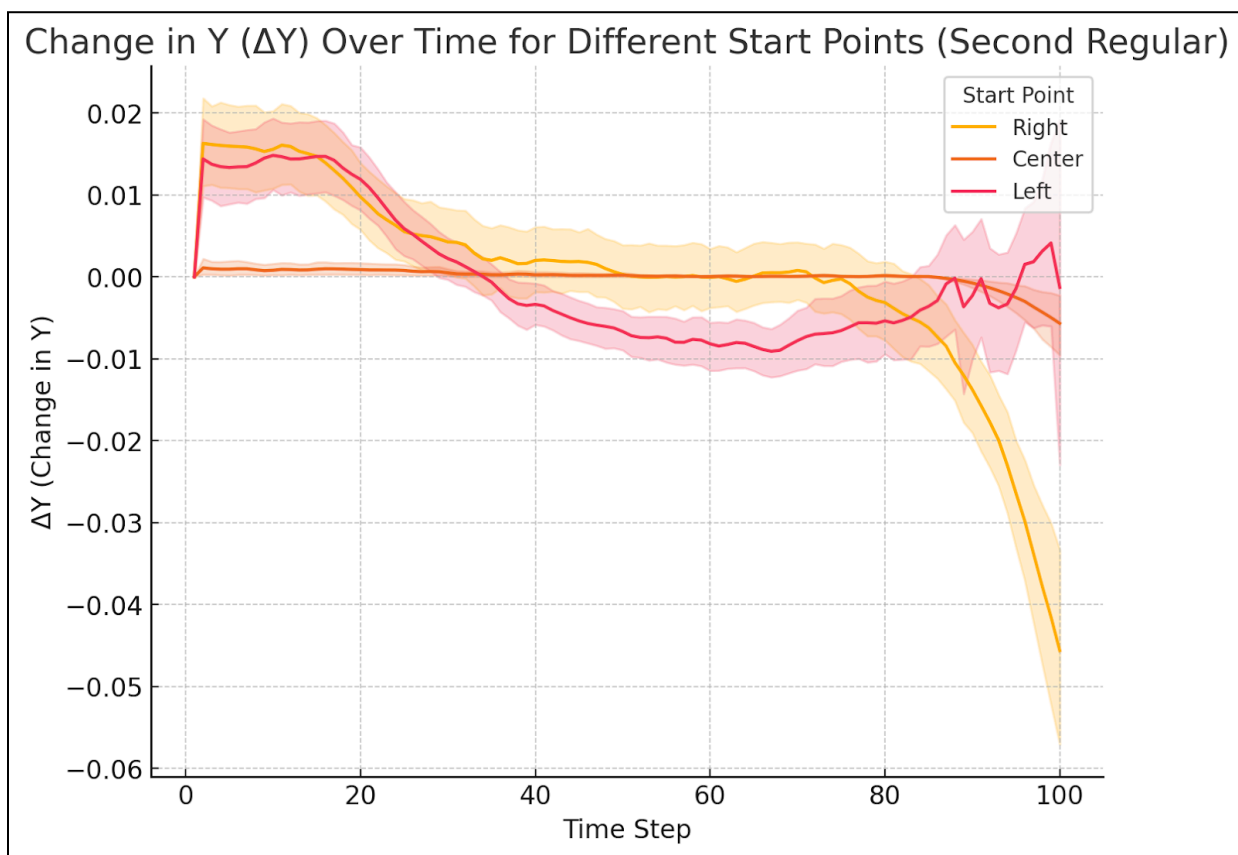
גרף 3.25: דלתא Y של נקודות ההתחלה בשליטה מסובבת.

בגרף זה מוצג ΔY (השינוי בציר Y) לאורך זמן, כאשר המשתתפים התמודדו עם שליטה מסובבת (Rotated), כלומר המערכת כפתה עליהם סטייה בזווית מסוימת.

בגרף 3.25 אנו רואים דפוס דומה למה שראינו עד כה :

- הניסיונות שהתחילו מנקודת Center (מרכז) מבצעים שינוי חד יותר ב-Y בהשוואה לאחרים.
- המשתתפים שהתחילו מ-Right (ימין) ו-Left (שמאל) מראים דפוסי תיקון משמעותיים, אך בצורה פחות חדה מאשר קבוצת ה-Center.
- התיקון הופך משמעותי יותר בהמשך המסלול, ככל שהמשתתפים מנסים להתגבר על הרוטציה ולהגיע ליעד בצורה מדויקת.

הסטייה משפיעה על כל שלוש נקודות ההתחלה, ובכולן בתחילת המסלול ועד סופו יש שיפור כלשהו. אך פעם נוספת אנו רואים שנקודת ההתחלה האמצעית יוצאת דופן, בה נראה שכמות הסטייה ההתחלתית גבוהה באופן ניכר מכמות הסטייה בשתי נקודות ההתחלה האחרות.



גרף 3.26: דלתא Y של נקודות ההתחלה בשליטה רגילה 2. בגרף זה מוצג ΔY (השינוי בציר Y) לאורך זמן, כאשר המשתתפים חוזרים לשליטה רגילה לאחר ההתמודדות עם שליטה מסובבת.

בגרף 3.26 אנחנו רואים את הנקודות הבאות:

- עדיין קיימת השפעה של השליטה המסובבת – המשתתפים לא חוזרים מיד לדפוסי התנועה של השליטה הרגילה הראשונה.
- המשתתפים שהתחילו מ-Right (ימין) מראים תיקוני יתר משמעותיים לקראת סוף המסלול.
- המשתתפים שהתחילו מ-Center (מרכז) מציגים שינויים מתונים יותר ב- Y לעומת השלב המסובב, אך עדיין לא חוזרים לגמרי לתנועה הראשונית שלהם.
- יש רמזים ללמידה מוטורית, שכן הקווים אינם זהים לשליטה הרגילה הראשונה – המשתתפים "שומרים" חלק מההתאמות שביצעו בשליטה המסובבת.

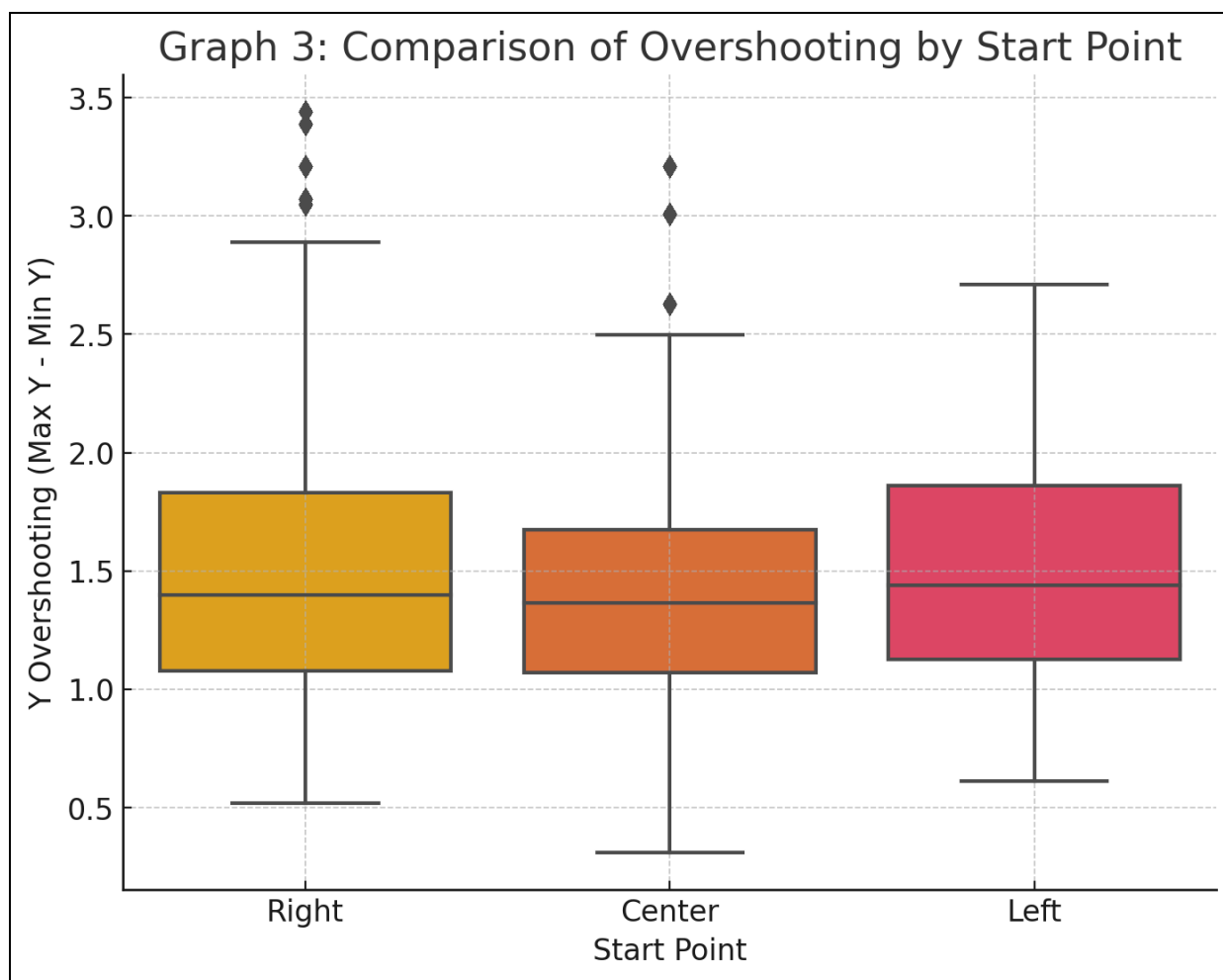
בנוסף, נקודת ההתחלה האמצעית היא יוצאת הדופן בקבוצה. בעוד שבנקודות ההתחלה הימנית והשמאלית המסלולים מתחילים בסטייה לכיוון ההפוך של הרוטציה בשליטה 2 - אך משתפרים לאורך הניסיונות, בנקודת ההתחלה האמצעית המסלולים חוזרים מהר מאוד למסלול אופטימלי ביותר.

3.3.4.9.3. בדיקת תיקון יתר (Overshooting) לכל נקודת התחלה

מטרת הבדיקה הייתה לבדוק האם המשתתפים ביצעו תיקוני יתר (Overshooting) בציר Y, בהתאם לנקודת ההתחלה שלהם. מבחן Kruskal-Wallis הראה כי קיימים הבדלים מובהקים ברמות ה-Overshooting בין נקודות ההתחלה ($p < 0.001$). תוצאות מבחן Dunn's Test הראו כי:

- קיים הבדל מובהק ($p < 0.001$) בין Center ל-Right.
- קיים הבדל מובהק ($p < 0.001$) בין Left ל-Center.
- לא נמצא הבדל מובהק ($p = 0.058$) בין Left ל-Right.

ממצאים אלו מראים כי מסלולים שהתחילו מנקודת ההתחלה האמצעית שונים ברמת תיקוני היתר מנקודות ההתחלה הצדדיות, אצלן נשמרו תיקונים דומים זה לזה.



גרף 3.27: השוואת תיקון יתר (Overshooting) לפי נקודת התחלה.

בגרף זה מוצגת כמות תיקון היתר בציר Y (כמה רחוק המשתתפים חרגו מעבר למסלול האופטימלי) לפי נקודת ההתחלה שלהם.

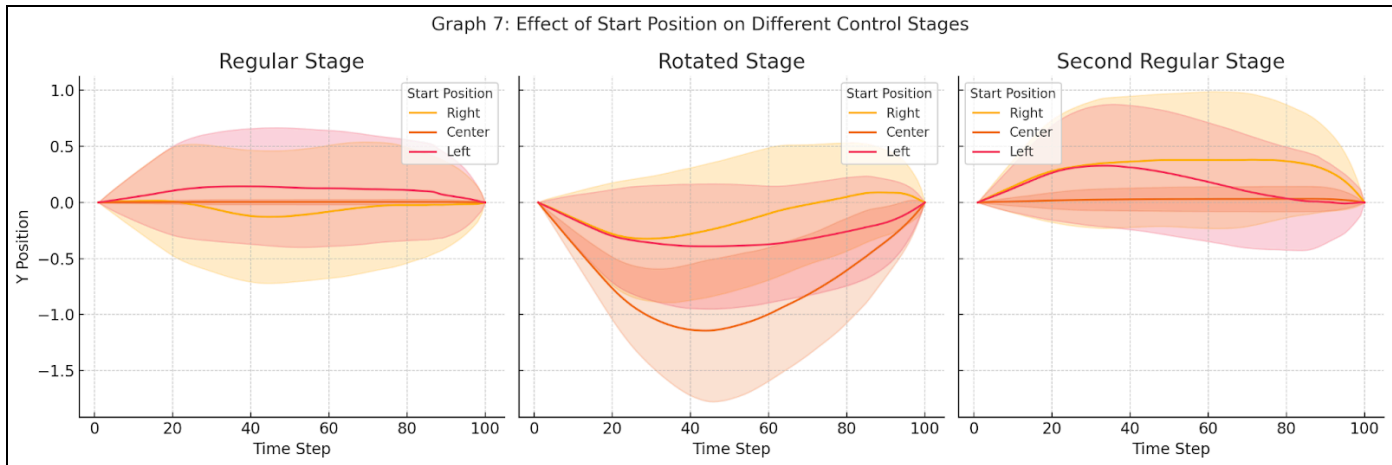
בגרף 3.27 אנו רואים שני דברים מרכזיים:

- משתתפים שהתחילו מנקודת Center (מרכז) נטו לבצע פחות תיקוני יתר משמעותיים מאשר קבוצות ימין ושמאל.
- אין הבדל מובהק בין קבוצות Right ו-Left, שתיקנו את מסלולם באופן דומה.

בהתבסס על יתר הממצאים, ובפרט על ניתוח שינויי המסלול לפי נקודות ההתחלה (תת פרק 3.3.2.6 ותת-פרק 3.3.4.7), סביר שכמות תיקוני היתר הנמוכה יותר בנקודת ההתחלה המרכזית נובעת בעיקר מהשליטות הרגילות. כמו כן, לפי הממצאים הקודמים שלנו לגבי השוני בין נקודות ההתחלה, אפשר להניח שתיקון היתר בנקודת ההתחלה האמצעית בשליטה המסובבת דווקא היה גדול יותר משאר נקודות ההתחלה. זאת בהסתמך על העובדה שהביצועים מהנקודה האמצעית היו פחות יעילים בשליטה המסובבת בהשוואה לאלה שהתחילו מהצדדים.

3.3.4.9.4. השפעת נקודת ההתחלה על הדיוק במסלול - סיכום

הממצאים מצביעים על כך שנקודת ההתחלה השפיעה בעיקר על ציר Y , בעוד שלא נרשמה השפעה משמעותית על ציר X . כמו כן, נמצאה השפעה ברורה של סוג השליטה, כאשר בשליטה המסובבת המשתתפים ביצעו תיקונים חדים יותר, וגם לאחר החזרה לשליטה רגילה עדיין נותרה השפעה מתמשכת. התיקונים שבוצעו בציר Y היו שונים בין הקבוצות, ונראה כי משתתפים שהתחילו במרכז המסלול ביצעו תיקוני יתר חזקים יותר.



גרף 3.28: השפעת נקודת התחלה על שלבי הניסוי.

בגרף זה מוצג מיקום Y של המשתתפים לאורך זמן, תוך הפרדה לפי נקודות ההתחלה. לכל סוג שליטה גרף נפרד. בשליטה המסובבת המשתתפים משנים את ה- Y שלהם באופן חד יותר. גם לאחר חזרה לשליטה רגילה עדיין יש השפעה של נקודת ההתחלה על התנועה. בנוסף המשתתפים שהתחילו מנקודת Center חוו את השינויים החדים ביותר, ואילו הקבוצות האחרות תיקנו בצורה מתונה יותר.

3.3.4.10. השוואת קבוצות בעלי כיוון סטייה שונה וזווית רוטציה שונה

בקבוצה של המשתתפים עם סטייה שמאלה, התוצאות היו כמעט זהות. לכן לא אציג את המספרים המדויקים, כדי לא להאריך את גוף העבודה בלי לחדש משהו על תהליך הניסוי. בהשוואה בין קבוצות זוויות הרוטציה השונות, 25 ו-35, קיבלנו תוצאות דומות מאוד לתוצאות של המשתתפים עם כיוון הסטייה ימינה. לכן בחלק זה אציג רק סיכום של ההבדלים בין הקבוצות השונות, ולא אכנס לפירוט כפי שנכנסתי בחלק הקודם.

3.3.4.10.1. זיוק המסלול בין סוגי השליטה - מבחן פרידמן + Wilcoxon Pairwise

- בשתי הקבוצות נמצאו הבדלים מובהקים בדיוק המסלול בין סוגי השליטה ($p < 0.01$).
- הסטייה מהמטרה גדלה באופן משמעותי כשהשליטה עברה לרוטציה, אך לאחר החזרה לשליטה רגילה הדיוק השתפר.
- הבדל עיקרי: הסטייה בקבוצת 35° הייתה גדולה יותר בהשוואה ל- 25° , מה שמרמז על הסתגלות קשה יותר לרוטציה החזקה יותר.

3.3.4.10.2. שיפור הדיוק לאורך הזמן - Spearman Correlation

- בשתי הקבוצות לא נמצא שיפור מובהק לאורך הניסיונות ($p > 0.3$).
- המשתתפים הסתגלו מהר מאוד לרוטציה, ולכן לא נצפתה מגמת למידה הדרגתית.
- הבדל עיקרי - בקבוצת 25° הייתה מגמה קלה של שיפור לאורך הניסיונות, אך לא מובהקת סטטיסטית.

3.3.4.10.3. זיוק התנועה ההתחלתית - מבחן פרידמן + Wilcoxon Pairwise

- בשתי הקבוצות המשתתפים התאימו את זווית התנועה ההתחלתית באופן מובהק ($p < 0.0001$).
- גם אחרי החזרה לשליטה רגילה, נשאר שינוי קל בזווית התנועה הראשונית.
- הבדל עיקרי - בקבוצת 35° נראתה התאמה חזקה יותר של הזווית ההתחלתית לעומת 25° , מה שמעיד על התאמה גדולה יותר לרוטציה החדה יותר.

3.3.4.10.4. כיוון תנועה מועדף - מבחן פרידמן

- בשתי הקבוצות לא נמצא הבדל מובהק בכיוון התנועה הכללי ($p > 0.3$).
- המשתתפים לא נטו לכיוון מסוים בהתאם לסוג השליטה.

3.3.4.10.5. תיקון יתר - Overshooting, מבחן פרידמן

- בקבוצת 35° המשתתפים ביצעו יותר תיקוני יתר בשליטה הרגילה, אך פחות תיקונים בזמן השליטה המסובבת.
- בקבוצת 25° נצפתה נטייה לתקן יתר בזמן הרוטציה, אך פחות בשליטה הרגילה.

- הבדל עיקרי - ככל שהרוטציה חדה יותר, המשתתפים ביצעו פחות תיקונים תוך כדי השליטה, אך יותר תיקונים עם החזרה לשליטה רגילה.

3.3.4.10.6. השפעת נקודת ההתחלה על הדיוק במסלול Kruskal-Wallis

- בשתי הקבוצות נמצא הבדל מובהק סטטיסטית.
- נקודת ההתחלה השפיעה על הסטייה מהמטרה, ספציפית נקודת ההתחלה העצמית היתה הכי יוצאת דופן.

3.3.4.10.7. מסקנה כוללת לנתוני המסלולים

1. השליטה המסובבת פגעה בדיוק של המשתתפים.
2. המשתתפים למדו לשפר את הדיוק ככל שהתקדמו בניסיונות.
3. גם אחרי שחזרו לשליטה רגילה, נותרו שינויים קטנים בזווית התנועה הראשונית.
4. הייתה השפעה ברורה לנקודת ההתחלה על הדיוק במסלול.
5. תיקון יתר היה שונה באופן מובהק בין השליטות.
6. רוטציה חדה יותר (35°) גרמה לסטייה גדולה יותר וללמידה בולטת יותר של זווית התנועה ההתחלתית.
7. בקבוצת 25° הייתה יותר נטייה לבצע תיקוני יתר בזמן השליטה המסובבת, ואילו בקבוצת 35° המשתתפים ביצעו יותר תיקונים כשהשליטה חזרה לרגילה.
8. שני סוגי הרוטציה הציגו דפוסים דומים מאוד, עם השפעה חזקה יותר ככל שהרוטציה הייתה חדה יותר.

4. דיון ומסקנות

4.1. הקדמה

בחלק זה נבחן את השלכות תוצאות המחקר המוצגות בפרק 3. ננסה להבין מה משמעותן של התוצאות וכיצד הן עונות על שאלות המחקר שהצבנו.

באמצעות הניסוי המתואר בפרק 2, המחקר ביקש לענות על מספר שאלות מרכזיות:

- כיצד מערכת החיזוי המוטורית חוזה שינויים חיצוניים ומפצה עליהם על מנת להשלים את המשימה?
- האם קיימים הבדלים בין סוגי רוטציה שונים (25° ו- 35°) בהשפעתם על תהליך הלמידה? במקרה שכן, מהם הבדלים אלו?
- כיצד משתנים הדיוק המוטורי וזמן ההגעה למטרה בשלבים השונים של ההסתגלות?
- האם ההסתגלות שנרכשה נמשכת גם לאחר החזרה לתנאים הרגילים, או שמדובר בתהליך זמני בלבד?

מטרות המחקר נועדו לבחון האם הממצאים תומכים במודל החיזוי המוטורי (Forward Model & Inverse Model) ובהיפותזת המחקר שלנו, בדגש על קיומו של בקר-חזאי אדפטיבי, תוך השוואה לממצאים קודמים בתחום מנגנוני ההסתגלות המוטורית והשימוש בחיזוי תחושת.

4.2. דיון בממצאים העיקריים וחשיבותם לשאלת המחקר

המחקר בחן כיצד מערכת העצבים המרכזית (CNS) משתמשת במנגנוני למידה מוטורית אדפטיבית וחיזוי תחושת כדי להסתגל לשינויים בלתי צפויים בשליטה על תנועה. לצורך כך, נותחו נתונים משלושת שלבי הניסוי, תוך השוואת ביצועי המשתתפים בזמן תגובה, דיוק במסלול תנועה, והיכולת לשמר את הלמידה לאחר החזרה לתנאים הרגילים.

כל ההבדלים המתוארים בהמשך הם מובהקים סטטיסטית ($p < 0.05$), אלא אם צוין אחרת.

4.2.1. שליטה רגילה ראשונה – קביעת נקודת הבסיס

בשלב הראשון של הניסוי, שבו המשתתפים שלטו בדמות ללא כל סטייה או רוטציה, הביצועים היו המהירים והמדויקים ביותר.

- ממוצע זמן הגעה למטרה: 1.506 שניות.

- דיוק המסלול: קרוב מאוד לקו ישר.

- מספר נמוך של תיקונים מאוחרים בתנועה.

תוצאות אלו קבעו את נקודת הבסיס, לפיה ניתן למדוד כמה פגע שינוי הרוטציה בביצועים וכיצד למידה מוטורית אדפטיבית אפשרה התאוששות בשלב הרוטציה. תוצאות אלו מאפשרות גם ניתוח של שליטה 3, על מנת שנוכל לבדוק אם הלמידה משליטה 1 נשמרה או לא.

4.2.2. שליטה מסובבת – השפעת הרוטציה על הביצועים

בשלב זה המשתתפים חוו סטייה בשליטה של 25° או 35° , מה שהוביל לפגיעה מיידית בביצועים בניסיונות הראשונים של הרוטציה:

- עלייה משמעותית יחסית בזמני ההגעה למטרה (בממוצע 1.573 שניות, לעומת 1.506 קודם, $p < 0.01$).

- ירידה בדיוק המסלול – מסלולים מפותלים יותר, עם יותר ניסיונות לתיקון התנועה.

4.2.2.1. שונות בין קבוצות הרוטציה (25° מול 35°)

בניתוח השוואתי נמצא כי משתתפים שהתמודדו עם רוטציה של 35° חוו ירידה חדה יותר בביצועים מאשר אלו שהתמודדו עם 25° .

- זמן ההגעה הממוצע בקבוצת ה- 35° היה גבוה יותר באופן מובהק ($p = 0.030$) בהשוואה לקבוצת ה- 25° .

- מספר תיקוני המסלול היה גבוה יותר בקבוצת ה- 35° ($p < 0.05$), מה שמעיד על כך שהמוח התקשה יותר לחזות את הסטייה הגבוהה ולפצות עליה מראש.

4.2.2.2. הסתגלות ולמידה לאורך זמן

לאחר מספר ניסיונות, המשתתפים שיפרו את ביצועיהם בהדרגה, מה שמעיד על תהליך למידה מוטורי.

- זמן התגובה התקצר באופן מובהק סטטיסטית מתחילת השליטה המסובבת עד סופה.
- דיוק המסלול השתפר בהדרגה. היו פחות תיקוני תנועה מאוחרים.
- מודל החיזוי המוטורי התחזק – ככל שהניסיונות התקדמו, המשתתפים למדו לחזות מראש את סטיית הרוטציה ולתקן אותה כבר בתחילת התנועה. באופן מובהק ביותר דבר זה ניכר בתת-פרק 3.3.4.7, שם רואים שככל שהמשחק נמשך הזווית ההתחלתית של המסלולים הולכת ומתקרבת לעבר המטרה. ללא נתון זה לא היינו יכולים לדעת היכן התבצע השיפור והיינו יכולים לחשוב שהוא היה רק תגובה לסטייה. אבל מכיוון שמדובר בזווית ההתחלתית, ברור שמדובר בחיזוי מקדים - ומכאן שמודל החיזוי התחזק לאורך זמן.

4.2.3. שליטה רגילה שנייה – האם הלמידה נשמרה לאחר הרוטציה?

כאשר המשתתפים חזרו לשליטה הרגילה (ללא רוטציה), הם לא חזרו מיידית לרמות הביצוע המקוריות, אך השיפור קרה באופן כמעט מיידי והתקרב מאוד לקבוצת הביקורת של סוג שליטה 1. המשתתפים הציגו חזרה לביצועים הדומים לשליטה הרגילה הראשונה, עם נטייה קלה לשימור ההסתגלות שנרכשה בשליטה המסובבת. עם זאת, מבחנים סטטיסטיים (t-test ו-Wilcoxon) לא הראו הבדל מובהק ($p > 0.05$), ולכן לא ניתן לקבוע באופן חד-משמעי שהייתה השפעה מתמשכת של למידה מוטורית מעבר לשלב הרוטציה.

אולם בהשוואת תיקון יתר (Overshooting) בין שלבי השליטה עלו הבדלים מובהקים ($p < 0.001$). בשליטה המסובבת המשתתפים ביצעו תיקוני יתר משמעותיים יותר לעומת השליטה הרגילה. גם לאחר המעבר חזרה לשליטה רגילה, נותרה השפעה של תיקוני היתר רק בתחילת השליטה, מה שעשוי להעיד על שמירת הלמידה משליטה 1.

תוצאות אלו עשויות להעיד על כך שמודל החיזוי המוטורי של המשתתפים חזר במהירות למצבו הקודם, כאשר בתחילה נשמרה הלמידה משלב הרוטציה אך תוקנה מהר מאוד במשך השליטה הרגילה השנייה. תוצאה זו מחזקת את ההיפותזה שהלמידה נשמרת מהשליטה הראשונה.

4.2.4. סיכום הממצאים בהקשר של שאלת המחקר

- למידה מוטורית אדפטיבית מבוססת על חיזוי מוטורי מתמשך – מערכת העצבים המרכזית לומדת לחזות ולתקן שינויים בתנועה בהתאם לניסיון.
- קבוצת ה-35° נדרשה ליותר ניסיונות כדי להסתגל לשינוי ($p < 0.05$) – מה שמראה שככל שהשינוי דרמטי יותר, כך האדפטציה קשה יותר.
- אפקטים שלאחר הלמידה הוכיחו שהמודל המוטורי נשמר גם לאחר שהשינוי הוסר – כלומר, המוח לא מוחק למידה קודמת באופן מיידי, והלמידה שהמשתתפים למדו בשליטה 1, נשמרה ונזכרה גם מאוחר יותר.
- נקודת ההתחלה השפיעה על זמן ההגעה ודיוק המסלול. נקודת ההתחלה האמצעית הייתה הכי שונה – ייתכן שבגלל עומס קוגניטיבי גדול יותר.

4.3. דיון בנושאים להרחבה

בפרק זה נעמיק במספר היבטים מרכזיים שעלו מהניסוי ואינם נידונים בהרחבה בפרקים הקודמים. הדיון יכלול ניתוח של מגמות מעניינות, תופעות בלתי צפויות והשערות לגבי המנגנונים העומדים מאחוריהן.

4.3.1 השפעת נקודת ההתחלה

במהלך הניתוח נמצא כי נקודת ההתחלה השפיעה על זמן ההגעה למטרה ועל הדיוק במסלול. משתתפים שהתחילו מהמרכז נטו להיות איטיים יותר בהשוואה לאלו שהתחילו מהצדדים ($p < 0.05$). כמו כן מצאנו הבדל מובהק סטטיסטית בין נקודות ההתחלה השונות גם מבחינת המסלולים: גם כאן נקודת ההתחלה האמצעית הייתה יוצאת דופן מבין שלוש נקודות ההתחלה (אם כי מצאנו שגם נקודות ההתחלה הימנית והשמאלית היו שונות זו מזו באופן מובהק סטטיסטית).

ניתן להסביר זאת בכך שנקודת התחלה מרכזית מחייבת את המשתתפים לקבל החלטה לגבי כיוון התנועה, מה שמוסיף עומס קוגניטיבי בהשוואה להתחלה מצידי המסך, שם כיוון התנועה מוגבל יותר. בנוסף, ייתכן שהזווית הראשונית של התנועה דרשה הסתגלות שונה במקרים של התחלה מהמרכז לעומת הצדדים, מה שאולי השפיע על יעילות החיזוי המוטורי.

אפשרות נוספת להסביר את הייחודיות בנקודת ההתחלה האמצעית היא, שאולי קיימת העדפה טבעית להזיז חפצים הממוקמים ישירות מול האדם, לעומת חפצים הממוקמים באלכסון ממנו. לכן במסגרת השליטות הרגילות, נקודת ההתחלה האמצעית הינה היעילה ביותר – בשל הקונטקסט הרחב והמדויק יותר שמתקבל מההרחקה של חפצים מגוף האדם, כפי שמתבטא בנקודה זו. לעומת זאת בנקודות ההתחלה האחרות, המשתתף נדרש "להזיז את החפץ" מנקודה צדדית לו אל נקודת המטרה הנמצאת בקו ישר מולו.

ההבדל בין נקודות ההתחלה היה הפוך בשליטה המסובבת: שם ראינו ירידה מובהקת בביצועים של נקודת ההתחלה האמצעית לעומת שתי הצדדיות. לפי ההסבר המוצע, קושי זה בשליטה המסובבת נובע מפירוק של קונטקסט חזק יותר שקיים בדחיפת עצמים הרחק מגופך. לעומת זאת בנקודות ההתחלה הימנית והשמאלית, הקונטקסט מלכתחילה היה דל יותר (אין אותה כמות של היכרות עם דחיפת חפצים צדדיים) ולכן ביצוע השינוי היה פשוט יותר.

4.3.2 "תמונת הראי" בשליטה המסובבת

בניתוח המגמות לאורך הניסיונות, אפשר לראות כי ביצועי המשתתפים בשליטה המסובבת (שליטה 2) מראים דפוס הפוך כמעט לחלוטין בהשוואה לשתי השליטות הרגילות (סוג שליטה 1 ו-3). מספרי הניסיונות עם הביצועים הטובים ביותר בשליטות הרגילות היו הגרועים ביותר בשליטה המסובבת, ולהפך. אפשר לראות תופעה מעניינת זו בגרף 3.1 וגרף 3.2 באופן מאוד ברור.

ניתן להסביר זאת כך: בתחילת השליטה המסובבת, המשתתפים פעלו לפי החיזוי שפיתחו בשלב 1, החיזוי שבנו על איך שהמשחק אמור להתנהל, מה שהוביל לשגיאות משמעותיות כתוצאה משינוי השליטה. עם הזמן, החיזוי המוטורי הותאם לרוטציה, והמשתתפים למדו לפצות עליה. בניסיונות שבהם בשליטה הראשונה היה קונטקסט חיובי יותר (תוצאה מהירה וישירה יותר), הוא נשמר והתבטא בשלב הרוטציה כגורם מפריע יותר, משום שהיה צורך לגבור על קונטקסט חזק יותר כדי לבצע את התיקון הנדרש. זה מתאים גם ללמידה המחזקת שהראינו בפרק המבוא, על פיה פעולה שבוצעה טוב יותר נשמרת חזק יותר ויוצרת קונטקסט משמעותי יותר מאשר ניסיונות מוצלחים פחות. כאשר חזרו לשליטה הרגילה (Control Type 3), התיקון היה מהיר יחסית, שכן המערכת כבר הכירה את הדפוס המקורי של שליטה 1. זו אולי הסיבה ששני סוגי השליטה הרגילים (שליטה 1 ו-3) נראים כמעט זהים.

התנהגות זו תואמת את מודל החיזוי שלמדנו, על פיו המוח מחשב מחדש את היחס בין הפעולה לתוצאה, וככל שההתנסות נמשכת, החיזוי מתעדכן בהתאם. העובדה שהמשתתפים חזרו במהירות לביצועים הקודמים בשליטה 3 מעידה כי הידע המוטורי הקודם לא נמחק אלא הושעה זמנית, וחזר לפעולה כשהתנאים חזרו לקדמותם.

4.4. הסבר של מהלך המחקר לאור המבוא

במהלך הניסוי ניתן היה לראות כיצד מנגנוני הלמידה המוטורית האדפטיבית והחיזוי התחושתית באים לידי ביטוי בשלבים השונים של משחק המחשב. התוצאות שהתקבלו משקפות את תהליכי השינוי שעברו המשתתפים בזמן הסתגלותם לתנאים החדשים.

4.4.1. שליטה רגילה

בשליטה הרגילה הראשונה, המשתתפים פיתחו מודל חיזוי מוטורי מותאם למשימה הנדרשת. בשלבי הניסוי הראשונים, למידת החיזוי התחזקה דרך משוב חוזר – כל ניסיון מוצלח חיזק את הקישור בין הפקודה המוטורית לבין התוצאה התחושתית הצפויה. מערכת החיזוי המוטורית, באמצעות לולאות חיזוי קדמיות (Forward Model), למדה לחזות את ההשלכות התחושתיות של כל פקודה מוטורית, בעוד שהמודל ההפוך (Inverse Model) התאים את הפקודות המוטוריות להשגת השלכות תחושתיות מסוימות בצורה היעילה ביותר.

נוסף על כך, עם ההתקדמות במשימה, המשתתפים פיתחו קונטקסט חיזוי יציב – כלומר, הם למדו את הקשרים הקבועים בין פקודות מוטוריות לבין התנועה בפועל. כאשר הופעלה פקודה להזזת הדמות לכיוון מסוים, החיזוי התחושתית והמוטורי התאימו לכך באופן עקבי, מה שחיזק את החיזוי לניסיון הקודם, וכך ממשיך בלולאה.

4.4.2. שליטה מסובבת

בשלב השליטה המסובבת, הקונטקסט הקיים נשמר, אך הופיע חוסר התאמה בין הפקודה המוטורית הנשלחת לתוצאה התחושתית הצפויה. כאשר המשתתפים ניסו לבצע אותן תנועות שלמדו בשלב הקודם, הדמות לא הגיבה בהתאם לחיזוי של המשתתפים, בשל הרוטציה של 25° או 35° . חוסר התאמה זה בין הציפייה לבין המשוב התחושתית, הוא מה שהכריח את המשתתפים לבצע התאמות בחיזוי המוטורי שלהם.

ההסתגלות שנצפתה בתוצאות מאששת מנגנון זה: ככל שהניסיונות התקדמו, המשתתפים שיפרו את החיזוי שלהם והתאימו את הפקודות המוטוריות שלהם בהתאם לתנאים החדשים. זמן ההגעה למטרה התקצר, מספר תיקוני התנועה המאוחרים פחת והמסלול הפך מדויק יותר. גם כיוון תחילת המסלולים השתפר בשליטה המסובבת, מה שמראה שהמשתתפים לא רק חיפו על תנועה לא מתוכננת, אלא חזו מראש שהתנועה כבר מסובבת ופיצו עליה מתחילת המסלול. כל אלו מעידים על כך שמודל החיזוי המוטורי עבר עדכון על בסיס שגיאות שנוצרו בין הפעולה הצפויה לבין התוצאה בפועל ושינה את החיזוי שלו בשביל להתאים את עצמו לשינוי הנצפה.

4.4.3. חזרה לשליטה רגילה

בחזרה לשליטה הרגילה, למערכת כבר היה קונטקסט חיזוי היסטורי עם סוג שליטה זה (מסוג שליטה 1). מאחר שהשליטה הרגילה הופעלה שוב, המשתתפים לא היו צריכים ללמוד מחדש את הקשרים בין הפקודות המוטוריות לתנועה, אלא רק לחזור לדפוסים שכבר היו מאוחסנים במערכת החיזוי המוטורי. ואכן, התוצאות תומכות ברעיון זה: זמן ההגעה למטרה חזר לרמות דומות לאלו של השליטה הרגילה הראשונה כמעט מיד, והמשתתפים ביצעו פחות תיקוני תנועה, דבר המעיד על כך שהמודל הפנימי שלהם לא נמחק אלא נשמר לשימוש חוזר.

שלושת השלבים שנצפו בניסוי מדגישים את גמישות מערכת החיזוי המוטורי ואת יכולתה להסתגל לשינויים ודפוסים קודמים כאשר התנאים חוזרים לקדמותם.

4.5. השוואה למחקרים קודמים

4.5.1. Modchalingam et al

אחד התחומים המרכזיים בחקר למידה מוטורית הוא איך המוח מסתגל לשינויים פתאומיים בשליטה התנועתית. מחקרם של Modchalingam et al. (2023) בדק את השאלה הזו דרך ניסוי אחר: הם ביקשו מהמשתתפים להסתגל לסיבוב ויזואל-מוטורי (כמו בניסוי שלנו) ובדקו איך הדרך שבה מוצג השינוי משפיעה על הלמידה המוטורית. אך הניסוי שלהם שם דגש חזק יותר על סוג הלמידה בניסוי - למידה מפורשת או מרומזת.

הם גילו שהתאמה מוטורית בלמידה המרומזת מושפעת מאוד מהשאלה אם השינוי קורה בפתאומיות או בהדרגה. כשהסטייה הוצגה באופן פתאומי - המשתתפים למדו בצורה מוגבלת, אבל כשהיא הוצגה בשלבים קטנים עם פרקי הסתגלות בין שלב לשלב - הלמידה שלהם הייתה גבוהה יותר ב-80%. לפי התוצאות שלהם, נראה שכאשר השינוי מתרחש בהדרגה בשלבים ברורים, המוח מסוגל ללמוד טוב יותר ולבצע התאמות עדינות יותר בתנועה.

המחקר שלנו מצא שהמעבר משליטה רגילה לשליטה מסובבת הוביל בהתחלה לירידה בביצועים, אבל עם הזמן המשתתפים הצליחו להסתגל לשינוי. זה דומה לממצאים של Modchalingam et al., שהראו שלמידה מרומזת משתפרת אם הסטייה מוצגת בשלבים מדורגים.

אבל יש הבדל חשוב בין שני המחקרים: אנחנו לא בדקנו רק את ההשפעה של הצגת השינוי, אלא גם איך נקודת ההתחלה והקבוצה שאליה משתתף שייך משפיעות על הלמידה. בניסוי שלנו, לכל משתתף הייתה נקודת התחלה שונה, והכיוון של הסטייה (ימינה או שמאלה) נקבע לפי מספר המשתתף. בנוסף, חלק מהמשתתפים עברו רוטציה של 25° , ואחרים 35° , מה שמאפשר לנו לבדוק איך עוצמת השינוי משפיעה על תהליך ההסתגלות. מאידך, המחקר של Modchalingam et al. (2023) הוסיף משהו שלנו לא היה: נראה שההוספה ההדרגתית של השינוי ברוטציה השפיעה באופן משמעותי מאוד על מהירות הלמידה ואיכותה, דגש שבניסוי שלנו היה חסר באופן משמעותי.

עוד הבדל משמעותי הוא הסביבה שבה הניסוי התבצע. הם השתמשו במשטח מגע ועט גרפי כדי לבדוק למידה מוטורית, ואילו אצלנו זה היה בתוך משחק מחשב שבו המשתתף שולט בדמות שזזה בהתאם לשינויי הזווית. זה משנה את הדינמיקה של הלמידה: במשחק, התנועה מרגישה פחות טבעית, כי הפעולה הפיזית (הזזת הגויסטיק) נפרדת מתזוזת הדמות, מה שיכול להשפיע על האופן שבו המשתתפים מסתגלים לשינוי. לעומת זאת, בניסוי שלהם התנועה הייתה הרבה יותר מחוברת לתוצאה.

בסופו של דבר, נראה שהדרך שבה מוצג השינוי היא לא הפרמטר היחיד שמשפיע על למידה מוטורית. גם נקודת ההתחלה, הכיוון של הסטייה ורמת הרוטציה חשובים, ואפילו יכולים לשנות את אופן ההסתגלות. מחקר עתידי יוכל לבדוק שילוב של שתי הגישות – גם לבדוק מה קורה כשמשתמשים בשינוי הדרגתי, וגם לראות איך נקודות התחלה שונות משנות את תהליך הלמידה.

Novick & Vaadia .4.5.2

כשחושבים על למידה מוטורית, בדרך כלל מתמקדים בשאלה איך המוח משנה את הפעולות שלו בהתאם לשגיאות שהוא מזהה בקלט החושי. אבל מחקרם של Novick & Vaadia (2011) מציע זווית שונה: הם בדקו איך ביצוע פעולה משפיע על התחזיות של המוח לגבי התוצאה החושית של אותה פעולה. בניסוי שלהם, המשתתפים השתמשו בידית רובוטית כדי לשלוט בסמן על מסך, כאשר בשלב מסוים הוכנסה רוטציה של 45° לכיוון התנועה. הם בדקו האם המשתתפים מסוגלים להכליל את הלמידה גם לכיוונים אחרים (השונים מכיוון הסטייה המקורי), או שהלמידה מוגבלת רק לפעולה שהם למדו.

תוצאות המחקר הראו שהמשתתפים למדו מהר מאוד להתאים את התנועה לרוטציה, אבל ההכללה שלהם לא הייתה סימטרית. כאשר הוצגו מטרות חדשות, המשתתפים ביצעו תיקונים רק בכיוון של הפעולה שלמדו. זה מצביע על כך שלמידה מוטורית לא מבוססת רק על תיקון שגיאות בקלט החושי, אלא גם על תחזיות של המוח לגבי תוצאות של פעולות שבוצעו בעבר.

איך זה קשור אלינו? המחקר שלנו לא בדק רק איך המשתתפים מתקנים את התנועה שלהם, אלא גם איך נקודת ההתחלה וכיוון הסטייה משפיעים על הלמידה המוטורית. בפסקאות הבאות נשווה בין הממצאים של

Novick & Vaadia לאלה של המחקר שלנו, ונראה במה אנחנו דומים, במה שונים ואילו תובנות חדשות אפשר להפיק מכך.

המחקר שלנו מצא שכאשר המשתתפים עברו משליטה רגילה לשליטה מסובבת, הם ביצעו בתחילה טעויות גדולות, אבל לאחר מכן למדו בהדרגה לתקן את המסלול שלהם. זה דומה לממצאים של Novick & Vaadia, שהראו שהמשתתפים למדו להתאים את התנועה שלהם לרוטציה של 45° . אבל יש כמה הבדלים חשובים בין שני המחקרים.

ההבדל המרכזי הוא שהמחקר שלנו לא בדק רק איך אנשים לומדים להסתגל לרוטציה, אלא גם איך נקודת ההתחלה של התנועה משפיעה על תהליך הלמידה. אצלנו, לכל משתתף היה כיוון סטייה שונה (ימינה או שמאלה) וכן 3 נקודות התחלה שונות למסלולים. בנוסף, חלק מהמשתתפים עברו רוטציה של 25° ואחרים רוטציה של 35° , מה שאפשר לנו לבדוק איך עוצמת השינוי משפיעה על ההסתגלות המוטורית. לעומת זאת, במחקר של Novick & Vaadia כל המשתתפים חוו אותה רוטציה בדיוק (45°) באותו כיוון ומנקודת התחלה אחת. כלומר, הם בדקו בעיקר איך למידת פעולה משפיעה על חיזוי חושי, אבל לא איך הגורמים הראשוניים של התנועה (כמו נקודת ההתחלה או כיוון התנועה) משפיעים על הלמידה.

עוד הבדל משמעותי הוא האופן שבו נבדקה הלמידה. במחקר שלהם, המשתתפים השתמשו בידית רובוטית כדי לשלוט בסמן על מסך, כך שהתנועה הייתה מכוונת לגמרי על ידי הידיים. אצלנו, לעומת זאת, הלמידה התרחשה בתוך משחק מחשב, שבו המשתתף שולט בדמות שזזה בהתאם לזווית השליטה. כמו שהזכרנו בהשוואה למחקרם של Modchalingam et al, ואפילו עוד יותר מכך, זה משנה את האופן שבו נוצרת הלמידה: התגובה החושית היא יותר אינטואיטיבית כי התנועה מחוברת ישירות למשוב ויזואלי, מה שיכול להשפיע על הדרך שבה המשתתפים צופים את תנועתם ומבצעים התאמות.

נקודה נוספת שלא נבדקה במחקר שלהם, היא תיקונים מוטוריים מיוחדים. במחקר שלנו ראינו שלחלק מהמשתתפים היה תיקון יתר (overshooting) ואחרים לא תיקנו מספיק. Novick & Vaadia הראו שלמידת רוטציה לא התפשטה בצורה סימטרית, מה שיכול להסביר מדוע המשתתפים שלנו תיקנו את תנועתם בצורה לא אחידה – ייתכן שהם ציפו שהתנועה תהיה מתוקנת בכיוון מסוים (לפי הסטייה בשליטה המסובבת), ולכן עשו תיקון יתר או חוסר תיקון בהתאם (במיוחד במעבר לשליטה הרגילה השנייה, בו היה תיקון יתר לכיוון ההפוך מכיוון הסטייה בשליטה המסובבת).

4.6. מגבלות המחקר

בחלק זה יוצגו מגבלות שונות של המחקר, אשר עשויות להשפיע על הפרשנות של התוצאות ועל האפשרות להכליל אותן למצבים אחרים. המגבלות מסווגות לשלוש קטגוריות עיקריות: תוקף חיצוני, מגבלות בהערכת הלמידה המוטורית ומגבלות מתודולוגיות.

4.6.1. מגבלות הקשורות לתוקף החיצוני של הניסוי

הגבלת ההכללה של הממצאים מחוץ לסביבה המבוקרת של המשחק:

האפליקציה ששימשה בניסוי מספקת סביבה מבוקרת, שבה המשתתפים נדרשים להסתגל לשינויי שליטה מוטוריים. עם זאת, אין ודאות כי מנגנוני החיזוי המוטורי שנצפו כאן פועלים באותו אופן במשימות מוטוריות טבעיות. למשל, מצבים יומיומיים כוללים משוב חושי נוסף, כגון פרופריוספציה, שיווי משקל וכוח שרירים, אשר לא נכללו בניסוי זה.

זמן החשיפה הקצר לרוטציה:

המשתתפים נחשפו לשינויים בשליטה במשך פרק זמן קצר יחסית, מה שלא מאפשר לבדוק את השפעת הלמידה בטווח הארוך.

4.6.2. מגבלות בהערכת הלמידה המוטורית

אי-ודאות לגבי סוג הלמידה שחווי המשתתפים:

המחקר לא כלל מדדים ישירים לזיהוי סוג הלמידה שהתרחשה. למרות ששאלנו את המשתתפים שאלות שנועדו לברר האם הלמידה היתה מרומזת או מפורשת (מודעת או לא מודעת), אנחנו לא יכולים לדעת בבירור איזו למידה המשתתפים בניסוי זה חוו.

חוסר מידע לגבי מקור ההבדלים בין נקודות ההתחלה:

הניסוי הצביע על כך שנקודות התחלה שונות השפיעו על הביצועים, אך לא ניתן לקבוע חד-משמעית מדוע. משתנים כמו עומס קוגניטיבי ראשוני, נטייה טבעית של המשתתפים לכיוון מסוים, או אסטרטגיות תנועה אישיות יכולים להיות גורמים משמעותיים, אך לא נמדדו ישירות. עם זאת, שליטה על משתנים כמו יד דומיננטית או ניסיון במשחקי מחשב בוצעה באופן חלקי, כך שסביר שהבדלים אלה אינם הגורם העיקרי.

חוסר יכולת לזהות תהליכים מוחיים – המחקר מתבסס על מדדים התנהגותיים בלבד:

לא נערכה מדידה ישירה של פעילות מוחית, ולכן ניתן רק לשער שהתהליכים שתועדו תואמים למודלים תיאורטיים של למידה מוטורית. שימוש בכלים נירופיזיולוגיים, כגון EEG או fMRI, היה מאפשר הבנה מעמיקה יותר של האזורים במוח המעורבים בתהליך ההסתגלות.

4.6.3. מגבלות מתודולוגיות

מספר משתתפים קטן יחסית, במיוחד לאחר חלוקה לקבוצות:

מספר המשתתפים הכללי בניסוי היה קטן יחסית, ולאחר חלוקה לתת-קבוצות (לפי רוטציה, נקודת התחלה וכו'), חלק מהניתוחים הסטטיסטיים התבססו על מדגמים מצומצמים עוד יותר. הדבר מגביל את יכולת ההכללה של התוצאות ודורש מחקרים נוספים עם מדגם גדול יותר.

השפעת העייפות והמוטיבציה על הביצועים:

המשתתפים נדרשו לבצע מספר רב של ניסיונות, ולכן ייתכן שעייפות קוגניטיבית השפיעה על ביצועיהם בשלבים המאוחרים של הניסוי. בנוסף, מוטיבציה אישית של המשתתפים עשויה להשפיע על מהירות הלמידה, ולא נמדדו מדדים ישירים להערכת רמות המוטיבציה שלהם.

4.6.4. סיכום מגבלות המחקר

מגבלות אלו מצביעות על כך שהניסוי סיפק תמונה מוגבלת של תהליכי החיזוי המוטורי והלמידה האדפטיבית. עם זאת, הן גם מספקות כיוונים אפשריים למחקרים עתידיים, שיכולים להרחיב את ההבנה לגבי מנגנוני החיזוי המוטורי, השפעת נקודת ההתחלה ותהליכי הלמידה המתמשכים בטווח הארוך.

4.7. כיווני מחקר עתידיים

בהתבסס על הממצאים שנאספו והמגבלות שהוצגו, ניתן להציע מספר כיוונים למחקר עתידי אשר יוכלו להעמיק את ההבנה לגבי תהליכי החיזוי המוטורי והלמידה האדפטיבית. להלן מספר הצעות עיקריות למחקרים עתידיים:

4.7.1 הרחבת גודל המדגם

כדי לשפר את התוקף החיצוני של הממצאים, מחקרים עתידיים יכולים לכלול מדגם גדול יותר של משתתפים. מחקר עם מספר רב יותר של נבדקים יאפשר:

- שיפור יכולת ההכללה של הממצאים למגוון רחב יותר של אוכלוסיות.
- חלוקה טובה יותר לקבוצות ניסוי, כך שניתן יהיה לבדוק משתנים שונים (כגון סוג הרוטציה, יד דומיננטית, ניסיון במשחקים, נקודות ההתחלה ועוד) באופן מבודד ומדויק יותר.

4.7.2. הפרדת נקודות התחלה בין משתתפים שונים

במחקר הנוכחי כל משתתף התנסה בכל נקודות ההתחלה, אך בעתיד ניתן יהיה להגדיר לכל משתתף נקודת התחלה קבועה. שינוי זה יסייע לבדוק:

- כיצד נקודת התחלה משפיעה באופן ישיר על ביצועי המשתתף, ללא השפעות של ניסיונות קודמים.
- האם ההשפעה של נקודת התחלה היא תוצאה של הסתגלות מוטורית, או גורם קוגניטיבי הקשור לתכנון תנועה.
- האם משתתפים שמתנסים בנקודה אחת בלבד מסתגלים אחרת בהשוואה למשתתפים שחווים נקודות התחלה משתנות.

4.7.3. נקודת התחלה אחת ושלוש נקודות מטרה

במחקר הנוכחי יש נקודת מטרה אחת ושלוש נקודות התחלה שונות. זה גורם לכך שבשתי נקודות התחלה המשתתף מזיז מהצד שלו ולא דוחף את הדמות ממנו והלאה (פעולה עם אפשרות להכרות וקונטקסט רחב ועמוק יותר מאשר פעולה של הזזת חפצים מהצד).

בעתיד ניתן לבדוק כיצד התוצאות ישתנו במקרה של נקודת התחלה יחידה ושלוש נקודות מטרה שונות. שינוי זה יסייע לבדוק האם השינוי בין נקודות התחלה אכן נובע מקונטקסט של הרחקת גופים הרחק מהמשתתף או שמא מסיבה אחרת שאינה ידועה. אם השינוי בנקודות ההתחלה השונות שאנו רואים בניסוי שלנו מגיע מקונטקסט עבר (הרגל של הזזת דברים אליך או הרחק ממך), אז בניסוי שבו יש רק נקודת התחלה אחת והיא מולך, כך שלא משנה לאיזו נקודת מטרה המשתתף צריך לזוז - הפעולה היא עדיין הרחקה מהאדם, לכן לא נראה שינוי משמעותי בין נקודות ההתחלה השונות. ואם זה אכן היה המקרה, אפשרי להניח שהשוני הנבחן בניסוי שלנו, מגיע מקונטקסט עבר חזק.

4.7.4. בדיקות נוירופיזיולוגיות (fMRI, EEG) לזיהוי תהליכים מוחיים

מכיוון שהמחקר הנוכחי מתבסס על מדדים התנהגותיים בלבד, מחקרים עתידיים יכולים להשתמש בהדמיה מוחית (fMRI, EEG) כדי לזהות:

- אילו אזורים במוח מעורבים בתהליך החיזוי המוטורי והאם פעילותם משתנה בין סוגי השליטה השונים.
- האם קיימים הבדלים ברמת המודעות ללמידה בין משתתפים (למידה מרומזת מול למידה מפורשת).
- האם אזורי מוח שונים מעורבים במעבר משליטה רגילה לשליטה מסובבת, וכיצד מתרחשת ההסתגלות ברמה העצבית.

4.7.5. בדיקה של חזרות ארוכות יותר ולמידה מתמשכת

כדי לבחון את השפעת הלמידה לטווח ארוך, ניתן להרחיב את הניסוי כך שהמשתתפים יתנסו במספר רב יותר של חזרות לאורך ימים או שבועות. כמו כן גם מספר ניסיונות גבוה יותר לכל סוג שליטה. הדבר יאפשר לבדוק:

- האם הלמידה המוטורית מחזיקה מעמד לאורך זמן, או שנדרש תרגול מתמיד כדי לשמר אותה.
- האם חזרה לשליטה רגילה לאחר מספר ימים עדיין תשמר את אפקט הלמידה.
- כיצד שינויי מוטיבציה ועייפות משפיעים על הלמידה לאורך זמן.

4.7.6. מעבר הדרגתי בין שליטה רגילה לשליטה מסובבת

מחקרם של Modchalingam et al. (2023) מספק ראיות לכך ששינוי הדרגתי יכול לשפר את הלמידה המוטורית המרומזת. הם מצאו שכאשר סטייה ויזואל-מוטורית הוצגה בשלבים מדורגים עם פרקי הסתגלות קבועים, המשתתפים הצליחו לפתח למידה מרומזת גבוהה יותר ב-80% לעומת משתתפים שחוו שינוי חד או שינוי הדרגתי מתמשך (ramped).

במקום מעבר חד בין שליטה רגילה לשליטה מסובבת, ניתן לבצע מעבר הדרגתי יותר, בו זווית הרוטציה תעלה בהדרגה (למשל 5° בכל מספר ניסיונות) עד שתגיע לזווית המקסימלית. מחקר כזה יוכל לבחון:

- האם הסתגלות הדרגתית מובילה ללמידה מרומזת יותר, מבלי שהמשתתפים יהיו מודעים לשינוי.
- האם המעבר ההדרגתי משפיע על היעילות של הלמידה בהשוואה לשינוי חד.
- כיצד מגיבים המשתתפים כאשר הם נדרשים לחזור לשליטה רגילה לאחר מעבר הדרגתי.

4.7.7. בדיקה במערכת פיזית – יישום במודל רובוטי

כדי לבחון האם יש הבדלים בין למידה במערכת ממוחשבת לבין למידה בעולם הפיזי, ניתן לבצע מחקר דומה תוך שימוש במערכת מוטורית פיזית, למשל:

- בקרת יד רובוטית שמחקה את תנועות המשתתפים.
- שליטה ביד אלקטרונית עם סטייה דומה לזו שהייתה במשחק.
- השוואה בין ביצועים במערכת ממוחשבת למערכת פיזית, כדי לבדוק האם למידה ממוחשבת משתמרת במצבים אמיתיים.

4.8. השלכות העבודה לתחומי עניין נוספים

בחלק זה אעסוק בהשלכות הרחבות של מחקר זה, עם דגש על תחום החיזוי המוטורי והלמידה האדפטיבית. אחת מהדוגמאות הבולטות ליישום עקרונות אלו היא ממשקי מוח-מכונה (BMIs – Brain-Machine Interfaces), המאפשרים שליטה ישירה בגפיים רובוטיות או מכשירים חיצוניים באמצעות פעילות מוחית. בהתבסס על מאמרם של (Lebedev & Nicolelis, 2006), נסביר מהו ממשק מוח-מכונה וכיצד הוא קשור לעבודה זו.

ממשקי מוח-מכונה הם טכנולוגיות מתקדמות המאפשרות לשלוט במכונות שונות באמצעות הפעילות החשמלית של המוח, ללא צורך בתנועה פיזית של הגוף. מערכות אלו פותחו בעיקר עבור אנשים עם שיתוק מוחלט או קטיעת גפיים, ומאפשרות להם לשלוט בפרוטזות רובוטיות או מערכות ממוחשבות, ובכך להחזיר להם עצמאות ושליטה בתנועה.

4.8.1. הקשר בין ממשקי מוח-מכונה למחקר זה

חלק משמעותי מהמחקר שלנו עוסק במנגנוני חיזוי מוטורי ובאופן שבו המוח מתאים את הפקודות התנועתיות בהתאם למשוב חושי. מנגנון זה פועל בתהליך מחזורי – אם התנועה משיגה את המשוב הצפוי, מערכת העצבים המרכזית (CNS) מזהה שהפקודה הייתה מדויקת, ולכן תשתמש במודל דומה גם בעתיד. לעומת זאת, אם המשוב החושי שונה מהמצופה, המוח מעדכן את הפקודה כך שבפעם הבאה הפעולה תבוצע בצורה מדויקת יותר.

באופן דומה, ממשקי מוח-מכונה משתמשים במנגנון חיזוי דומה. בהתחלה, הממשק מזהה את האותות החשמליים במוח, אך אינו מסוגל לפרש אותם ישירות. כיצד המערכת "לומדת" את הכוונה של המשתמש? התהליך הוא אדפטיבי ודו-כיווני – גם המשתמש לומד כיצד לשלוט במערכת, וגם ה-BMI לומד לפרש את כוונותיו.

1. בשלב הראשון, המשתמש מתבקש לדמיין תנועה מסוימת – למשל, סגירת היד או הרמת רגל.
 2. במקביל, המערכת מקליטה את הפעילות החשמלית במוח, ומנסה לזהות תבניות חוזרות של פעילות עצבית הקשורה לתנועה זו.
 3. כאשר המשתמש מדמיין אותה תנועה שוב, המערכת כבר יכולה לנבא מהי כוונתו ולהפעיל את הפרוטזה בהתאם.
 4. המוח מזהה את הקשר בין הדמיון של תנועה לבין התנועה שבוצעה בפועל ומתחיל לפתח חיזוי מוטורי חדש, שבו הפעלת אזורי מוח מסוימים מתורגמת ישירות לתנועת הרובוט.
- כאן נמצא הדמיון בין תהליך החיזוי המוטורי שאנו חקרנו לבין האופן שבו BMI פועל. כמו שהמשתתפים בניסוי שלנו למדו להתאים את עצמם לשינוי רטציה ויזואל-מוטורית, כך משתמשי BMI לומדים להתאים את פעילות המוח שלהם לשליטה מדויקת בממשק.
- אם החיזוי של המוח מדויק, כלומר האזורים הנכונים מופעלים והפרוטזה מגיבה בהתאם, המשוב הוויזואלי יהיה תואם לציפיות, ולכן המוח יחזק את ההתאמה הזו בפעמים הבאות. לעומת זאת, אם החיזוי אינו מדויק, כלומר הפלט של ה-BMI אינו תואם את כוונת המשתמש, המוח יעדכן את הפקודות שלו כך שהתגובה הבאה תהיה קרובה יותר למטרה.
- בסופו של דבר, כמו שבמערכת הניסוי שלנו המשתתפים למדו להתאים את עצמם לשינוי חיצוני על בסיס משוב חושי, כך גם ממשקי מוח-מכונה מבוססים על מנגנון הסתגלותי דומה, שבו מערכת העצבים המרכזית מתאימה את הפקודות שלה בהתאם למשוב שהיא מקבלת מהממשק הרובוטי.

4.8.1.1 חשיבות המשוב החושי לפעולה ולמידה

במערכת מוטורית רגילה, כאשר אנחנו מבצעים תנועה, אנחנו מקבלים משוב חושי בזמן אמת, גם מתחושות הגוף וגם מראייה. המשוב הזה מאפשר לנו לתקן שגיאות, לשפר את הדיוק, ולפתח חיזוי מוטורי טוב יותר.

בממשקי מוח-מכונה, המשוב הזה כמעט לא קיים. כיום, רוב ממשקי מוח-מכונה מספקים משוב ויזואלי בלבד – המשתמש רואה את התנועה של הפרוטזה הרובוטית, אבל אינו מרגיש אותה. אין תחושת מגע, אין משקל ואין מידע תחושתי מהפרוטזה עצמה. בלי משוב תחושתי, קשה לכוון את השליטה בדיוק כמו שקשה לכוון תנועה עדינה של הידיים בעיניים עצומות.

במחקר שלנו, המשוב החושי המרכזי גם היה ויזואלי בלבד, בדומה למה שקורה בממשקי מוח-מכונה. כדי לשפר את היכולת של המשתתפים להבין את הצלחתם, הוספנו אנימציות ומשוב קולי להצלחה או כישלון, מה שמוסיף יותר ממדים של משוב חושי ובתקווה גם את קלות הלמידה של הממשק. למרות שבדיוק כמו שב-BMI המשוב הוויזואלי לא מספיק כדי להגיע לשליטה מושלמת, ייתכן שגם אצלנו המשוב החושי המצומצם היה גורם מגביל – אולי אם היה משוב מגע, כמו רטט או התנגדות פיזית (כגון היד הרובוטית במחקרם של (Novick & Vaadia (2011), המשתתפים היו מסתגלים מהר יותר לשינוי ברוטציה.

4.8.1.2. חיבור המוח לממשקי מוח מכונה

משהו מעניין קורה אחרי שימוש ממושך ב-BMI: המוח משתנה ומתאים את עצמו כדי לשפר את השליטה במערכת החדשה. מחקרים הראו שלאורך זמן, הפעילות החשמלית במוח משתנה, והנוירונים שמגיבים לפקודות תנועה מתארגנים מחדש כך שהם מגיבים טוב יותר לממשק. בהתחלה, המשתמשים שולטים בממשק בצורה לא מדויקת, אבל עם הזמן המוח מתאים את הפעילות העצבית שלו כך שהשליטה משתפרת. כלומר, ממש כמו שהמוח למד לפצות על הרוטציה בניסוי שלנו, כך הוא לומד "לפצות" על ההפרדה בין הפקודה לבין הפרוטזה, עד שהתנועה מרגישה טבעית יותר.

4.8.1.3. סיכום: ממשקי מוח מכונה

- גם בממשקי מוח-מכונה וגם בלמידה מוטורית רגילה, המשוב החושי משחק תפקיד מרכזי.
- כאשר המשוב מוגבל (כמו ב-BMI או בניסוי שלנו), הלמידה נעשית איטית יותר, משום שקשה לתקן טעויות בלי מידע חושי מספק.
- המוח מסוגל להסתגל גם לסביבות חדשות לגמרי ולשנות את הפעילות העצבית שלו כדי לשפר את השליטה בתנועה, גם אם היא מתבצעת דרך ממשק מלאכותי.

5. ביבליוגרפיה

1. קרלסון, נ. ר'. (2001). הפיזיולוגיה של ההתנהגות (מהדורה שישית, כרך א'; ע'. כהן, מתרגמת). האוניברסיטה הפתוחה.
2. Lebedev, M. A., & Nicolelis, M. A. L. (2006). Brain–machine interfaces: Past, present and future. *Trends in Neurosciences*, 29(9), 536–546.
[https://www.cell.com/trends/neurosciences/abstract/S0166-2236\(06\)00147-0?returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS0166223606001470%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/trends/neurosciences/abstract/S0166-2236(06)00147-0?returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS0166223606001470%3Fshowall%3Dtrue)
3. Modchalingam, S., Ciccone, M., D'Amario, S., 't Hart, B. M., & Henriques, D. Y. P. (2023). Adapting to visuomotor rotations in stepped increments increases implicit motor learning. *Scientific Reports*, 13, 5022.
<https://www.nature.com/articles/s41598-023-32068-8>
4. Novick, I., & Vaadia, E. (2011). Just Do It: Action-Dependent Learning Allows Sensory Prediction. *PLOS ONE*, 6(10), e26020.
<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0026020>
5. Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *Nature Neuroscience*, 3(Suppl), 1212–1217.
https://www.nature.com/articles/nn1100_1212

6. נספחים

6.1. הצעת המחקר

טופס הצעת מחקר לעבודת גמר בביולוגיה

עבודה בהיקף של 5 יח"ל:

תלמיד:	מנחה:	מנחה:
בית הספר: שפע מקור חיים, ירושלים. סמל מוסד- 615948. מספר טלפון: 02-579-4457. דוא"ל: shefa.makor@gmail.com	שם המוסד: האוניברסיטה העברית, המרכז לחקר המוח (ELSC) עיסוקו של המנחה האקדמי: מדעי המוח.	שם המוסד: ישיבה תיכונית שפע מקור חיים, ירושלים
התלמיד לומד במגמת ביולוגיה בהיקף של 5 יחידות לימוד.		
שם התלמיד: אברהם טל ליבוביץ	שם המנחה: פרופ' אילון ועדיה	שם המנחה: אייל נתיב
מספר ת.ז.: 216739961	תואר אקדמי: פמ"ה	תואר אקדמי: לומד לתואר שני
תאריך לידה: 4/4/2007	מספר ת.ז.: 009503459	מספר ת.ז.: 201512514
מספר טלפון: 0548827221	מספר טלפון: 0548820800	מספר טלפון: 0503911639
דוא"ל: avrahamtal@yeshivatshefa.org.il	דוא"ל: eilon.vaadia@mail.huji.ac.il	דוא"ל: eyalin6@yeshivatshefa.org.il

רכז עבודות גמר:

שם הרכז: אייל נתיב.

מספר טלפון: 050-3911-639

דוא"ל: eyalin6@yeshivatshefa.org.il

תחום העבודה: ביולוגיה.

סוג העבודה: לא צמודה.

נושא העבודה: עקרונות יסוד של תהליכי תפיסה חושית פעילה (Active Perception).

השאלה המועלית לדיון וחקירה:

- מה היא תפיסה חושית?
- כיצד החיזוי (ניבוי) של שינוי בעולם החיצון, משפיע על החוויה¹ החושית?

הבסיס התיאורטי לעבודה:

מה היא תפיסה חושית?

תפיסה חושית מושגת על ידי תהליך של חיזוי, שבו מחשב המוח מה תהא השפעת הפעולה והקונטקסט (למשל "תנועת יד") ברגע נתון על זיהוי תחושות ע"י מערכת העצבים המרכזית (כלומר: לחזות גירוי תחושת, ולהשוות אותו לגירוי בפועל אחרי סיום הפעולה הרצויה).²

המודל שאבדוק בעבודה זו הוא מודל חישובי, שמסביר את התיאוריה כי ה- CNS (מערכת העצבים המרכזית) מנבא את הגירויים שהגוף יקבל כתלות בעבר ובהווה. מודל החיזוי קרוי "forward models" והוא חלק מהמנגנון הכללי של בקרת תנועה ותפיסה חושית. לשם הבנה, נתייחס כאן לפעולה של ה-"forward models", שאותה נחלק לשלושה מרכיבים:³

¹ נשתמש במילה "חוויה" ובמילה "תפיסה" כאל משמעויות דומות. אך בשלבים שונים (רוב הזמן) "תפיסה" תפנה יותר לחלק הפיזי של הפיידבק התחושת, לעומת המילה "חוויה" שנשתמש בה יותר בשביל להראות כיצד התהליך של תפיסה חושית משפיעה על ההתנהגות וההרגשה של האדם מאותו תהליך תפיסה.

² Wolpert & Ghahramani, 2000

³ שם

1. המצב הנוכחי של הגוף וסביבתו (state) כולל את כל המידע הרלוונטי המיידי בגוף או מחוצה לו; האם הגוף או חפץ חיצוני כלשהו בתזוזה? איפה כל הגפיים ביחס לסביבה? וכן עוד פרטים רלוונטיים לפעולה הרצויה. לדוגמה: האם הגוף כרגע במצב ישיבה, או ריצה; האם כדור זז במהירות גבוהה לכיווני.

2. הקונטקסט ("context") של הפעולה, הקונטקסט זה המידע הרלוונטי המשפיע על הפעולה, אך לא המידע הפיזי העכשווי הכלול במצב של הגוף ה-state. כולל היסטוריה, תחושה, רגש או שינוי פיזיקלי הרלוונטי לפעולה הרצויה. למשל: האם אני נוהג ויש עכשיו גשם. דוגמה נוספת - טמפרטורה של כוס, אם אני מנבא שהכוס חמה מאוד, צריך להיזהר יותר. או אם יש לכוס ערך רגשי כלשהו, הפקודות של ה-CNS כיצד להניע את היד כדי להזיז את הכוס יתוכננו בזהירות רבה יותר.

3. Motor command: בהינתן state ו-context לקראת הפעולה הרצויה, ה-CNS יבצע וייצור פקודות מוטוריות לפעולה הרצויה ("Motor command generation"). את זה ה-CNS עושה ע"פ שני השלבים הקודמים, המצב ("state") והקונטקסט ("context"). במהלך השלב הזה, ה-CNS מוציא פקודות לגוף לפעול לפי החיזוי שחזה בשלבים הקודמים.

שלושת אלה קשורים במעגל סגור כמתואר בתמונה 1. חיזוי של פעולה או שינוי גופני ע"י המצב הנוכחי של הגוף ("state"), הקונטקסט של השינוי או הפעולה והוצאה לפועל של הפעולה הרצויה ("Motor command generation"). לפעולה הזאת קוראים "forward models".⁴

ע"י הוצאה לפועל של הפעולה (בשלב האחרון מבין השלבים שמנינו לעיל), הגוף מסוגל לחוש אם הפעולה מתבצעת כמצופה ע"פ החיזוי או לא. ה-CNS עושה את זה ע"י השוואה בין הפידבק התחושתי שהוא מקבל מהתנועה עצמה לבין הפידבק התחושתי שה-CNS חזה שיקבל.

אם התוצאות קרובות, אז הפעולה בוצעה כמצופה. אבל אם יש הבדל בין החיזוי של הפידבק לבין הפידבק של התנועה עצמה - אז יש צורך לתקן אותה, כלומר לעדכן את אופן פעולת המודל כדי לעדכן את החיזוי ואת הפעולה כך שהחיזוי יהיה נכון.

מערכת כזו מתוארת במאמר משנת 2000 (לפני 24 שנים; (Wolpert & Ghahramani, 2000)) והיא ניתנת לתיאור וחישוב מתמטי ע"י המשוואה הבאה (kalman filter):

$$\hat{y}_t = A\hat{y}_{t-1} + K_t(X_t - H A \hat{y}_{t-1})$$

כאשר משמעות המשתנים מתוארת בתמונה. בדוגמא זו פועלת המערכת כדי להזיז את היד באופן מדויק ממקום אחד (y הנתון בזמן t-1) אל מקום אחר (שיהיה y בצעד הזמן הבא t):



- להבין מהם מנגנוני תפיסה חושית אדפטיבית.
- לדון בשימושים אפשריים של מערכת החיזוי.

- **תפיסה חושית** היא תהליך אקטיבי של חיזוי הקלט החושי, ע"י מעגל שמקשר בין פעולה לבין התחושה הצפויה בעקבות הפעולה בקונטקסט נתון.

93

- השימוש המרכזי שנעסוק בו בעבודה הוא ממשקי מוח מכונה.

(Willett, Avansino, Hochberg, Henderson & Shenoy, 2021. Lebedev & Nicolelis, 2006)

פירוט ההיבט המחקרי/מעשי של העבודה:

ניסוי 1: זיהוי הבעת פנים של אדם (השפעת קונטקסט על החלטת הנבדק)

המשתתף יתבקש להחליט אם הפרצוף כעוס או רגוע (או אולי חייכן), בתנאים שונים של תנוחות הגוף. מטרת הניסוי היא ללמד על האפקט של מנח הגוף וידיים (רגוע או מאיים) על תפיסת ההבעה של הפרצוף (נעים או לא נעים).

ניסוי 2: אדפטציה סנסורית מוטורית: visuo-motor rotatio

(Ghilardi & Gordon, 1995. PazBorau, Boraud, Natan, Bergman & Vaadia, 2003)

1. המשתתף יצויד במחשב ועכבר. במסך המחשב יהיו כ 5 נקודות במרחק ומיקום שונה, אך בגודל אחיד.
 2. המשתתף יתבקש לחבר בקווים את הנקודות על המסך עם העכבר במהירות האפשרית. נמדוד את הזמן שלוקח לו לעשות את זה (זה הזמן שמשווה מולו את השלבים הבאים).
 3. כעת נהפוך את העכבר, וניתן למשתתף 5 ניסיונות לחבר בין הנקודות במהירות האפשרית. נשווה את השיפור בזמן בביצוע בין חמשת הניסיונות עם העכבר ההפוך, ונשווה את כולם מול הניסיון הראשון עם העכבר הרגיל.
- מטרת הניסוי היא להבין כיצד ציפייה של פעולה כלשהי (בניסוי הזה: תזוזה רגילה של העכבר) תקשה על פעולה דומה, אך עם תוצאות שונות לפעולה (תזוזה הפוכה של העכבר). וכיצד המוח יצליח ללמוד, ע"י פידבק תחושתית, את השוני בתוצאה מהפעולה ולהתאים את הפעולה.

ניסוי 3: weight size illusion

(Landry, Saccone & Chouinard, 2019)

1. יוצגו בפני המשתתף שני חפצים שווים במשקלם ושונים בגודלם: חפץ אחד גדול יותר וחפץ שני קטן יותר.
2. המשתתף יתבקש להעריך את המשקלים של שני החפצים ולכתוב את תשובתו.
3. המשתתף יתבקש להרים את שני החפצים באותו הזמן ולהחליט איזה חפץ משקלו גדול יותר.

מטרת הניסוי הזה היא להבין כיצד ציפייה לתוצאה כלשהי מפעולה (בניסוי זה: הציפייה שהחפץ הגדול הוא בעל משקל גדול יותר מהחפץ הקטן), תשפיע על התפיסה והפידבק התחושתית מאותה הפעולה (בניסוי זה, אם הציפייה תשפיע על הפידבק החושי, המשתתף יחשוב שמשקלו של החפץ הקטן גדול יותר ממשקלו של החפץ הגדול, למרות שהמשקל של שניהם שווה).

ניסוי 4: תופעת "Change blindness"

(Simons, Chabris, Schnur & Levin, 2002)

1. נציג לפני המשתתפים סרטון קצר. המשתתפים יתבקשו להקדיש תשומת לב לביצוע מטלה קוגניטיבית בעת הצפייה בסרטון ובה בעת נבחן באיזו מידה יכול הנבדק לזהות שינויים נוספים בסרטון.
 2. לאחר הצפייה בסרטון, נבקש מהמשתתפים את תוצאות המטלה. כמו כן נשאל אותם אם הם ראו שינוי כלשהו במהלך הסרטון.
 3. במידה שלא ראו, נקריין שוב את הסרטון ונבקש מהם לשים לב לאחד מהשינויים שבסרטון (נתאר במדויק את השינוי). בסוף ההקרנה החוזרת, נשאל אותם אם הם ראו את השינוי.
- מטרת הניסוי הרביעי, היא לבדוק כמה הציפייה לשינוי כלשהו תשנה פיזית את הפידבק התחושתית שאדם יקבל מאותו השינוי. בניסוי הזה, האם תשומת הלב המוקדשת למטלה שבסרטון תעצור או תשנה את הפידבק התחושתית שנקבל מדברים שלא קשורים (השינוי)? ואם כן, באיזו מידה?

ניסוי 5: תפיסה שמיעתית

1. נשמיע לכל נבדק שתי הקלטות. בראשונה יישמע דיבור מעוות (המקשה על הבנת הנאמר בהקלטה).
 2. בשניה, הקלטה עם אותן המילים, אך ללא עיוות.
 3. נשמיע את ההקלטה הראשונה (המעוותת) שלוש פעמים למשתתף. ונשאל אותו אם הבין את הנאמר בהקלטה.
 4. במידה שלא הבין את ההקלטה הראשונה, נשמיע לו את ההקלטה השניה (המובנת).
 5. אחרי השמעת ההקלטה השניה, נשמיע לו שוב את ההקלטה הראשונה (המעוותת) ונשאל אותו אם הבין אותה הפעם.
- מטרתו של ניסוי 5 דומה מאוד למטרת ניסוי 4. אך הצורך בניסוי 5 הוא לבדוק האם הציפייה לשינוי משפיעה על התפיסה שלנו מאותו השינוי בכל חוש, או רק בחלק מהחושים (בניסוי 4 נבדק חוש הראייה ובניסוי 5 חוש השמיעה).

חלק התלמיד בעבודה:

ביצוע הניסויים, איסוף הנתונים, ניתוח תוצאות והסקת מסקנות.

לוח זמנים משוער להכנת העבודה:

הצגתי כאן 5 מערכים של ניסויים. השלמת כולם עלולה לדרוש יותר מאמצים מהצפוי. מסקנות העבודה עשויות להתרחב לפי מידת ההצלחות. אבל בכל מקרה ההערכה הנוכחית היא:

1. ניסוי 1: מחקר זה ייערך במרכז אדמונד ולילי ספרא למדעי המוח בהנחיית פרופ' ועדיה ובתקווה לקבל עזרה מתלמיד מחקר (דוקטורט) במרכז. זהו הניסוי הקשה יותר שהצבנו כאתגר, אך עלול להישמט אם יתברר כי ישנם סיבוכים שדורשים יותר מחודש של עבודה.

2. ניסוי 2 יימשך 3 חדשים בין 1/4/24 ויימשך במקביל לניסוי 1 כשלושה חודשים עד 1/7/24.

3. ניסויים 3,4,5 הם קלים יחסית בהשוואה לניסוי 1. גם ניסויים אלה יבוצעו בהדרכת פרופ' ועדיה במרכז אדמונד ולילי ספרא למדעי המוח של האוניברסיטה העברית בירושלים. אנו מעריכים כי ניתן להשלים בכל יום בדיקה של נבדק אחד. ניתוח התוצאות גם הוא אינו דורש זמן רב מדי, ייתכן שאלו יהיו הניסויים המרכזיים אם ניתקל בקשיים רבים מדי בביצוע ניסויים 1 ו2.

4. ביצוע של כל הניסויים 1-5 עשוי להימשך עד שישה חודשים.

5. ניתוח הנתונים יימשך כ 4 חדשים נוספים (יתחיל במקביל לאיסוף תוצאות, החל בתאריך 1/6/24 בתלות בסיבוכ התוצאות וקצב הלמידה של תוכנות סטטיסטיות).

6. כתיבת העבודה: תימשך במקביל לכל אורכם של הניסויים וניתוח הנתונים ותסתיים בתאריך 1/12/24.

ראשי פרקים של עבודת הגמר:

שער

תוכן העניינים

פרק א: מבוא

1. הצגת השאלות והמוטיבציה של המחקר.

2. סקירת ספרות שתתאר מחקרים שמטרתם הייתה לברר מהי תפיסה חושית.

3. סיכום הרקע התיאורטי (כולל מושגים, המערכת הבסיסית וכו').
4. תיאור מפורט של שאלת המחקר העיקרית: כיצד המוח מייצר תפיסה חושית?
5. תיאור מפורט של היפותזות המחקר: הצגת מודל תפיסה במנגנון של "בקר-חזאי אדפטיבי".
6. מסקנות ותחזית של משמעויות אפשריות של התוצאות הצפויות: למשל, מה המשמעות ההתנהגותית והחוויתית של חיזוי ותפיסה? או, כמה התפיסה שלנו מושפעת ושונה מ"המציאות האמיתית"?

פרק ב: מהלך המחקר והתוצאות

1. ניסויים פסיכופיזיים. בעת התכנון העכשווי יוצגו ניסויים אפשריים, שמתוכם נבחר סט חלקי לביצוע, לפי הצורך שיתברר במהלך הניסויים והשאלות שיעלו בזמן המחקר.
2. הצגת תוצאות, ניתוח סטטיסטי והצגות גרפיות של התוצאות.

פרק ג: דיון ומסקנות מהניסויים

1. תמצית תוצאות של הניסויים, בהתייחסות לשאלות החקר.
2. הסבר התוצאות ביחס למקורות שנסקרו בפרק המבוא.
3. דיון בהשלכות: מה הן האפשרויות והמשמעויות של מנגנוני התפיסה החושית שתארנו?
4. מה האפשרויות לשימוש בתהליך התפיסה החושית בממשקי מוח מכונה?
5. דיון בדוגמאות מהספרות וסוגי אילוזיות, כולל קשר לאמנות.
6. מגבלות המחקר וכיווני מחקר המשכיים.

פרק ד: דיון על משמעויות מעשיות של מנגנון מודל החיזוי

דיון זה יסוב על אפליקציות חישוביות, לשוניות ורפואיות הקשורות לרעיון של מודל תפיסה לפי עקרונות יסוד של תהליכי תפיסה חושית (Active Perception). למשל, עקרונות של תקשורת בין אנשים, מה חשוב לדעת כדי ללמוד באופן יעיל התנהגויות שונות (כגון קריאה וכתובה), בתחום הקליני - ממשקי מוח מכונה (ראה ספרות 7), בתחום האמנות - כיצד מצליחים האמנים לעניין את החושים ועוד.

ביבליוגרפיה

1. Behrmann M, Avidan G. 2022. Face perception: computational insights from phylogeny. Trends Cogn Sci. (Apr) 26: 350-363. doi: [10.1016/j.tics.2022.01.006](https://doi.org/10.1016/j.tics.2022.01.006)
2. Engelhard B, Darshan R, Ozeri-Engelhard N, Israel Z, Werner-Reiss U, Hansel D, Bergman H, Vaadia E. 2019. Neuronal activity and learning in local cortical networks are modulated by the action-perception state. bioRxiv, cold spring harbor (Feb). doi: <https://doi.org/10.1101/537613>
3. Ghilardi MF, Gordon J, Ghez C. 1995. Learning a visuomotor transformation in a local area of work space produces directional biases in other areas. JNP (June) 73: 2535–2539. <https://doi.org/10.1152/jn.1995.73.6.2535>
4. ebedev MA, Nicolelis MAL. 2006. Brain-machine interfaces: past, present and future. Trends in Neurosciences (sep) 29: 536-546. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tins.2006.07.004>
5. Paz R, Boraud T, Natan C, Bergman H, Vaadia E. 2003. Preparatory activity in motor cortex reflects learning of local visuomotor skills. Nat Neurosci. (Aug) 6: 882– 890. DOI: [10.1038/nn1097](https://doi.org/10.1038/nn1097)
6. Saccone EJ, Landry O, Chouinard PA. 2019. A meta-analysis of the size-weight and material-weight illusions. Psychonomic Bulletin & Review (May) 26: 1195–1212. <https://doi.org/10.3758/s13423-019-01604-x>
7. Simons DJ, Chabris CF, Schnur T, Levin DT. 2002. Evidence for preserved representations in change blindness. Conscious Cogn. (Mar) 11: 78-97. doi: 10.1006/ccog.2001.0533.
8. Willett FR, Avansino DT, Hochberg LR, Henderson JM, Shenoy KV. 2021. High-performance brain-to-text communication via handwriting. Nature (May) 593: 249-254. doi: [10.1038/s41586-021-03506-2](https://doi.org/10.1038/s41586-021-03506-2)
9. Wolpert DM, Ghahramani Z. 2000. Computational principles of movement neuroscience. Nature Neuroscience (Nov) 3: 1212–1217.

6.2. מהימנות ותוקף הניסוי

כדי לוודא את מהימנות מערכת המדידה שלנו, ביצענו סדרת בדיקות אוטומטיות. המהימנות נבחנה בשני היבטים מרכזיים:

ראשית, בדקנו את עקביות מדידת התנועה באמצעות 10 תנועות זהות למרחק של 5 יחידות במשחק המחשב. התוצאות הראו עקביות מרשימה עם זמן ממוצע של 0.900 שניות וסטיית תקן זניחה. תוצאה זו מעידה על כך שמערכת המדידה שלנו אמינה ומספקת תוצאות עקביות לאורך מספר רב של ניסיונות.

שנית, בחנו את קצב הדגימה של מערכת איסוף הנתונים. הניתוח הראה שהמערכת דוגמת נתוני מיקום בממוצע כל 0.0020 שניות (500Hz) עם סטיית תקן של 0.0029 שניות. קצב דגימה גבוה זה מבטיח שאנו מצליחים לתעד את מסלולי התנועה בפירוט רב ובדיוק זמן מספק לצורך הניתוח שלנו.

תוצאות אלו מראות כי מערכת המדידה שלנו מספקת יכולות איסוף נתונים אמינות ומדויקות, מתאימות למחקר של תהליכי למידה והסתגלות מוטורית.

קישור לקוד הבדיקה:

<https://drive.google.com/file/d/1Ve-8YT3R7gk0WmgCIrxy2HdkQ4skeK1F/view?usp=sharing>

6.3 טבלה של ממוצעי זמני השלמת המשימה לכל ניסיון

Trial Number	Control Type 1	Control Type 2	Control Type 3
1	1.518615	1.592346	1.499077
2	1.4235	1.670692	1.417038
3	1.551654	1.565192	1.570269
4	1.478269	1.526808	1.479615
5	1.559346	1.510538	1.520192

6	1.410769	1.579038	1.413154
7	1.417115	1.578808	1.438846
8	1.518769	1.646077	1.505538
9	1.514077	1.5075	1.531115
10	1.469846	1.521423	1.527115
11	1.414385	1.551923	1.409654
12	1.5085	1.492462	1.489692
13	1.430962	1.536192	1.410423
14	1.508231	1.542846	1.522538
15	1.483885	1.553	1.469077
16	1.478462	1.512038	1.491
17	1.457538	1.484077	1.518846
18	1.410885	1.626654	1.414077
19	1.488808	1.483731	1.486385
20	1.409423	1.569885	1.410846
21	1.4635	1.486038	1.449769
22	1.4115	1.588308	1.409923
23	1.498462	1.489231	1.502077
24	1.446808	1.521192	1.557154

6.4 טבלה של ממוצעי יעילות המסלול לכל ניסיון

Trial Number	Control Type 1	Control Type 2	Control Type 3
1	96.08923	92.14577	95.43346
2	99.98962	89.51615	99.70962
3	96.53962	94.64846	94.61885
4	97.26538	96.19692	96.38731
5	95.23423	94.705	94.51808
6	100	91.58077	99.79692
7	99.98654	92.15615	98.91038
8	96.43346	95.08769	96.11192
9	95.48846	96.01923	94.72077
10	96.94	95.30731	95.04385
11	100	92.22154	99.98115
12	96.83885	96.17077	95.89615
13	99.98885	93.58962	99.99962
14	96.53654	95.82308	94.44692
15	97.29808	95.09308	97.04038
16	96.74423	95.35769	95.73077
17	97.63692	96.11731	96.89615
18	100	90.74808	99.77462

19	96.82885	96.03077	95.91269
20	100	92.26731	99.96769
21	97.38269	97.33462	97.95615
22	99.83923	91.70692	99.95038
23	97.39692	96.86308	96.57
24	94.24269	95.78615	93.06577

6.5 הוראות לנבדק

אברהם טל ליבוביץ

הערה כללית

אתה משתתף במחקר במדעי המוח, הבודק למידה של תפיסה ראייתית ותנועה. הביצועים הטבעיים שלך חשובים למחקר. אין תנועות "שגויות" אך אתה מתבקש להתרכז בכל תרגיל, ולבצע את המשימה כמיטב יכולתך לפי ההנחיות הבאות.

רכיבי המשחק

- אתה שולט בעיגול לבן באמצעות גיויסטיק (האחד השמאלי בשלט).
- המטרה שלך היא להזיז את העיגול הלבן (שיש לך שליטה עליו) מנקודת ההתחלה שלו, עד לעיגול האדום במסך למעלה, בתנועה **רציפה**, ישירה ו**מהירה**.
- בשלב הראשון נבצע אימון הסתגלות במערך הניסוי, בסיומו דווח אם אתה מבין את המשימה.
- בשלב השני נמדוד את רמת ההצלחה שלך במהלך בביצוע 24 תרגילים.

סימוני הצלחה ואי-הצלחה

תרגיל מוצלח : המטרה תפעם בצבע אדום ויישמע צליל הצלחה.

אי הצלחה בתרגיל : העיגול הלבן יפעם בצבע אדום ויישמע צליל כישלון.

במהלך התרגיל, בבקשה אל תשחרר את הג'ויסטיק.

בסיום כל תרגיל, העיגול הלבן יועבר לנקודת התחלה חדשה ויתחיל סיבוב חדש.

בסיום כל תרגיל אתה מתבקש לעזוב את הג'ויסטיק, להמתין עד שהג'ויסטיק יחזור לאמצע והעיגול הלבן יוחזר לנקודת התחלה.

רצוי שתמשיך מיד לתרגיל הבא, אך מותר לנוח 2-3 שניות אם התעייפת.

הערות חשובות

- הג'ויסטיק מחובר לשולחן, בבקשה אל תזיז את הג'ויסטיק ממקומו.
- אפשר לעצור בכל רגע.

מוכן להתחיל?

6.6 נקודות התחלה

נקודות התחלה אלו היו קבועות בין כל סוגי שליטה וכל המשתתפים. זאת על מנת למזער שינויים בין משתתפים והשפעת נקודות ההתחלה על דפוסי הלמידה.

,StartPosition.Right
,StartPosition.Center
,StartPosition.Left
,StartPosition.Left
,StartPosition.Right

,StartPosition.Center
,StartPosition.Center
,StartPosition.Left
,StartPosition.Right
,StartPosition.Left
,StartPosition.Center
,StartPosition.Right
,StartPosition.Center
,StartPosition.Right
,StartPosition.Left
,StartPosition.Right
,StartPosition.Left
,StartPosition.Center
,StartPosition.Right
,StartPosition.Center
,StartPosition.Left
,StartPosition.Center
,StartPosition.Right
StartPosition.Left

6.7. קישור לנתוני קוד

6.7.1. קוד לסיבוב ונירמול מסלולים גרפיים באמצעות מטריצה סיבובית

העברנו את נתוני המסלולים דרך מטריצה סיבובית, במטרה לנטרל את ההשפעה שנובעת מהבדלים בציר X ובציר Y בין נקודות ההתחלה השונות. אם לא היינו מנרמלים את נקודת ההתחלה, כל שינוי במסלולים שמקורם בנקודות התחלה שונות היה נובע פשוט ממיקום התחלתי שונה באופן דרמטי, ולא משינוי אמיתי במסלול עצמו.

קישור ל-PDF לקוד :

<https://drive.google.com/file/d/1V-6fkWf3S3f9qrFdRn5CaHJO5es7UB/view?usp=sharing>

6.7.2. על תהליך יצירת גרפי המסלול

בשביל העבודה, הייתי צריך דרך להציג גרפים של ממוצעי מסלולים מסוימים, על מנת לראות את המסלול הכללי שננקט על ידי כל המשתתפים, מבלי להיות מושפע מהשינויים החריגים שקיימים אצל משתתפים בודדים.

עם זאת, בשל גודל הנתונים (כ־370,000 שורות ו־8 עמודות של נקודות מנורמלות), ובשל הקושי לחשב את הממוצעים של כל הנקודות עבור כל מסלול, לא הצלחתי לבצע זאת באותו אופן שבו יצרתי את שאר הגרפים (כמו SEETS ואחרים).

לכן, במקום זאת, פיתחתי אפליקציה שמחשבת את הממוצע של כל המסלולים שרציתי להציג (המסלול הממוצע) ומציגה אותו כגרף. (ראה גרפים 3.14–3.16 וגרפים 3.3–3.5).

הקוד לאפליקציה :

https://drive.google.com/file/d/1Lz0pglNhr2xhYsV_eSgPEWvS97DIZRJC/view?usp=sharing

6.7.3. אינטרפולציה (נירמול המסלולים ל-100 נקודות)

הערת הבהרה לגבי קבצי העיבוד `aggregate_paths.py` ו־`process_all_csv.py` :

שני קבצים אלו משמשים לעיבוד נתוני מסלולים מקובצי CSV שנשמרו עבור משתתפי הניסוי, אך נועדו למטרות מעט שונות.

- הקובץ `aggregate_paths.py` שימש ליצירת קובץ מאוחד אחד המכיל את כלל המסלולים מכל המשתתפים והניסיונות. קובץ זה שימש לניתוחים הגרפיים והסטטיסטיים שהוצגו בפרקי התוצאות (למשל : גרפים של מסלולים ממוצעים, השוואות בין סוגי שליטה וכיווני התחלה). זהו הקובץ שמוצג בנספח זה.

- לעומתו, הקובץ `process_all_csv.py` מאפשר לבצע עיבוד דומה אך גם שומר קובץ נפרד לכל משתתף, ובנוסף מפיץ שני קבצי תוצאה שונים – אחד לנתונים גולמיים (raw) ואחד לנתונים מנורמלים. קובץ זה שימושי יותר לשלבי פיתוח, בקרה והשוואה נקודתית בין משתתפים.

שני הקבצים כוללים לוגיקת נירמול זהה ואינטרפולציה ל-100 נקודות, אך הקובץ שבנספח משקף במדויק את תהליך העיבוד ששימש בפועל ליצירת מסד הנתונים לניתוח.

קישור לסקריפט:

<https://drive.google.com/file/d/1tVit0cG22GtpWX7pLQfHSC7Rlzh4mZs/view?usp=sharing>

6.8. קישור לנתונים מספריים

6.8.1. מסלולי משתתפים מנורמלים ומקוריים (100 נקודות למסלול)

זה קובץ גדול עם כל נתוני המסלול (אחרי שהעברנו אותם אינטרפולציה, כמפורט בתת פרק 6.7.3). בקובץ יש גם נתוני המסלול המקוריים (שלא עברו מטרצה סיבובית) וגם נתוני המסלול שעברו מטרצה (כמפורט בתת פרק 6.7.1).

קישור לנתונים:

<https://drive.google.com/file/d/1C2Jc3XW2g9DfCN7BxDEoTE6r5w96yyGJ/view?usp=sharing>

6.8.2. יעילות המסלול, זמן השלמת המשימה ונתוני משתתפים

קובץ זה כולל את כל הנתונים שאספתי מהמשתתפים, כולל העדפות אישיות, הערות, זמן השלמת המשימה, יעילות המסלול שנלקח, המסלול עצמו (לפני שעברו אינטרפולציה) ועוד. שמות המשתתפים בקובץ זה הושחרו מטעמי פרטיות.

קישור לנתונים:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/147IGYHun8mwDpjPmIf2w0F0CMSmbO6Mo67Zl0SMBQGI/edit?usp=sharing>

6.9 נספח פרומפטים לדוגמה

6.9.1 פרומפט ליצירת קוד

היי, אתה מומחה בפיתוח ויזואליזציות נתונים ומערכות אנליטיות, ואתה כאן לעזור לי עם פרויקט אדפטציה מוטורית.
הפרויקט:

- מדידת תנועות מוטוריות של 26 משתתפים
 - 3 סוגי שליטה (רגילה, מסובבת 25/35 מעלות, רגילה חוזרת)
 - 24 ניסיונות בכל סוג שליטה
 - הנתונים כוללים: קואורדינטות X, Y, זמני ביצוע, ויעילות תנועה
- הקיים כרגע:
- תיקייה לכל משתתף
- בכל תיקייה:
- קבצי CSV עם נתוני מסלול (מנורמלים ולא מנורמלים)
 - נתוני זמן וביצועים
 - כל קובץ מכיל עמודות X, Y, TimeStep
 - הנתונים מאורגנים בשורות עם ~50-40 נקודות למסלול
- מטרות:

1. הצגת מסלולי התנועה
2. חישוב והצגת מסלולים ממוצעים
3. (בנוסף) ניתוח זמני ביצוע ויעילות

אילוצי זמן:

- 3 ימי עבודה לסיום
- עדיפות לפתרון פשוט ועובד על פני מערכת מורכבת

אופן הלמידה המועדף עליי :

- לומד דרך התנסות ותיקון טעויות
- מעדיף פתרונות צעד אחר צעד
- אוהב לראות תוצאות מהירות ולשפר בהדרגה
- מתמודד היטב עם אתגרי שפה בעברית

התפקיד שלך :

1. להנחות ולכוון בצורה מקצועית אך מותאמת
 2. לעזור בפתרון בעיות טכניות תוך הסבר ברור
 3. לתת משוב בונה ולעודד חשיבה עצמאית
 4. להציע פתרונות יעילים שמתאימים למסגרת הזמן
- אשמח שנתחיל עם הצעה לפתרון בסיסי שנוכל לפתח בהדרגה.

6.9.2. פרומפט ליצירת פרומפט לעזרה בניתוח הנתונים

אני צריך עזרה בליצור פרומפט טוב ומובן להצגה וניתוח נתוני X ו-Y של נתונים מניסוי שאני מייצר. אתה מומחה בקידוד וניתוח נתונים. אני תלמיד בכיתה יא שעובד על עבודה בתחום מדעי המוח, הנה תיאור של הניסוי שלי.

אנו נבצע ניסוי אדפטציה סנסורית מוטורית : visuo-motor rotation. זאת אומרת שנראה כיצד האדם משנה את התנהגותו בתגובה לשינוי ברוטציה של תזוזת אובייקט כלשהו. לפני תחילת הניסוי המשתתף ממלא חלק מסמך forms שנעריך לגבי תפקידו מאוחר יותר בפרק. בתחילת הניסוי הנבדק יקרא בקצב שנוח לו הוראות למהלך הניסוי. (ההוראות נמצאות בנספח). כל משתתף קורא את אותם ההוראות בדיוק. הכלי המרכזי במחקר הוא משחק מחשב שבו המשתתף שולט בעיגול לבן באמצעות ג'ויסטיק. מטרת המשחק פשוטה - להזיז את העיגול הלבן מנקודת ההתחלה אל עיגול אדום המשמש כמטרה במרכז המסך. נקודת ההתחלה משתנה בין שלוש אפשרויות : 45 מעלות ימינה מהמטרה, ישירות מתחת למטרה, או 45 מעלות שמאלה, כולן במרחק קבוע של 8 יחידות מהמטרה. חוקי בסיס : הנבדק שולט בעיגול בשליטה רגילה (360 מעלות של שליטה בדמות) הנבדק שולט בעיגול הלבן באמצעות ג'ויסטיק. צריך להזיז את העיגול הלבן מנקודת ההתחלה (יפורט בהמשך) למטרה (עיגול אדום במרכז המסך) המיקום ההתחלתי משתנה בין 3 נקודות אפשריות על רדיוס של 8 מהמטרה. (נקודת התחלה א- 45 מעלות ימינה, נקודת התחלה ב- ישר מתחת למטרה ונקודת התחלה ג- 45 מעלות שמאלה)

תמונה 1 : נקודות התחלה- משמואל, נקודת התחלה שמאלית, נקודת התחלה עצמאית, נקודות התחלה ימנית :

הצלחה : הגעה למטרה בפחות מ-2.5 שניות.
 יושמע צליל הצלחה, והמטרה תיפגע.
 איי-הצלחה : הגעה לעיגול תוך שתיים וחצי שניות או יותר.
 יושמע צליל של אי-הצלחה, והעיגול הלבן ירעד בצבע אדום.
 הכנה למשחק :

נאפשר לנבדק לנסות כמה פעמים להגיע למטרה, לפני תחילת הניסוי עצמו (סיבוב ניסיון). זאת על מנת שבתחילת הניסוי עצמו, היה לו היכרות עם התהליך.
 שלב ראשון-שליטה רגילה :

הנבדק שולט על הדמות באמצעות שליטה רגילה של 360 מעלות.
 נדרשים 24 ניסיונות מוצלחים של הגעה למטרה, על מנת לעבור לחלק השני של הניסוי.
 שלב שני - שליטה מסובבת :

אחרי שלב ראשון (24 הגעות למטרה בפחות מ-2.5 שניות)
 השליטה מתחלפת ל-35 מעלות שמאלה, או ימינה (יפורט בהמשך הסיבה לכיוונים השונים).
 נדרשים 24 ניסיונות מוצלחים במצב שינוי השליטה על מנת לעבור לחלק האחרון בניסוי.
 שלב שלישי- חזרה לשליטה רגילה :

חזרה לשליטה רגילה (360 מעלות)
 נדרשים 24 ניסיונות מוצלחים נוספים עם שליטה רגילה על מנת לגמור את הניסוי.
 הגבלות :

העיגול הלבן אינו יכול לחרוג מגבולות המסך.
 בשביל ניסיון מוצלח חובה להגיע למטרה תוך 2.5 שניות.
 המשחק אינו מחשיב ניסיון לא מוצלח (יותר מ-2.5 שניות) ב-24 ניסיונות של הנבדק בכל סוג שליטה, במקום חוזר לניסיון הקודם, והמשתתף ינסה שוב עד שיהיה לו ניסיון מוצלח בסיבוב זה.
 חובה להשלים 24 ניסיונות מוצלחים בכל שלב.
 נתונים נאספים :

זמני הגעה למטרה בכל אחד מהניסיונות. (ממתי שהמשתתף התחיל להזיז את הדמות, עד להגעה למטרה)
 תמונה 2 : משתתף מספר 25. אופן הצגת הזמנים במסך המשחק :

מסלול התנועה מקוריים. (בודקים את המיקום של הדמות כל 0.033 שניות)
 קצב הדגימה של 0.033 שניות (כ-30 פעמים בשנייה) נבחר כדי לתעד שינויים משמעותיים בתנועת המשתתף.
 מאחר שזמן התגובה המינימלי לגירוי חזותי הוא כ-0.2 שניות, דגימה בקצב מהיר פי 6 מאפשרת ניתוח לא רק של ההחלטות הסופיות אלא גם של תהליך קבלת ההחלטות המוטוריות.
 מסלולי תנועה מנורמלים.
 המסלולים המקוריים, אחרי שעברו מטריצת סיבוב (הקוד נמצא בנספח). זאת על מנת להציג את המידע באופן אינטואיטיבי יותר.

תמונה 3 : הצגת המסלולים המנורמלים במסך המשחק של משתתף מספר 26. למלה משמואל רואים את היעילות הממוצעת של כל סוג שליטה. הכפתורים מצד שמאל הם (מלמעלה) הצגת המסלולים משליטה הראשונה. הצגת המסלולים משליטה מסובבת. הצגת המסלולים משליטה רגילה שניה. הצגת כל המסלולים. הצגת המסלולים שמתחילים מנקודת ההתחלה הימנית, האמצעית והשמאלית. הוצאת כל המידע בקובץ CSV. סצנה הבה (הצגת היעילות). הדלקת או החבאת מיספרי הניסיון מעל כל מסלול.

תמונה 4 : הצגת המסלולים מהשליטה הראשונה אצל משתתף מספר 26.
 תמונה 5 : הצגת המסלולים המסובבת אצל משתתף מספר 26.
 תמונה 6 : הצגת המסלולים מהשליטה הרגילה השנייה אצל משתתף מספר 26.
 ניסיונות כושלים.
 יעילות המסלול (בהשוואה למסלול ישיר).
 השוואה למסלול ישיר כמדד ליעילות מועילה מכמה סיבות :

מודדת באופן אובייקטיבי את דיוק התנועה – מסלול קרוב לקו ישר מעיד על יעילות גבוהה יותר.

מאפשרת השוואה בין משתתפים וניסיונות שונים.
מספקת מדד לשליטה מוטורית – ככל שהמשתתף משתפר, תנועתו מתקרבת למסלול הישר האידיאלי.
תמונה 3 : משתתף מספר 25. אופן הצגת היעילות במסך המשחק :

סטטיסטיקות מוצגות :
יעילות ממוצעת לכל שלב (יעילות המסלולים של הנבדק, לעומת מסלול ישר)
זמנים ממוצעים.
אחוזי הצלחה (כמה ניסיונות כושלים היו).
השוואה ויזואלית בין המסלולים.
מגמת עלייה או ירידה של כל סוג שליטה.

זה מבנה הניסוי, אני רוצה לנתח ולהציג את המסלולים.
איזה עוד מידע אתה צריך ממני בשביל שתוכל ליצור פרומפט טוב?

6.9.3. מבנה של פרומפט לעזרה בניסוח פסקאות

אני תלמיד כיתה י"ב העובד על עבודת גמר (מאמר מדעי) בנושא מדעי המוח. אני מספק לך שני חלקים :

הקטע המקורי : הטקסט כפי שכתבתי.
הערות והכוונות לשיפור : פירוט ההערות וההנחיות לשיפור הטקסט.
המטרה שלך היא לכתוב את הטקסט המקורי כך שיהיה :
ברור, קוהרנטי ומקצועי יותר,
בעל ניסוח מדויק, תוך שמירה על סגנון הכתיבה והפורמט המקורי,
ללא שינוי מהותי בתוכן או במידע המקורי,
עם התייחסות לכל ההערות וההנחיות שנמסרו.
אנא שחק את תפקידו של עורך לשוני ומומחה בתחום המחקר, ועזור לי לשפר את הטקסט ככל האפשר תוך
שמירה על כל הפרטים החשובים. כמו כן, אם יש לך הצעות לשיפור נוספות שיכולות להעצים את בהירות
המידע והדיוק המדעי, אנא כלול אותן תוך שמירה על נאמנות לטקסט המקורי.

"הוספת הפיסקה בעלת צורך בעבודה נוספת"