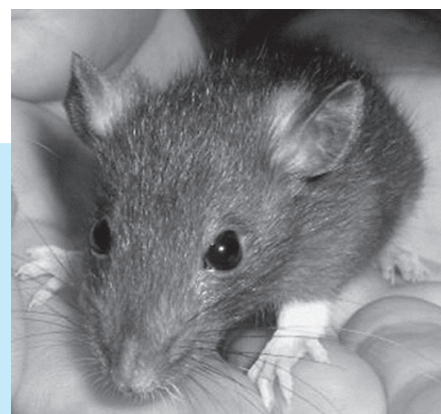




אריה ים, צילם פרופ' בני שילה.
מתוך "חושים וחיישנים" פיונטקביץ, קדם, ירדן, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע.

חוש המישוש כתחליף לראייה

ורדה שילה ואבי סאייג



התמרה חושית בחולדות

פרופ' אהוד אחישר מהמחלקה לניורוביולוגיה במכון ויצמן למדע וחוקרים בקבוצת המחקר שלו, מתמקדים בחוש המישוש של חולדות, ואגב כך בוחנים גם את חוש המישוש של בני האדם. חוש זה מתבטא אצל החולדות בעיקר בשימוש בשערות השפם כאשר הן חוקרות את סביבתן. שערות השפם של החולדה הן איברי-חישה מפותחים. כדי לבחון את סביבתה, החולדה מניעה אותן במהירות הלך-ושוב על פני חפצים בסביבתה.

בעלי חיים רבים המשתייכים למחלקת היונקים הם בעלי זיפי-חישה (שערות חישה). חישת תנודות, כמו תנועות אוויר או מים, נעשית באמצעות שערות החישה והחיישנים המצויים בבסיסן. הזיפים מצויים במקומות שונים על פני הגוף ובולטים בעיקר ב"שפם" שבשטח הפנים. את בסיס שערת החישה עוטפים קצות עצבים. כאשר השערה נתקלת בעצמים שונים, תנועתה נעצרת או מואטת. השינוי בתנועה זו מועבר באופן מכני אל קצות תאי-העצב ומומר על ידם לאות חשמלי המועבר למוח. שערות חישה אלה חשובות בעיקר לבעלי-חיים המתקיימים במקומות אפלים כגון מחילות או מים עכורים, ובעזרתן הם מנווטים את דרכם ומאתרים חפצים גם ללא שימוש בחוש הראייה. מתוצאות המחקר מתברר שכדי למקם חפצים במרחב התלת-ממדי, משתמשות החולדות בשלושה סוגי צפנים עצביים שונים. החולדה בוחנת באמצעות שערות השפם את שלושת הממדים של העצמים שהיא נתקלת בהם: האופקי (קדימה - אחורה), האנכי (גובה) והמוקדי (המרחק בין החפץ לבסיס השערה). 'ממצאי' השערות מועברים למוח, המנתח ומעבד את הנתונים ומסיק מסקנות באשר לאופיים, לצורתם ולמיקומם של החפצים שבסביבת החולדה. כיצד בדיוק מתבצע תהליך עיבוד-מידע כזה? תלמיד המחקר מרצין שווד, עמיתת המחקר ד"ר קנאריק בגדסריאן ופרופ' אחישר מצאו שתהליך הצפנת המידע בכל אחד משלושת-ממדי העצמים הנבחנים מבוסס על משתנה עצבי ייחודי. לדוגמה, כדי לחוש את **הממד האופקי**, המוח צריך לפענח את התזמון המדויק של האותות העצביים. תזמון אותות אלה ביחס לתנועת השערה מקודד את מיקום העצם הנבחן. **הממד המוקדי** (המרחק בין החפץ לבין בסיס השערה), לעומת זאת, מקודד על ידי עצמת הפעילות העצבית. ככל שהחפץ הנבחן קרוב יותר לבסיס השערה, תאי-העצב משגרים אותות רבים יותר. **גובה החפץ**, מקודד באמצעות הפרופיל המרחבי של תאי-העצב הפעילים. המדענים גילו גם כי כל אחד מתאי-העצב שבבסיס שערות השפם של החולדה מתמחה בשיטת קידוד שונה. כעת מתכוונים החוקרים לברר, כיצד מעבד המוח את הנתונים של שלושת הממדים ויוצר מיפוי תלת-ממדי של העצמים בסביבתה של החולדה.

על בסיס הממצאים בחולדות, חוקר אבי סאייג בעבודת הדוקטורט שלו את נושא **ההתמרה החושית** בבני אדם, ובמאמר זה נתרכז במחקרו. כוונת המחקר היא לאפשר תיאור עקרונות מנחים לתהליך זה, ובעזרתם לתכנן ולבנות מכשירים שיתמירו מידע ראייתי לגירוי של **חוש המישוש** על מנת לשמש כתחליף-ראייה. אחד העקרונות הניצבים בבסיס המחקר בנושא תחליפי ראייה, הוא שיונקים "רואים במוחם" ולא בעיניהם. המראות הנגלים לעינינו מגיעים אל המוח כאותות עצביים חשמליים, ושם הם מפוענחים ומתפרשים למידע ראייתי. כל תמונה שאנו רואים ממשיכה כדמות אופטית רק עד לרישתית (רטינה) העין. בהמשך, המידע מועבר אל המוח באמצעות קוד עצבי. כיוון שאנו "רואים באמצעות המוח", ניתן תאורטית לספק למוח מידע ראייתי שלא באמצעות העין, אלא באמצעות שילוב של גלאי אופטי. גלאי אופטי מחליף את העין, כמו מצלמה, עם מכשיר הממיר מידע אופטי למידע חושי אחר, כמו מידע מישושי, שמגיע אל המוח.

ורדה שילה ואבי סאייג, מקבוצת המחקר של פרופ' אהוד אחישר, המחלקה לניורוביולוגיה, מכון ויצמן למדע, רחובות



שלא יפריעו לקליטת המידע האופטי על ידי קולטני האור. באמצע רשתית עין-האדם, על הציר-האופטי של העין, מצוי 'הכתם הצהוב' (Lutea macula) שקוטרו כ-12 מ"מ ובו מרוכזים רוב תאי-המדוכים (Cones). במרכז הכתם הצהוב מצויה הגומה-המרכזית (Fovea centralis) הזעירה, שמצויים בה רק תאי-מדוכים.

* **חישה פעילה** (Active sensing): הנעה מתמדת של איבר-החוש כדי לדגום את הסביבה. לדוגמה: הזזת ידיים בזמן מישוש משטח כדי לחוש אם המרקם שלו חלק או מחוספס.

* **תאי הקנה** (Rods): ברשתית העין יש כ-120 מיליון תאי חוש המכונים קנים. אלו תאים ארוכים ודקים המגיבים לעוצמות אור נמוכות ופועלים בעיקר בלילה. הם נמצאים בעיקר בהיקף הרשתית ופחות במרכזה. תאים אלה אינם רגישים לצבע, ונדרש מהם זמן רב - עד עשרות דקות - להתרגל לשינויים בעוצמת האור.

* **תאי המדוכים** (Cones): המדוכים הם תאי חוש הרגישים לצבע (אורך גל) של האור; חדות הראייה תלויה בצפיפותם ורגישותם של תאים אלו. הם נמצאים רק במרכז הרשתית (המכונה Fovea) שם יש כ-6 מיליון 'מדוכים'. אלו תאים קצרים ושמנים, מגיבים לעוצמות אור גבוהות, מאפשרים ראית צבע ופעילים ביום. תאי המדוכים נחלקים לשלושה סוגים. כל אחד מסוגי המדוכים רגיש לאחד משלושת צבעי היסוד: אדום, כחול וירוק, ולפיכך כולם יחד מסוגלים לייצג כל צבע. מספר דיסקות הצבענים בתאי-המדוכים קטן מזה שבתאי הקנה, ולכן כמות הצבען בכל תא קטנה יותר, ורגישות-המדוכים לאור נמוכה יותר: הם מתפקדים רק באור חזק, אור-יום, או בתאורה מלאכותית.

* **התמרה חושית** (Sensory substitution): שימוש במסלול חושי אלטרנטיבי לקבלת מידע מהסביבה שבדרך כלל מתקבל באמצעותו של חוש אחר. לדוגמה: שימוש בחוש המישוש כתחליף לחוש הראייה.

* **החצנה** (Externalisation): תופעה הקשורה לפענוח חושי המתבטאת בכך שהנדבקים משייכים את המידע שנקלט בחוש מסוים לכזה שמגיע ממקור חיצוני. בחוש הראייה מתרחשת החצנה (אקסטרנליזציה) באופן תמידי: למרות שהדמויות מוקרנות ונקלטות ברשתית העין, ושם מצויים קולטני האור, אנו מפענחים את מיקומן במרחב החיצוני.

* **פלסטיות המוח** (Brain plasticity): שינויים תכופים במוח המיועדים לשפר את תפקודו. זוהי דרכו של המוח ללמידת מיומנויות חדשות. עוצמתם של החיבורים בין תאי עצב במוח משתנה במהלך תהליך הפלסטיות.

* **תוספת חושית** (Sensory Augmentation): קליטת מידע מגורם סביבתי שבאופן טבעי אינו בר-קליטה על ידי החושים, לדוגמה: חישת השדה המגנטי של כדור-הארץ.

* **קיבולת הערוץ** (Channel Capacity): כמות המידע המקסימלית המסוגלת לעבוד דרך ערוץ להעברת תקשורת. בחוש הראייה והמישוש קיבולת הערוץ מורכבת מקיבולת זמן - כמות האותות שמסוגלת לעבור בקו מסוים במשך שנייה, ומקיבולת מרחבית - כמות המידע המרחבי שיכולה לעבור בערוץ בו-זמנית (רזולוציה).

* **הגומה-המרכזית בעין** (Fovea): אזור קטן ברישתית העין, שגופי תאי-העצב שמסביבו מוסטים הצדה, כך

רקע לבן, הופעלו רק הרטטים שבשטח השחור. הנבדק שישב על הכיסא, חש על גבו אזור רטט רבוע.

בתחילת הניסויים מצלמת הווידאו הייתה מקובעת במקומה, והנבדקים (עיוורים, או רואים בכיסוי עיניים) הצליחו להבחין בצורות באופן מעורפל ומוגבל. אולם כאשר ניתנה לנבדקים אפשרות להזיז את המצלמה (=חישה אקטיבית), הם פיתחו יכולות אבחנה מדהימות:

בשלב הראשון הצליחו הנבדקים לקשר בין תנועותיהם לבין שינויים בתחושה: כאשר הזיזו את המצלמה מימין לשמאל, גם הגירוי על עורם זז מימין לשמאל; כאשר שינו את מידת ההגדלה (zoom) במצלמה - התמונה התרחבה וכו'.

במשך הזמן הצליחו הנבדקים לזהות קווים בזוויות שונות במרחב, ולאחר אימון נוסף הצליחו לזהות הרכבי קווים שונים וצורות גאומטריות.

לאחר אימון ממושך יותר הצליחו הנבדקים להבדיל בין תמונות של אביזרים מוכרים (טלפון, כוס או כיסא), ולאחר כ-30 שעות אימון הצליחו אף להבדיל בין אנשים שונים. תמונה 1 מציגה תמונות הבנויות מ-400 פיקסלים. ברור מהתמונה כי ניתן להבחין בין העצמים המצולמים.



תמונה 1: תמונות של פנים (ימין) וטלפון (שמאל) שנקלטו על ידי מצלמת TVSS ועובדו לתמונה בת 400 פיקסל.

במשך שיעורי-האימון התבררו לנבדקים העיוורים מושגים מתחום הראייה שלא היו מוכרים להם, כמו 'פרספקטיבה', 'צל' או 'עיוות-צורה' התלויים בזווית-ראייה, בשינוי גודל-נראה ובמרחק.

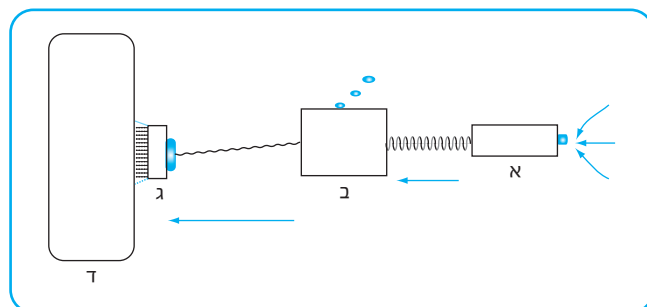
לאחר כעשרים שעות אימון במערכת ההתמרה החושית, פיתחו הנבדקים תחושת 'החצנה'. הם העידו על הרגשתם שלפיה המידע החושי נמצא כביכול 'לפני-המצלמה' ולא באזור הגב שלהם, שעליו מוקמו הרטטים. כלומר, המידע זוהה כמגיע מעצמים חיצוניים מרוחקים, שאותם צילמה המצלמה. נראה שתחושת ה'החצנה' הייתה מלאה, שכן,

מערכת ההתמרה החושית מורכבת משלושה רכיבים עיקריים (תרשים 1):

* חישן - קולט משתנים סביבתיים (אור, קול או תנועה) וממיר אותם לאותות מסוג אחר.

* מערכת צימוד (חשמלית בדרך כלל).

* גריין - (סטימולטור) - מגרה חיישנים תאיים שונים על ידי הפיכת אנרגיה חשמלית לצורות אנרגיה אחרות כמו קול או תנועה.



תרשים 1: סכמה של מערכת התמרה חושית - (א) חישן, הקולט ממד סביבתי מסוים, ושולח מידע למערכת צימוד (ב) המעבדת את המידע שהגיע מהחישן לאות הפעלה של הגריין (ג) וזה, בתורו, מגרה קולטנים בגוף האדם (ד) במערכת התמרה חושית, הקולטנים המופעלים על ידי הסטימולטור (גריין), הם מסוג שונה מאלה שהיו אמורים להיות באופן טבעי על ידי המימד הסביבתי שנקלט (למשל קולטני חוש מישוש בעור קולטים מידע אופטי) החיצים בציר מציינים את כיוון זרימת המידע - מהסביבה שמחוץ לחישן ועד לאיבר.

אחד מ'אבות' תחום ההתמרה החושית הוא פרופ' פול באך-אי-ריטה (Bach-Y-Rita) מארה"ב. בשנת 1969 הוא בנה מערכת התמרה חושית ראשונה מסוגה וטבע את המונח. במערכת הראשונה שנבנתה, שכונתה TVSS (Tactile-Vision-Substitution-System), נעשה שימוש במצלמת וידאו אשר שימשה כגלאי חלופי לעין האנושית. המערכת פעלה בדרך זו: התמונה שהתקבלה באמצעות מצלמת הווידאו עברה עיבוד - חלוקה למטריצה של 20 שורות X 20 עמודות, סה"כ 400 פיקסלים. מערכת העיבוד חוברה גם למטריצה של 400 רטטים (ויברטורים), המסודרים במרחב בדומה לפיקסלים שבתמונת הווידאו. מערך הרטטים מוקם על משענת-כיסא. מידת הכחות של כל פיקסל בתמונת הווידאו קבעה אם הרטט המתאים לו ינוע. לדוגמה, אם מצלמת הווידאו צילמה ריבוע שחור על

כאשר הגדילו לנבדקים את 'זום' המצלמה באופן פתאומי, בלי לידע אותם על כך, הם נטו להרים את היד כדי להגן על גופם. כלומר, הם חשו כאילו עצם מרוחק מתקרב אליהם במהירות (ללא 'החצנה' – הגירויים היו נתפסים רק כגירוי גבי המשנה את שטחו, ולא היה מתעורר בהם הדחף להרים את היד לצורך הגנה על הגוף).

**כהערת אגב נציין, שלמרות הצלחתה של המערכת, היא מעולם לא עברה מהשלב הניסויי לשלב המסחרי, עקב קשיים במזעורה לשימוש יומיומי ומשום שעיוורים שהשתמשו במערכת התאכזבו ממנה לאחר זמן-מה, שכן לא סיפקה להם את חוויית הראייה שה'רואים' מדברים עליה. כיום, במסגרת מחקר המתבצע ביפן, יש ניסיון מחודש למזעור המערכת לגודל של משקפיים בשילוב עם סרט שיער, והגירוי לעור נעשה בצורה חשמלית. ניתן לראות את המערכת באתר האינטרנט שכתובתו:

<http://www.eyepius2.com/FRSIndex.html>

חשיבות התנועה לצורך יצירת תפיסה ראייתית

תפיסת עולם שנוצרת במוחו של מישהו, היא תוצאה של שילוב **מידע שנאסף** באמצעות חיישנים עם **מידע-מוחי על בקרת-התנועה**.

ממצאי מחקרים מצביעים על כך שנבדקים בונים לעצמם חוקי הקשר בין התנועות לתחושות, כלומר, הם בונים חוקים המסבירים איך משתנה המידע החושי כאשר החישן מוזז בכיוון מסוים. המוח בונה עבור כל חוש חוקי הקשר ייחודיים. לפיכך עושר התחושה תלוי במאפייני התנועה והחישה. בהתאם לכך, אם נספק למוח את המידע הדרוש לבניית חוקי הקשר ראייתיים – אפילו אם המידע מגיע בחלקו דרך חוש אחר – המוח יפענח את המידע כראייתו. מכיוון שחוקי ההקשר הינם תנועתיים-חושיים, דרושה תנועה מתמדת של הגלאי, גם בהתמרה חושית אבל גם בעין עצמה. רבים אינם יודעים זאת, אך אפילו בזמן שאנו מסתכלים על אזור מסוים, העין זזה ללא הרף בתנועות זערורות ובלתי נראות. אם מצליחים לעצור תנועות אלה, התמונה מתפוגגת ונעלמת.

יש חוקרים הטוענים שהצורך בפעילות תנועתית במערכת

התמרה חושית, נובע דווקא מטבעו הפעיל של חוש המישוש. ידוע שתנועותיות היד והאצבע נחוצה לתפיסה מישושית. עוד ידוע כי נבדקים החווים גירוי מישושי פסיבי, נוטים לתאר את תחושתם במונחי תחושה מישושית (חלק, מחוספס...) בעוד חקירה מישושית פעילה, מביאה בעקבותיה תיאורי עצמים (כדור, מכונת...) אולם ידוע לנו כי חישה פעילה נחוצה גם במערכות להתמרת ראייה בשמיעה, למרות שבשמיעה אין צורך בתנועה. ניתן לסכם ולומר, כי הצורך בחישה פעילה איננו ייחודי לחוש המישוש, אלא נובע מצרכי המוח בעת עיבוד מידע ראייתו.

סיבה נוספת לכך שנחוצה לנו שחישה-פעילה ראייתית, נעוצה בעובדה שתנועה היא חלק מתפיסה ראייתית. באמצעות התנועה מתקבל מידע בנושא זמן. מוחנו משתמש **במידע על הזמן והמרחב** לבניית ייצוג-פנימי של המרחב. איברי החישה (עין, יד, מוח) חייבים לנוע כל הזמן על מנת לספק מידע זה.

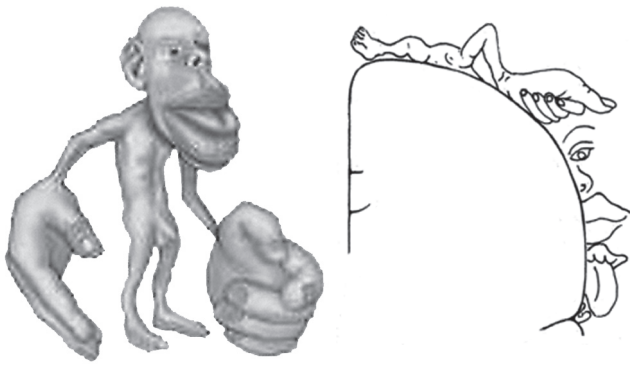
מחקרים פיזיו-אנטומיים של החיבור ושל האינטגרציה החושית-תנועתית מראים כי פעילות מוטורית משפיעה על המידע החושי שמועבר אל המוח באמצעות חוש-המישוש. קליפת המוח המוטורית פועלת כמאפן (מודולטור) של מסרים חושיים.

התמרת ראייה באמצעות חוש המישוש – מנקודת מבט חישובית

כדי לבדוק את מידת הייתכנות של התמרת ראייה על ידי מישוש, נסקור כאן בקצרה מספר נתונים פיזיו-אנטומיים בנושא העין וחוש המישוש שבעור:

* הרשתית (רטינה) בעין האדם מכילה 125 מיליון תאי חישה בשטח של 1,100 ממ"ר. למרות זאת, ראייה חדה ומבחינה אפשרית רק בחלק קטן משדה הראייה הקרוי 'הגומה-המרכזית'. אנו מזיזים את העיניים כל הזמן, כדי שהמראות שמעניינים אותנו יוקרנו ישירות אל תאי החישה שב'גומה המרכזית'.

* האזור המרכזי בשטח הפוביה, שבו מצויים רק תאי-המדוכים, מהווה 1⁰ מזווית הראייה. הצפיפות הממוצעת הגבוהה ביותר במרכז הפוביה היא 161,900 תאים



תרשים 2: הומונוקולוס - Homunculus

דיאגרמה המציגה את השטח היחסי, אותו מייצגים איברים שונים, באזור-המוח המייצג את חוש המישוש. שימו לב: **אצבעות כף-היד** תופסות שטח גדול יותר מהשטח האחראי לתחושות הרגל כולה, ואילו **השפתיים והלשון** תופסים שטח גדול יותר מזה האחראי לשאר חלקי הפנים.

(Magee and Kennedy, 1980) בדקו רמת זיהוי של תבליטים: רישומים בעלי קווי מתאר בולטים במרחב. באחד הניסויים הם מנעו מהנבדקים קליטה של מידע כלשהו באמצעות העור ואפשרו רק מידע קינסטטי (תנועתי): בקבוצת נבדקים זו, ה'**תנועתית**', הוזזה אצבעו של הנבדק באופן פסיבי לאורך קווי מתאר **שאינם מובלטים**. החוקר הנחה את הנבדקים על גבי קווי מתאר של ציור המצויר בעיפרון ומכוסה ביריעה פלסטית שקופה וחלקה. תוצאות הניסוי של נבדקי קבוצה זו הוששו לקבוצת נבדקים אחרת, '**עורית**', שמשתתפיה לא קיבלו גירוי קינסטטי כלשהו: אצבעו של כל נבדק הוחזקה במקום אחד, וקווי המתאר של התבליט הוזזו על ידי החוקר, מתחת לאצבע-הנבדק. התוצאות הראו שהקבוצה ה'**קינסטטית**' (תנועתי) הצליחה יותר בזיהוי הצורות מאשר הקבוצה ה'**עורית**'. הוכח שניתן לזהות צורות באמצעות מידע תנועתי בלבד.

מסקנתם של החוקרים הייתה שהיכולת לזהות תבליטים איננה מבוססת בעיקרה על מידע עורי, בניגוד למתרחש בקריאת כתב ברייל. במקרים אלה מתברר שהמידע העיקרי בחשיבותו הוא מיקום ותנועת הגפיים. כלומר, כדי לקבל הערכה נכונה של קיבולת הערוץ של חוש המישוש, יש לקחת בחשבון, בנוסף לערך הרזולוציה המרחבית וערך הזמן שצוינו קודם, גם 3 ערכים המייצגים את יכולת היד לנוע במרחב (תנועה בממד האנכי, האופקי והעומקי).

לממ"ר. כ-20,000 תאים משתתפים במקטע הרשתית האחראי לחדות-ראייה מרבית. *יכולת-הפרדה ראייתית בזמן: קצב תגובת תאי הקנה הוא אטי יחסית; תאי-הקנה אינם מסוגלים לעקוב אחר נצנוצי אור בקצב הגדול מכעשרה הרץ. תאי-המדוכים מגיבים מהר יותר, הם מסוגלים לעקוב אחר נצנוצי אור בקצב של עד קרוב למאה הרץ. סרטי קולנוע בנויים מ-24 תמונות בשנייה, עובדה שמצביעה על כך שבתנאים-ממוצעים, תפיסת הראייה מתעלמת מהתדרים הגבוהים ומוגבלת לתדרים נמוכים.

אברוני חוש המישוש בעור-האדם

שטח העור ביד אחת מכיל כ-17,000 יחידות מישוש (לא כולל חיישני כאב וטמפרטורה, שלהם אחראים חיישנים נפרדים). בדומה לראייה, גם לחוש המישוש יש מספר סוגי קולטנים, כל אחד אחראי להיבט אחר של חוש המישוש. נהוג לחלק את קולטני המישוש לארבעה סוגים: בעלי כושר הסתגלות אטי, בעלי כושר הסתגלות מהיר, בעלי שטח 'שדה רצפטיבי' (שטח העור שכל מגע של גירוי בתחומו מפעיל את יחידת המישוש) גדול ובעלי שטח 'שדה רצפטיבי' קטן. לכל חישן יש מאפיינים ייחודיים וטווח רגישות אופייני. בקצות האצבעות מרוכזים חיישנים רבים בצפיפות של עד 20 שדות חישה חופפים בכל נקודה.

בנוסף, חדות התפיסה המישושית של איזורים שונים בגוף, תלויה בשטחו של הקטע המעבד את המידע בקליפת המוח (תרשים 2).

חוש המישוש רגיש מאוד לרטט. ניתן להרגיש משהו שרוטט בתדר של 300 הרץ, גם אם משרעת התזוזה של הרטט היא מיקרון (מיקרון = אלפית המילימטר) אחד!

* מאחר שהעור, בדומה לרשתית שבעין, מכיל מערך קולטנים דו-ממדי, ניתן לומר שגם כאן קיבולת הערוץ מורכבת מיכולת הפרדה במרחב הדו-ממדי (x,y) ובממד הזמן (t).

אולם כאשר מתייחסים לכף-היד ולחוש המישוש, קיים היבט נוסף המתייחס לתנועת היד והאצבעות בעת מישוש - והוא מכונה קינסטזיה. חשיבותה של תנועה זו וזיהוי הצורות שהיא מאפשרת, נבדקו בשנת 1980. מגי וקנדי

חשוב להדגיש, שהגורם העיקרי המשפיע על קיבולת הערוץ מבחינה קינסטטית איננו תנועת החישן במרחב, אלא יכולת המוח לקבוע את מיקומו המדויק.

לסיכום, נראה כי עליונותם של המרכיב התנועתי או המרכיב המישושי במערכת של חוש המישוש תלויה במשימה: כאשר המשימה דורשת תחושת מרקם (טקסטורה) או מיקום השוואתי של נקודות (כמו בקריאת כתב ברייל), השפעתם של נתונים המגיעים דרך התחושה העורית גוברת. לעומת זאת, במשימות הדורשות קביעה של צורה או מבנה דו-ממדיים או תלת-ממדיים, המידע התנועתי חשוב יותר.

ממשקים מישושיים בין מוח למכונה

במערכות שנבנו בעבר לצורך התמרה חושית, השתמשו בגריין (מפעיל גרויים) רוטט שהפעיל את חוש המישוש. למרות רגישותו הרבה של חוש המישוש לרטט, הבחירה בגריין מסוג זה התבררה כלא מוצלחת מן הסיבות האלה:

- תדר הרעידות גבוה מהתדר האופטימלי לביצוע משימת-הבחנה באמצעות חוש המישוש. נמצא כי התוצאות הטובות ביותר מתקבלות כשקצב תנועת היד גורם לרטט העור בתדירות בסביבות הערכים 30-5 הרץ. ואילו המערכות הנ"ל השתמשו בתדרים של 60 עד 230 הרץ.

- היברציה נמצאה כמפריעה לזיהוי-מישושי של פרטים קטנים. נמצא כי כאשר משטח מסוים רוטט, סף-הזיהוי של פרטים מישושיים כגון אוריינטציה של קווים מקבילים, מורע בהשוואה למשטח שאיננו רוטט.

- תנועת הגריין הרוטט מייתרת את הצורך להזיז כל הזמן את היד, כדי למנוע הסתגלות (אדפטציה) של הקולטנים. מצב זה מנוגד למצב הטבעי שבו ללא תנועה אין גירוי חדש, ושוב יש צורך בתנועה (חישה פעילה) לשם קליטת הגירוי.

השערת המחקר

לתהליך החישה הפעילה תפקיד מרכזי בהבנת דרך פעולתם של תחליפי חישה. על מנת לבחון ולכמת תהליך זה, בכוונתנו לבחון אסטרטגיות-תנועה (של חיישנים מלאכותיים המשמשים במכשיר ההתמרה-החושית)

המלוות את פעולתו של מנגנון ההתמרה החושית.

במסגרת העבודה ייחקרו הנקודות הבאות:

* התאמה בין תנועת-היד המחזיקה את החישן (מהירותה, משרעת תנועתה, תדירות תנועתה הלוך ושוב וכו') לבין יעילות-הזיהוי של חפצים. מחקרים שבוצעו בעבר הראו כי לאנשים שונים יש 'אסטרטגיות תנועה' שונות המשפיעות על תפיסת המישוש שלהם. הנחת העבודה היא על כן שיעילות ההתמרה החושית תהיה תלויה באסטרטגיית התנועה.

* השוואה בין ביצועי נבדקים (דיוק וזמן) כאשר הם משתמשים בחישה פעילה או בזיהוי באמצעות חישן רוטט (שאינו מצריך חישה פעילה).

* אופטימיזציה של קיבולת הערוץ באמצעות היכרות טובה יותר עם הפסיכו-פיזיקה של חוש המישוש. התקווה היא להציע 'הוראות להפעלה מיטבית' (optimal) של מערכת התמרה חושית.

* היכרות מעמיקה יותר של תופעת ה'החצנה' והשפעתה על יעילות ההתמרה-החושית.

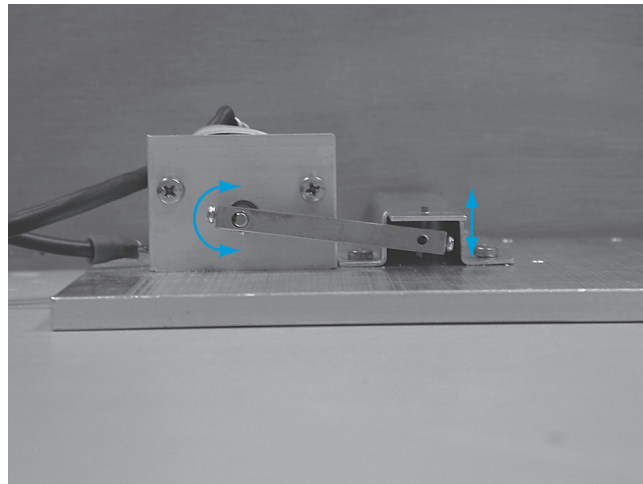
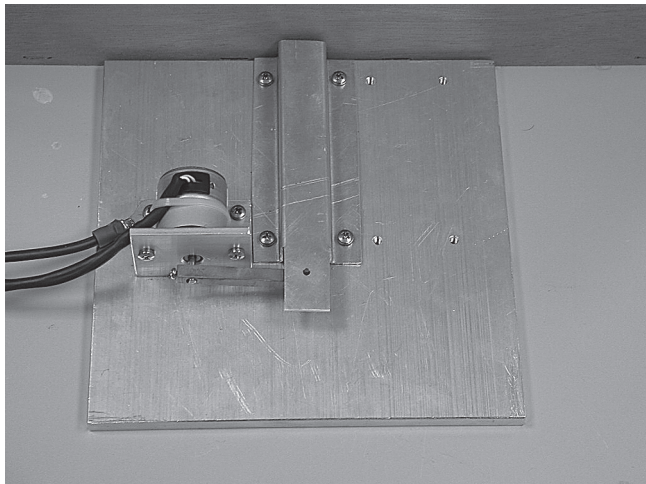
* מרחק יחסי בין מיקום החישן למיקום הגירוי: כיום ניתן לבנות מערכת התמרה חושית שבה החישן ומקור הגירוי ממוקמים בסמוך זה לזה, על אותו איבר (למשל, גלאי-אור וגריין עורי הנמצאים על אותה יד). זאת בניגוד לכל המכשירים להתמרה חושית שנבנו בעבר ושבהם היה שוני בין האיבר שאחז בגלאי (לדוגמה, מצלמה המוחזקת ביד) לבין המקום שבו הורגש הגירוי (לדוגמה - בגב). אנו נשווה את יעילותם של שני מכשירי התמרה הבנויים בדרכים שונות.

* דיוק-על (hyperacuity): הכוונה לאבחנה בהיסטים המרחביים הקטנים יותר מהמרחק בין תאי חישה סמוכים. רגישות מסוג זה נראתה לאחרונה במערכת החישה של החולדה, שם היא מושגת בעזרת אסטרטגיות של חישה פעילה. בכוונתנו לחקור את הנושא כדי לבדוק את גבולות דיוקה של ההתמרה החושית ואת תלותה באסטרטגיות תנועה.

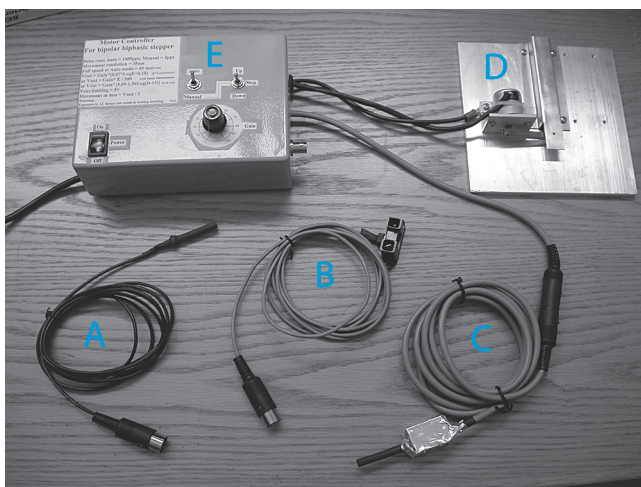
* השימוש ב'מד-מרחק' (מקל עיוורים וירטואלי) כחלק מחישן המאפשר תוספת חושית של מדידת מרחקים.

תוצאות ראשוניות

לצורך ביצוע ניסויים בנושא אנליזת-תנועה, בנינו מערכת התמרה-חושית פשוטה (הפשוטה ביותר האפשרית) המכילה חישן אור יחיד המחובר לגריין יחיד. החידוש במערכת הוא בזה שהגריין אינו רוטט אלא עולה ויורד באופן רציף לפי עוצמת האור שנקלטת על ידי חישן האור (ראו תמונות 2 ו-3). כאשר עוצמת האור הנקלטת נשארת קבועה, גם הגריין נשאר במקום קבוע. מצב זה מאלץ את המשתמשים במכשיר להזיז כל הזמן את היד האוחזת בגלאי כדי לחוש שינויים.

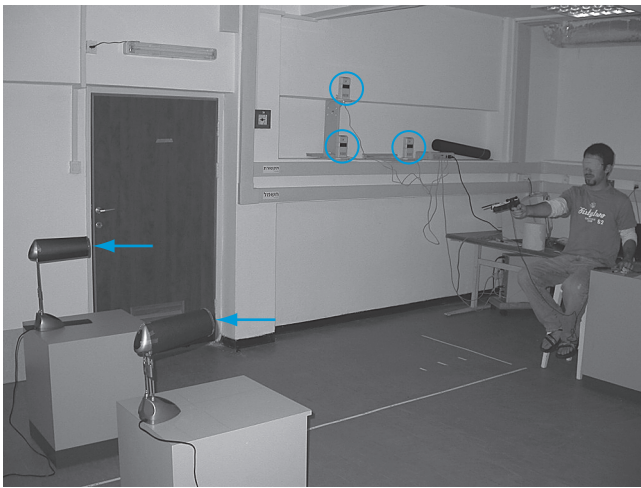


תמונה 2: מערכת התמרה-חושית פשוטה, המכילה חישן-אור יחיד המחובר לגריין יחיד. משמאל: מבט מלמעלה. ניתן לראות את המנוע. מימין: מבט מהצד, ניתן לראות את החיבור בצורת L, החיצים מסמנים את כיוון התנועה של כל אחד מהחלקים.



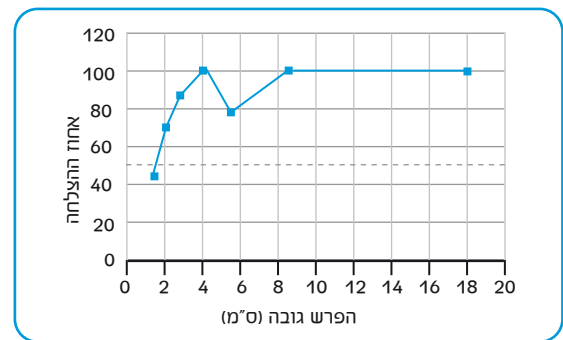
תמונה 3: מערכת התמרה-חושית פשוטה: A. חישן אור לוגריתמי, B. חישן מרחק, C. חישן אור קווי, D. גריין עורי, E. יחידת צימוד ההופכת אותות המגיעים מהחישן לאותות הפעלה של הגריין.

הניסויים שהתבצעו נגעו לחדות אבחנה בשלושה ממדים. כל ניסוי בדק ממד אחד: בניסוי לבדיקת חדות האבחנה בממד הגובה עמד נבדק מכוסה עיניים מול שני מקורות אור (נורות הלוגן): נורה אחת מוקמה לימינו בצורה מובהקת (כמטר לימינו) והשנייה לשמאלו. שתי הנורות היו במרחק כשניים וחצי מטר מהנבדק (ראו תמונה 4). הפרש הגבהים בין שתי הנורות השתנה מניסוי לניסוי, (בין 1 ל-18 ס"מ). הנבדק התבקש לענות על השאלה "איזו מנורה גבוהה יותר, הימנית או השמאלית?" תנועות הגלאי במרחב בזמן ביצוע המשימה נרשמו באמצעות מערכת מעקב תלת ממדית בשם וי-סקופ (vscope). תוצאותיה של בחינת אבחנת גובה מוצגות בתרשים 3.

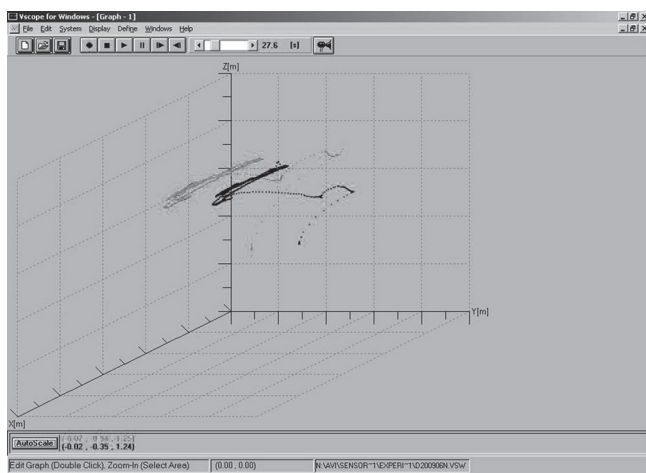


תמונה 4: המערך הניסויי: שמאל - מבט כללי. ניתן לראות את 2 המנורות בחלק השמאלי התחתון. במרכז רואים את 3 המגדלים (המוקפים בעיגול) של מערכת העקיבה התלת מימדית. ימין: תמונה מוגדלת של משתתף בזמן ביצוע ניסוי. ניתן לראות את האקדח-צעצוע עליו מורכב גלאי האור, כמו כן מורכבים עליו 2 'כפתורים' שאחר מיקומם עוקבת מערכת העקיבה התלת מימדית.

ותנועתם (במרחב): הנבדק חיפש את הגבול העליון של מקור אור אחד ואז הניע את החישן לעבר מקור האור השני, אגב שמירה (ככל הניתן) על גובה היד האוחזת בחישן. כאשר הגיע הנבדק למקור האור השני, חיפש את גבולו העליון: אם היה עליו להניע למעלה את היד (והחישן) כדי להגיע לגבול העליון של מקור האור השני - הוא הסיק מכך שמקור אור זה גבוה יותר (אנכית) מהראשון, ולהיפך. (באותו אופן נעשה שימוש בזיהוי הגבול התחתון של מקורות האור). אסטרטגיה זו ניתנת למדידה. תרשים 4 מראה את תבנית התנועה של היד במרחב. מיקום היד נדגם על ידי מכשיר מדידה מרחבי



תרשים 3: עקומה פסיכופיזית: בצבע - אחוז ההצלחה (מתן תשובות נכונות) במבחן אבחנת הגובה, כפונקציה של הפרש הגבהים בין שני מקורות האור. הקו המקווקו מצוין את גבול סף האבחנה - ההסתברות המקרית (50%).



תרשים 4: תמונה אופיינית ממערכת הוי-סקופ בעת ביצוע משימת אבחנה בציר הגובה. שני הצבעים מסמלים את מיקום הכפתורים באקדח הצעצוע (שעליו מותקן החישן), ציר האיקס הוא ציר לטרלי. ניתן לראות כי רוב תנועות החישן מתקיימות על ציר זה.

מהתוצאות הראשוניות ניתן ללמוד כי סף האבחנה של נבדקים הוא בין 1 ל-2 ס"מ. באופן דומה נקבע שסף האבחנה בממד האופקי דומה. המצב היה שונה כאשר נבדקה אבחנה בממד העומק. בניגוד לתוצאות הקודמות, יכולת האבחנה הייתה פחותה בהרבה. גם כאשר הנורות הוצבו במרחק הגדול בסדר גודל שלם מהמרחקים בניסויים בממדים האחרים, הנבדקים התקשו להשיג תוצאה מובהקת. בנוגע לאסטרטגיה שבה השתמשו הנבדקים לצורך ביצוע המשימה עבור שני הממדים, האנכי והאופקי, בוצעה המשימה בצורה קוגניטיבית מודעת על-ידי שימוש במידע פרופריאוצפטיבי (מידע חושי בקשר למיקום איברי הגוף

שיעילות ההתמרה החושית תגבר עם הגדלת הרזולוציה המרחבית. ניתן להגדיל את הרזולוציה המרחבית על-ידי הגדלת מספר החיישנים האופטיים (ומספר הגריינים בהתאם) ועל-ידי החלפת חיישנים בודדים במצלמות וידאו. קיימות מספר קונפיגורציות אפשריות למערך רב חיישני. קונפיגורציות אלה – יעילותן ואסטרטגיות הפעלתן ייבחנו במהלך המחקר.

כתובת אתר המעבדה

<http://www.weizmann.ac.il/neurobiology/labs/ahissar/ahissare.htm>

מקורות

"חושים וחיישנים", פיונטקביץ, קדם, ירון, בהוצאת המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, 1999.

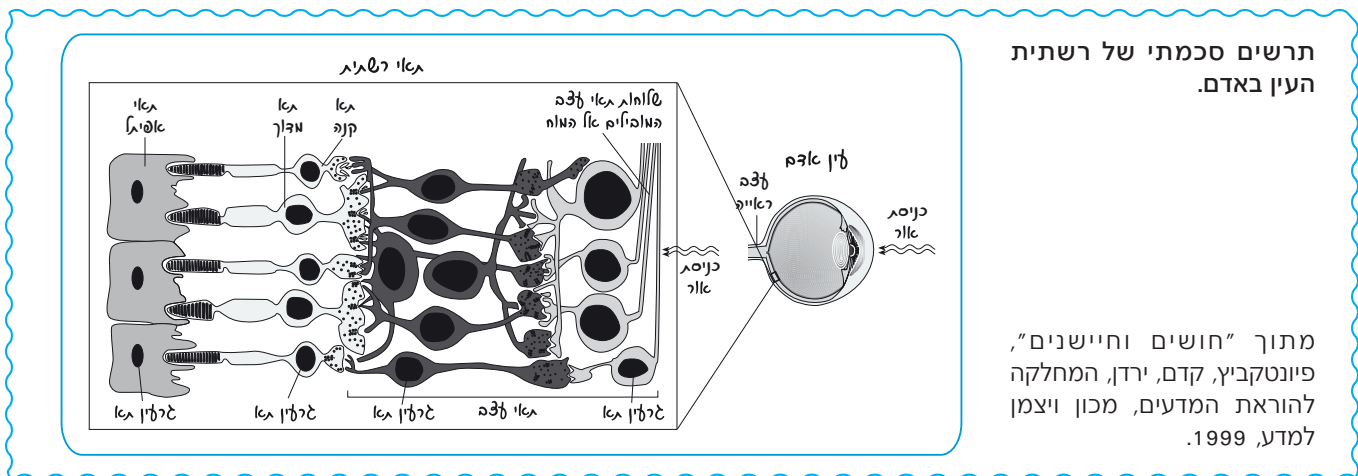
- Bach-y-Rita P., Collins C. C., Saunders F. A., White B., Scadden L. (1969) "Vision substitution by tactile image projection" Nature, 221, 963-964.
- Lenay C., Gapenne O., Hanneton S., Marque C., Geouelle C. (2003) Sensory substitution limits and perspectives in Touching for Knowing, Cognitive psychology of haptic manual perception, (Amsterdam /Philadelphia) 275-292.
- Magee L. E., Kennedy J. K. (1980) "Exploring pictures tactually" Nature, 283, 287-288.
- Vallbo A. B. (1995) "Single-afferent neurons and somatic sensation in humans", in The Cognitive Neurosciences Ed M Gazzaniga (Cambridge: Cambridge) chapter 14.
- Vallbo A. B., Johansson R. S. (1984) "Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation" Hum Neurobiol, 3, 3-14.

(Vscope); כל זוג נקודות (כל אחת מבנות הזוג בצבע שונה) מייצג שתי נקודות לאורך גלאי האור בנקודת זמן אחת. לצורך ביצוע המשימה ניתנו לנבדקים עשר דקות, שהספיקו ברוב המקרים כדי שהנבדק יגבש תשובה (רוב הנבדקים ענו לפני תום עשר הדקות שנתנו להם).

באשר לממד העומק, הנבדקים ניסו אסטרטגיות שונות ובעיקר ניסו להתייחס אל ממד העומק כאל ממד אחר: דוגמה לאסטרטגיה מסוג זה: הרמת היד האוחזת בחישן למעלה, מעל גובהם של שני מקורות האור. באופן כזה מקור אור רחוק יותר הופך לגבוה יותר ממקור אור קרוב הנמצא באותו גובה. דוגמה נוספת: שימוש בשטח ה'נראה' של מקור האור כמדד לקרבתו (מקור אור קרוב יותר 'נראה' בעל שטח גדול יותר).

עד כה בוצעו הניסויים על מספר מצומצם ביותר של נבדקים, וכדי להגיע למסקנות מובהקות ובעלות משמעות בנוגע לסף הגילוי ולאסטרטגיות החישה, נדרש מספר נבחים גדול יותר.

יש לציין כי אסטרטגיה קוגניטיבית-מודעת איננה הדרך ה'רגילה' שבה אנו משתמשים בחושים שלנו באופן טבעי (אין אנו חושבים בצורה מודעת על תהליך איסוף המידע באמצעות חושינו). באופן טבעי אסטרטגיות השימוש בחושים מופעלות ברמה תת מודעת. בהמשך המחקר יפותחו משימות אבחנה כאלו שאינן מאפשרות פתרון קוגניטיבי מודע, ועל ידי כך ניתן יהיה לחקור אסטרטגיות חישה פעילה אשר קרובות יותר לאלו הקיימות בשימוש בחושים הרגילים. הנחת עבודה נוספת של המחקר היא



תרשים סכמתי של רשתית העין באדם.

מתוך "חושים וחיישנים", פיונטקביץ, קדם, ירון, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, 1999.