

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
TECHNION - ISRAEL INSTITUTE OF TECHNOLOGY

הפקולטה להנדסת חשמל
המעבדה לבקרה רובוטית ולמידה חישובית



Control Robotics and Machine Learning Laboratory

דו"ח סיכום פרויקט

הנעת זרוע רובוטית בעזרת מערכת חישת תנועות
ידיים

מגישים:

324144369

214008849

ליעד אולייר

רואי סביון

מנחה:

קובי כוחי

סמסטר רישום: אביב תשפ"ד

תאריך הגשה: מרץ 2025

תוכן עניינים

3	רשימת איורים
3	תקציר
3	Abstract
3	1. מבוא
3	2. סיכום סקר ספרות
3	2.1 פתרונות קיימים
3	2.1.1 תותבת סטטית
3	2.1.2 תותבת מכנית
3	2.1.3 תותבת "חכמה"
3	2.2 רקע תאורטי
3	2.2.1 אותות EMG
3	2.2.2 אלגוריתם למידת מכונה
3	3. הפתרון הנבחר
3	3.1 רכיבי המוצר
3	3.1.1 צמיד MINDROVE
3	3.1.2 פרוטזת היד
4	3.1.3 Raspberry PI
5	3.2 מודל הסיווג
5	3.2.1 עיבוד מקדים
5	3.2.2 איסוף המידע
5	3.2.3 אימון המודל והמרתו לקוד
5	3.3 בניית המוצר הסופי
5	4. תוצאות ומסקנות
5	5. ביבליוגרפיה

רשימת איורים

3	איור 1 : לוגו העמותה HAIFA 3D
4	איור 2: תמונה מתוך האפליקציה שפותחה לשליטה ביד
4	איור 3: יד תותבת סטטית
4	איור 4: תותב מכני בצורת קרס
4	איור 5: יד תותבת "חכמה"
4	איור 6: צמיד חיישני EMG של חברת MINDROVE
4	איור 7: פרוטזת היד כפי שפותחה בעמותת HAIFA 3D
4	איור 8: רכיב ה-Raspberry PI

תקציר

קטיעת יד (וקטיעת גפיים בכלל) יכולה להיגרם כתוצאה מתאונות, פציעות בקרב ובאופן מולד. אדם אשר ידו קטועה עלול להתקשות בהרבה ממטלות היום יום והוא מוגבל בפעולות מסוימות. לבעיה זו קיימים פתרונות רבים ומגוונים כבר עשרות שנים, חלקם פשוטים יותר (כמו הקרס המוכרת לנו משודדי הים בסרטים), וחלקם מורכבים יותר שמזכירים לנו דברים שפעם ראינו רק בסרטים. עם פרוץ מלחמת חרבות ברזל, מספר קטועי הידיים גדל והחשיבות של ייצור ידיים תותבות זולות ואמינות גדלה.

הפרוייקט נעשה בשיתוף עמותת "Haifa3D" אשר אחד השירותים אותו היא מציעה הינו יד תותבת רובוטית שמודפסת בתלת מימד. היד ניתנת ללא עלות לכל קטוע יד שפונה לעמותה בהתאמה אישית למידותיו ובהתאם לצרכיו האישיים.

מטרתנו בפרוייקט היא להניע את היד התותבת בעזרת צמיד שיקלוט בצורה אמינה ומהירה את תנועות שרירי היד של קטוע היד, כל זה על ידי מערכת כמה שיותר פשוטה ונוחה לשימוש יום יומי.

Abstract

Hand amputation (and limb amputation in general) can be caused by accidents, injuries in battle and congenitally. A person whose hand is amputated may find it much more difficult to do everyday tasks and is limited in certain activities.

There have been many and varied solutions to this problem for decades, some of them simpler (like the hook we know from the pirates in the movies), and some of them more complex that remind us of things we used to see only in movies.

With the outbreak of the Swords of Iron War, the number of amputees increased and the importance of producing cheap and reliable prosthetic hands increased.

The project was done in collaboration with the "Haifa3D" association, one of the services it offers is a robotic prosthetic hand that is printed in 3D. The hand is given free of charge to any amputee who applies to the association, customized to his measurements and according to his personal needs.

Our goal in the project is to move the prosthetic hand using a bracelet that will reliably and quickly pick up the movements of the amputee's hand muscles, all this by a system as simple and convenient as possible for everyday use.



איור 1 : לוגו העמותה "HAIFA 3D"

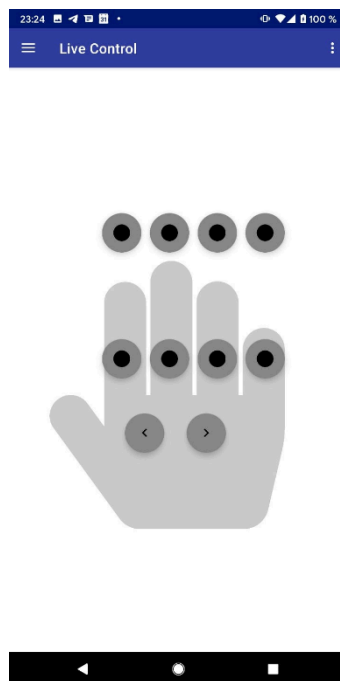
1. מבוא

הפרויקט שלנו הוא בשיתוף עם עמותת "Haifa3D" – עמותה ללא מטרת רווח אשר מפתחת פתרונות מותאמים, זולים ונגישים לאנשים עם קטיעות ומוגבלויות אחרות בגפיים.

העמותה פיתחה יד רובוטית אשר ניתנת להדפסה במדפסות תלת מימד בעלות זולה ועם יכולת להתאמה אישית. כיום, היד מופעלת על ידי אפליקציה לטלפון ששולחת ליד את הפקודות שהמשתמש בוחר (כמו לפתוח או לסגור את היד).

חסרונו העיקרי של הפתרון הנ"ל הוא תפעול מסורבל של היד הרובוטית – היד השניה של המשתמש צריכה להיות "תפוסה" בשימוש בפלאפון בעת הפעלת מצבים ולא ניתן באמת לעבוד באופן רציף עם שתי הידיים.

מטרת פרויקט זה היא הורדת התלות של היד באפליקציה על ידי פיתוח מערכת הכוללת אלגוריתם והתקן חומרתי בתצורה לבישה, אשר מטרתו לחוש ולאפיין מחוות שונות אשר מבצע המשתמש, זאת על מנת להפעיל את המצבים השונים של היד הרובוטית בצורה נוחה ואמינה.



איור 2: תמונה מתוך האפליקציה שפותחה לשליטה ביד

2. סיכום סקר ספרות

2.1 פתרונות קיימים

2.1.1 תותבת סטטית

הפתרון הפשוט ביותר לבעיה היא יד תותבת סטטית. בדרך כלל השימוש הוא באביזר בצורת יד אמיתית אשר ניתן להלביש על היד הקטועה. מוצר זה הוא זול מאוד ופשוט לשימוש, אך מכיוון שהוא סטטי לגמרי היכולת הפונקציונאלית שלו מוגבלת מאוד, או לפעמים ללא יכולת כלל ומשמש רק לאסתטיות.



איור 3: יד תותבת סטטית

2.1.2 תותבת מכנית

הפתרון הנפוץ ביותר הוא יד תותבת מכנית, אשר הנפוצה ביותר היא הקרס. בדרך כלל אופן השימוש הוא מתיחה והרפיה של רצועות וקפיצים אשר מבוצעות בעזרת הכתף הנגדית וגורמות לפישוק של התותב על מנת לתפוס ולשחרר חפצים.

היתרונות של פתרון זה הם:

- פשטות – מערכת פשוטה לשימוש ולא דורשת למידה.
- עמידות – מבנה קשיח שיכול לעמוד בעומסים ובתנאי סביבה שונים.
- מחיר – מוצר זול שלא דורש חלקים אלקטרוניים מורכבים ויקרים.

החסרונות של פתרון זה הם:

- כאבים פיזיים – השימוש דורש מאמץ פיזי שעלול להקשות לאחר זמן מה על המשתמש.
- אסתטיות – בדרך כלל המוצר דורש רצועות שמונחות על הגוף וקרס, מראה מסורבל שלא תואם ליד אמיתית.
- מספר מוגבל של פעולות – בדרך כלל ניתן לבצע פעולות של תפיסה ושחרור בלבד.



איור 4: תותב מכני בצורת קרס

2.1.3 תותבת "חכמה"

עם התקדמות הטכנולוגיה הממוזערת בשנים האחרונות ניתן לראות יותר ויותר פתרונות חכמים, אשר נותנים למשתמש אופציה לבצע מספר רחב יותר של פעולות.

מרבית המוצרים מתבססים על חיישנים הקולטים תנועות מסויימות שמבצע המשתמש בגפיים שלו ובאופן מיידי מחקה את הפעולה ביד החכמה.

היתרון המרכזי של מוצרים אלו הוא:

- יכולת לבצע מספר רחב של פעולות – במרבית המוצרים ניתן לעשות תנועות של אצבעות בודדות, פתיחות וסגירות של היד וסיבובים. למוצרים אלו מספר חסרונות משמעותיים:
- עלות יקרה – המוצרים הטובים ביותר כוללים חיישנים יקרים ועלות פיתוח יקרה אשר מובילים לעלות יקרה שמקשה על חלק מהצרכנים לרכוש את המוצר.
- תפעול מסובך – חלק מן המוצרים כוללים חיישנים רגישים הדורשים שימוש בצורה ספציפית כדי להביא לתוצאות גבוהות, דבר המקשה על התחלת השימוש לצרכן הבסיסי.



איור 5: יד תותבת "חכמה"

2.2 רקע תאורטי

2.2.1 אותות EMG

אותות EMG הם אותות המתקבלים מהפעילות החשמלית בתוך שרירי השלד, ובעזרת קליטה שלהם ניתן לזהות פוטנציאל חשמלי הנוצר כתוצאה מפעילות תאי שרירים.

השימוש באותות אלו לסיווג וניתוח פעולות שרירים הוא נפוץ מאוד בעולם הרפואה, ובשנים האחרונות גם בעולם הרובוטיקה בהקשרים של תותבות חכמות.

ניתן למדוד אותות אלו על ידי מדידת EMG תוך שרירית הכוללת חדירה מתחת לעור, ועל ידי מדידת EMG משטחית על ידי חיישנים מיוחדים הנמצאים על העור מעל לשריר הנבדק. במקרה שלנו כדי לשמור על נוחות השימוש במוצר אנו עובדים עם מדידת EMG משטחי, דבר שמגביל את המדידה שלנו אך עדיין נותן תוצאות מספקות.

הפוטנציאלים הנמדדים נעים בערכים של מיקרו-וולטים עד למילי-וולטים ובתדרים של עשרות Hz, כתלות באופי השריר הנבחן. אלו נתונים המאפשרים לנו לסנן ולקלוט את אותות אלו בצורה די טובה ולבסוף לנתח בעזרתם את הפעולה המתבצעת.

2.2.2 אלגוריתם למידת מכונה

אלגוריתם SVM הוא מודל ללמידה מפוקחת המשמש לסיווג ורגרסיה. הרעיון המרכזי בו הוא למצוא היפר-מישור מיטבי שמפריד בצורה הטובה ביותר בין קבוצות נתונים במרחב רב-ממדי.

1. הפרדה מרבית – האלגוריתם מחפש את הקו (או המשטח ברב-ממד) שמייצר את המרווח הגדול ביותר בין המחלקות.

2. וקטורי תמיכה – הנקודות הקרובות ביותר להיפר-מישור נקראות וקטורי תמיכה, והן קובעות את מיקומו.

3. ליבה (Kernel Trick) – אם הנתונים אינם ניתנים להפרדה לינארית, האלגוריתם משתמש בפונקציות ליבה (כמו RBF או פולינומית) כדי למפות אותם למרחב גבוה יותר שבו ניתן לבצע הפרדה.

3. הפתרון הנבחר

3.1 רכיבי המוצר

3.1.1 צמיד MINDROVE

כדי למדוד את אותות ה-EMG המתקבלים השתמשנו בצמיד חיישנים של חברת MINDROVE. הצמיד כולל 8 חיישנים זהים אשר דוגמים בקצב של 500 Hz.

הצמיד יודע לתקשר באמצעות תקשורת WIFI על מנת להעביר את הנתונים שהוא מקבל לכרטיס חישוב, יכול לעבוד ברציפות למשך מספר שעות ללא הטענה ונוח ללבישה, לכן הוא עונה על כל הקריטריונים שלנו למוצר.



איור 6: צמיד חיישני EMG של חברת MINDROVE

3.1.2 פרוטזה היד

הפרוטזה בה אנו משתמשים פותחה בעמותת HAIFA 3D.

הפרוטזה מתקשרת באמצעות BLE (Bluetooth Low Energy) עם הבקר ומקבלת ממנו פקודות להזזת היד.

היד החכמה יודעת לבצע פעולות של פתיחה וסגירה של האצבעות + סיבוב לשני הצדדים, כאשר אנחנו משתמשים ביכולת שלה לבצע פתיחה וסגירה מלאה של היד וסיבוב ימינה ושמאלה.



איור 7: פרוטזת היד כפי שפותחה בעמותת HAIFA 3D

Raspberry PI 3.1.3

בחרנו להשתמש ברכיב מסדרת Raspberry PI מהסיבות הבאות:

- תמיכה מובנית ב-BLE וב-WIFI ללא צורך בחומרה נוספת: ניתן לתקשר עם הצמיד ועם היד ללא צורך בחיבור רכיב נוסף.
- יכולות חישוב: בחרנו את הרכיב המתקדם ביותר בסדרת Raspberry PI כדי להשתמש ביכולות החישוב החזקות שלו, כך שנוכל לקבל תוצאות סיווג מהירות שיאפשרו לנו הזזה של היד בזמן מינימלי.
- גודל אידיאלי: רכיב קטן שניתן לסחוב אותו בתיק או להצמיד אותו לרכיב לביש בצורה נוחה ולא כבדה.
- סביבת עבודה נוחה: מכיוון ש-Raspberry PI מריץ מערכת הפעלה Linux, ניתן לעבוד על המחשב האישי ולכתוב קטעי קוד בשפת פייתון, ולצרום בקלות לרכיב.



איור 8: רכיב ה-Raspberry PI

3.2 מודל הסיווג

3.2.1 איסוף המידע

בתהליך איסוף הנתונים לאימון ה-SVM בפרויקט ה-EMG, הקפדנו על ענידה עקבית של צמיד ה-Mindrove על היד כדי להבטיח מדידות אמינות. האיסוף כולל ביצוע חזרות על כל תנועה – פתיחת יד, סגירה, וסיבוב – ותיעוד הנתונים הנרכשים מהצמיד.

בנוסף, כל דגימה מתויגת באופן ידני בהתאם לתנועה שבוצעה באותו הרגע (בעזרת סרטון המצלם את ההקלטה). לבסוף, הנתונים נשמרים בפורמט CSV, כך שניתן יהיה להשתמש בהם לאימון והכוונן של ה-SVM בצורה יעילה.

3.2.2 עיבוד מקדים

תחילה אנו מקבלים 8 ערוצים של אותות EMG גולמיים, הדגומים בתדר של 500Hz. בצורה הזו האותות נותנות לנו מעט מאוד אינפורמציה, ולכן סיננו את האותות. איפסנו את תדר 50Hz שזהו התדר בו עובדת מערכת החשמל בישראל וזו נקלטת בחיישנים ויוצרת רעש. בנוסף איפסנו את התדרים הקטנים מ-20Hz שלפי הספרות אינם רלוונטים, ואיפסנו את התדרים הגדולים מ-250Hz כדי להימנע מתופעה של התחזות.

לאחר מכן לקחנו את הדגימות ושברנו אותם לחלונות לפי ערך סף של חיישני ה-GYRO, שמיידיעים אותנו כאשר מתרחשת תנועה כלשהי.

3.2.3 חילוץ מאפיינים

לאחר איסוף הנתונים סינונם ושבירה לחלונות, מתבצע שלב חילוץ הפיצ'רים, שבו האותות הגולמיים מנותחים ומומרו למאפיינים ייחודיים שיסייעו ל-SVM להבחין בין התנועות. הפיצ'רים המחולצים כוללים MAV (Mean Absolute Value) לחישוב ממוצע הערכים המוחלטים של האות, RMS (Root Mean Square) המודד את העוצמה הכוללת של האות, ו-WL (Waveform Length) (WL)

המייצג את המורכבות והשינויים באות, ZC (Zero Crossing) הסופר את מספר המעברים דרך האפס,

ו-SSC (Slope Sign Change) הסופר שינויים במגמת השיפוע של האות. מטרת החילוץ היא לצמצם את כמות המידע תוך שמירה על תכונות משמעותיות שמבדילות בין התנועות השונות, כך שהמודל יוכל ללמוד באופן מדויק ויעיל יותר.

3.2.4 אימון המודל

במהלך אימון מודל ה-SVM בפרוייקט, נתקלנו בכמה בעיות. הבעיה הראשונה הייתה מציאת הפיצ'רים המתאימים ביותר לאימון המודל, וזה נפתר בעזרת קריאת מחקרים בתחום שלפי הם בחרנו את הפיצ'רים שנתנו ביצועים מקסימליים. בעיה נוספת הייתה בחירת נרמול מתאים, כיוון שגילינו כי חלק מהנרמולים פוגעים בפיצ'רים מסוימים, דבר שפוגע בביצועים של המודל. לבסוף, כשניסינו לאמן את המודל על דאטה ממספר אנשים, גילינו שהביצועים ירדו, ולכן החלטנו להשתמש בדאטה רק מאדם אחד, כדי להגיע לביצועים אופטימליים.

4. תוצאות ומסקנות

בתחילת הפרוייקט הצבנו לעצמנו יעד לפתח מערכת פשוטה המפעילה יד תותבת חכמה על פי התנועות הרצויות ביד האנושית שהגדרנו לעצמנו (פתיחה, סגירה וסיבובים).

תוכן הפרוייקט:

- יצירת ממשק עבודה עם הצמיד שכולל:
 - חיבור אוטומטי לרשת ה-WIFI של הצמיד.
 - קריאת מידע מהצמיד.
 - סינון המידע שהתקבל.
 - יצירת הקלטת מידע לצורך אימון המודל.
- יצירת ממשק לאימון מודל, הכולל:
 - צפייה בתיוג הנתונים.
 - חילוף מאפיינים מתוך הקובץ המתויג.
 - אימון מודל בעזרת הנתונים המתויגים.
- ממשק עבודה עם היד התותבת, הכולל:
 - חיבור אוטומטי באמצעות פרוטוקול BLE.
 - שליחת פקודות להנעת היד התותבת.
- אינטגרציה של המערכת, כך שהתנועות ביד התותבת מופעלות אוטומטית בעזרת הסיווג שהתקבל מהצמיד.

(סרטון)

המלצות להמשך:

- הוספת עוד מידע לאימון המודל לשיפור הדיוק.
- בחינת פיצ'רים נוספים שיכולים לשפר את סיווג המידע.
- שימוש באלגוריתמים להורדת מימדים, כמו PCA ו-LLE, לפני תהליך הסיווג.
- שיפור סיווג התנועות האקראיות, שמטרתן לא להפעיל את היד התותבת, כדי למנוע טעויות בהפעלה.

5. ביבליוגרפיה

- 1) Nikomidisz, J. E. (2021). Development of machine learning tools for the reconstruction of muscle movements from electrophysiological data. Info-Bionics Engineering MSc.
- 2) Phinyomark, A., Khushaba, R. N., & Scheme, E. (2018). Feature extraction and selection for myoelectric control based on wearable EMG sensors. *Sensors*, 18(5), 1615.
- 3) Marzullo, A., Tenore, G. C., & Santello, M. (2022). Advances in machine learning for myoelectric control: From offline analyses to real-time implementation. *HardwareX*, 4(1), 100066.
- 4) Jabban, L., & Hamedi, M. (2024). Advances in electromyography-based control systems. *Applied Sciences*, 14(13), 5784.

