

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

Control of robotic arm using EMG sensor on upper leg

שליטה ביד רובוטית באמצעות חיישני EMG על
גבי רגל עליונה

מגישות

יעל צדיק

עדן ישי

מנחה

קובי קוחי

עוזי שוורדן

תוכן עניינים

5.....	פרק 1 - מטרת הפרויקט.....
5.....	פרק 2 – מבוא.....
5.....	2.1 רקע כללי.....
5.....	2.2 תיאור כללי של הפרויקט.....
7.....	פרק 3 - המערכת כמתקן לביש.....
7.....	3.1 רקע תיאורטי מפורט.....
7.....	3.1.1 - הסבר על החיישנים.....
7.....	3.1.2 – מיקום וכיוון אלקטרודות נכונים.....
8.....	3.1.3 – השוואה בין שרירי זרוע/ירך/ישבן.....
11.....	3.2 אופן לבישת המערכת.....
12.....	פרק 4 – תיאור חומרה.....
12.....	4.1 כרטיסים אלקטרוניים.....
12.....	Redboard - Arduino Uno.....
13.....	SparkFun Thing Plus.....
13.....	4.2 סכמה חשמלית מלאה.....
14.....	פרק 5 – תיאור תוכנה.....
14.....	5.1 מבנה התוכנה – גרסת הקלטת אות.....
16.....	5.2 מבנה התוכנה – גרסת השימוש.....
16.....	5.2.1 REDBOARD לוח.....
19.....	5.2.2 ESP32-wroom-EU32 לוח.....
20.....	פרק 6 – מימוש מערכת לפי הנחיות יצרן – גרסה שנדחתה.....
20.....	6.1 תיאור המערכת.....
22.....	6.2 קליטת האות.....
22.....	6.3 מסקנות.....
23.....	פרק 7 – מימוש מערכת באמצעות מבודד אופטי – גרסה שנדחתה.....
23.....	7.1 תיאור המערכת.....
24.....	7.2 שיטות למיגור רעש.....
25.....	פרק 8 – סיכום ומסקנות.....
25.....	8.1 תוצאות.....
26.....	8.2 מסקנות.....
26.....	פרק 9 – הצעות להמשך.....
26.....	9.1 מערכת לבישה.....

26.....	9.2 מטרה שונה
26.....	9.3 שילוב של לחיצה ארוכה
27.....	9.4 בחירת קבוצת שרירים אחרת
27.....	9.5 תמיכה בלחיצות ארוכות יותר
28.....	ביבליוגרפיה.....
29.....	רשימת איורים.....
29.....	רשימת טבלאות.....
30.....	נספחים.....
30.....	נספח 1 – מיקומי אלקטרודות חיישנים.....
32.....	נספח 2 – מציאת com קריאה וכתובה BLUETHOOTH לוח-מחשב.....
33.....	נספח 3 – תכן מסנן LPF.....

תקציר

בפרויקט זה פיתחנו מערכת המאפשרת שליטה דיסקרטית, אמינה ומדויקת ביד רובוטית מוכנה מראש. המערכת מבוססת על אותות EMG משרירי הרגליים העליונות ומשמשת אנשים קטועי יד. היד הרובוטית פותחה על ידי עמותת חיפה 3D, ואנו התמקדנו בתכנון ומימוש ממשק הממיר את אותות השריר לפקודות עבור היד.

האתגר המרכזי בפרויקט היה התמודדות עם רעש בקליטת אותות ה-EMG והעברת הנתונים לעיבוד על ידי בקר Arduino. לשם כך, השתמשנו בכבלים ממוסכים ייעודיים ובתקשורת Bluetooth, אשר יצרו מערכת צפה והפחיתו הפרעות חיצוניות. בנוסף, סיננו את האות הנדגם באמצעות מסנן Band-Pass חכם בזמן אמת, לשיפור דיוק הזיהוי.

לבסוף, הצלחנו לממש גילוי אמין של הפעלת השריר בצורות שונות: לחיצה בודדת, רצף לחיצות ולחיצה ארוכה. כל אחת מהפעולות תורגמה לפקודות תנועה של היד הרובוטית בהתאם למצבים הקיימים שלה.

Abstract

In this project, we developed a system that enables discreet, reliable, and precise control of a pre-built robotic hand. The system is based on EMG signals from the upper leg muscles and is designed for individuals with upper limb amputations. The robotic hand was developed by the Haifa 3D organization, and we focused on designing and implementing an interface that converts muscle signals into commands for the hand.

The main challenge of the project was managing noise during the EMG signal acquisition and transmitting the data for processing by the Arduino controller. To address this, we used shielded cables and Bluetooth communication, creating a floating system that reduced external interference. Additionally, we filtered the sampled signal using a real-time smart Band-Pass filter to improve detection accuracy.

Finally, we successfully implemented reliable muscle activation detection in various forms:

a single press, a sequence of presses, and a long press. Each action was translated into movement commands for the robotic hand according to its predefined states.

פרק 1 - מטרת הפרויקט

מטרת הפרויקט הייתה לפתח מערכת המאפשרת שליטה דיסקרטית, אמינה ומדויקת ביד רובוטית מוכנה מראש, באמצעות אותות EMG משרירי הישבן עבור אנשים קטועי יד. היד הרובוטית פותחה על ידי עמותת חיפה 3D, ואנו התמקדנו בתכנון ומימוש ממשק אשר ממיר את אותות השריר לפקודות עבור היד.

מטרות המשנה:

- בניית מערכת לבישה ונוחה לתפעול.
- תכנון מערכת שתספק כמה שיותר דרגות חופש של ערכים במוצא להרחבת יכולת השליטה ביד.

במהלך העבודה התעורר צורך להתמודד עם רעשי אותות שהשפיעו על ביצועי המערכת ולכן חלק גדול מהפרויקט התמקד בבעיה זאת. במקור, התכנון היה להתבסס על שרירי הישבן, אך בעקבות אתגרים טכניים ומעשיים, הוחלט לעבור לשימוש בשרירי הרגל הקדמית העליונה.

פרק 2 - מבוא

2.1 רקע כללי

עמותת חיפה 3D היא ארגון ללא מטרת רווח שפועל ליצירת פתרונות טכנולוגיים מותאמים אישית עבור אנשים עם מוגבלויות, תוך שימוש בטכנולוגיות ייצור מתקדמות כמו הדפסת תלת-ממד. העמותה משלבת מהנדסים, מעצבים ומתנדבים כדי לפתח ולהתאים אביזרים, תותבות, ואמצעי עזר שונים, במטרה לשפר את איכות החיים של אנשים עם צרכים מיוחדים.

היתרון בשימוש בחיישני EMG על פני חיישנים אחרים או אמצעי שליטה מכניים טמון בדיסקרטיות שלהם. חיישנים אלה יכולים להיות ממוקמים מתחת לבגדים, ומאפשרים שליטה ביד הרובוטית באמצעות הפעלת שרירים שאינה נראית לעין. בכך, הם מציעים פתרון אלגנטי ולא פולשני, שאינו דורש תנועות גדולות או בולטות.

חיבור חיישני EMG ישירות לקצות גדם עלול להוות אתגר משמעותי. על פי ניסיונה של עמותת חיפה 3D, חיבור כזה עלול לעורר מחדש כאבי פאנטום אצל משתמשים קטועי גפיים, ולכן נדרש פתרון חלופי למיקום החיישנים במקומות שאינם מגבירים תופעה זו.

2.2 תיאור כללי של הפרויקט

הפרויקט עוסק בפיתוח מערכת שליטה מבוססת אותות EMG תוך התמקדות בנטרול וסינון רעשים. המערכת מאפשרת למשתמש להפעיל את היד הרובוטית באמצעות כיווץ שרירים בגוף, תוך שמירה על דיסקרטיות ונוחות השימוש.

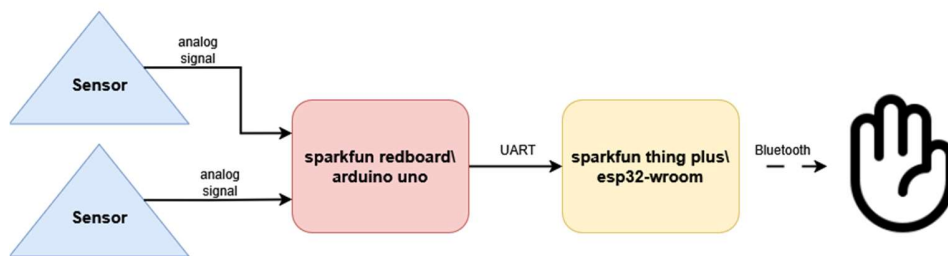
למערכת שלוש רמות עיקריות:

1. היבט לביש – פיתוח מתקן המאפשר הצמדה יציבה של החיישנים לגוף, תוך התחשבות בנוחות המשתמש וביכולת להסתירם מתחת לבגדים.
2. חומרה – חיבור חיישני EMG למעגלי עיבוד ותכנון מערכת להפחתת רעשי אותות.
3. תוכנה – עיבוד האותות המתקבלים מהחיישנים, סינון רעשים, פענוח כוונת המשתמש, והעברת פקודות ליד הרובוטית או למחשב לצורך בדיקות.

במהלך הפרויקט פותחו ונבדקו מספר גרסאות של המערכת, תוך ביצוע התאמות שנדרשו עקב אתגרים כמו רעשי אותות, התאמת מיקום החיישנים, ושיפור הדיוק והאמינות של השליטה ביד הרובוטית.

המערכת מורכבת מארבעה רכיבים עיקריים, המחוברים ביניהם באמצעות חוטים או תקשורת אלחוטית:

1. חיישני MyoWare 2 – חיישנים אלו מוצמדים לשרירי הרגל העליונה באמצעות מדבקות conductive gel אשר מפחיתות את התנגדות העור להולכת אותות חשמליים ומצמצמות עיוותים באותות ה-EMG.
2. לוח Arduino Uno / RedBoard Plus – אחראי על דגימת האות, סינון רעשים ראשוני, וזיהוי כיווצי השריר. האלגוריתם על גבי הלוח תומך בשני חיישנים לכל היותר, אחד לכל רגל.
- בגרסת הפיתוח, אות המוצא הוא אות גולמי, אשר מוקלט ומשמש לניתוח האותות הנדגמים.
3. לוח ESP32-WROOM / SparkFun Thing Plus – מקבל את האותות הדיגיטליים של כיווצי השריר, מנהל את מכונת המצבים לצורך קידוד רצף הלחיצות לפעולות המתאימות, ומשדר את הפקודות ליד הרובוטית באמצעות תקשורת Bluetooth.
- בגרסת הפיתוח, התקשורת מתבצעת מול המחשב לצורך בדיקות וניתוח קריאות חיישנים, במקום מול היד הרובוטית.
4. היד הרובוטית – מערכת מכנית בעלת יכולת כיפוף של ארבע אצבעות (ללא אגודל) וכן סיבוב של מפרק כף היד, בהתאם לפקודות המתקבלות ממערכת השליטה.



איור 1 – מבנה כללי של המערכת

פרק 3 - המערכת כמתקן לביש

3.1 רקע תיאורטי מפורט

3.1.1 - הסבר על החיישנים

על פי היצרן [1] החיישן של MYOWARE 2 הוא חיישן ביפולרי. הוא כולל:

- 2 אלקטרודות כניסה: MID ו-END
- אלקטרודת רפרנס REF



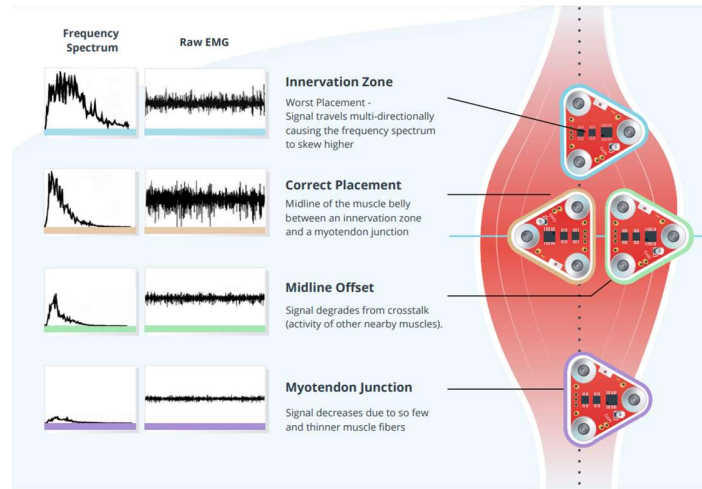
איור 2 – חיישן MYOWARE

בחיבור החיישן לשריר, אלקטרודת ה-REF ממוקמת במיקום ניטרלי, או במקביל לקו בין שתי האלקטרודות האחרות. אלקטרודת ה-MID ממוקמת במרכז השריר, ואלקטרודת ה-END ממוקמת בכיוון ה-neuromuscular junction אשר בדרך כלל נמצא פרוקסימלית ל-Thoracic cavity (בית החזה והבטן). ההבדל במתח הנמדד בין האלקטרודות מוגבר ביחס לאלקטרודת היחס.

היתרון של תצורה זו הוא שהרעש המשותף בין שתי האלקטרודות מוסר בשל יחס דחיית מצב משותף של המגבר (CMRR- common mode rejection ratio). החיסרון של תצורה זו הוא הגדלת יחס אות לרעש (SNR) [1].

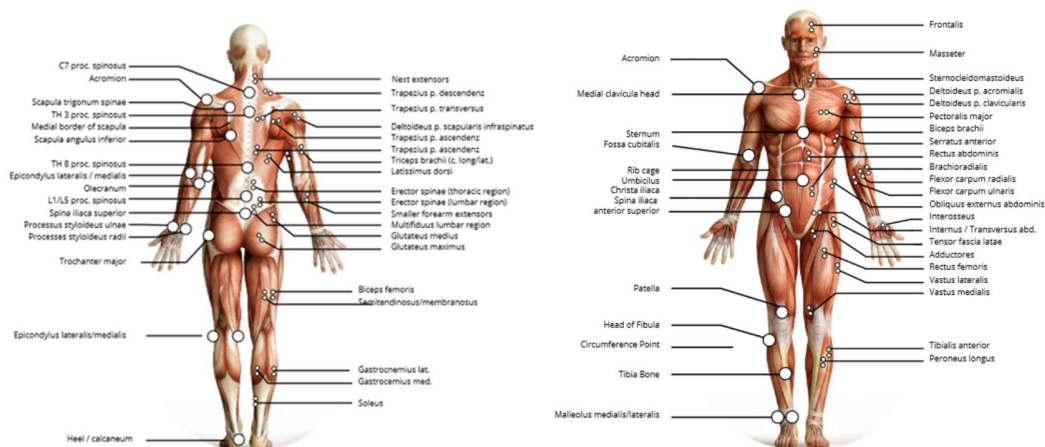
3.1.2 – מיקום וכיוון אלקטרודות נכונים

על פי היצרן [2] לקבלת האות האיכותי ביותר, יש להניח את האלקטרודות על הבטן של שריר המטרה, בין אזור העצבים הקרוב ביותר לצומת ה-Myotendon שבו סיבי השריר צפופים ביותר. כיוון האלקטרודות צריך ליצור קו מקביל לאורך סיבי השריר.



איור 3 - מיקום שגוי של האלקטרודות עלול לגרום לשינויים באות הנמדד

מיקום שגוי של האלקטרודות עלול לפגוע באיכות האות הנמדד באופנים שונים:
 צומת שריר-גיד (Myotendon Junction) – מיקום אלקטרודה מעל איזור בו יש מעט סיבי שריר מחלישה את האות הנמדד.
 הזחה של האות המקורי (Midline Offset) - האות מתדרדר עקב זליגת אותות הנגרמת מפעילות של שרירים סמוכים אחרים.
 אזור עצבוב (Innervation Zone) - האות נע בכיוונים מרובים, מה שגורם להזחה של הספקטרום של האות לתדרים גבוהים יותר.



איור 4 - מפה של השרירים ונקודות הרפרנס (נקודות רפרנס נקודות שלמות משמאל)

3.1.3 – השוואה בין שרירי זרוע/ירך/ישבן

על פי המאמר מאת המרכז לשיקום - שיקגו [3], שני גורמים עיקריים משפיעים על עוצמת האות שניתן למדוד על גבי העור משריר מסוים, והם:

1. גודל השריר

2. עובי רקמת השומן התת עורי – רקמת השומן בין השריר לאות יוצרת גם הנחתה של האות וגם פיזור שלו

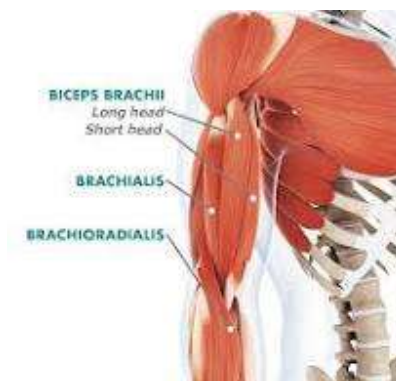
עובי רקמת שומן תת עורי	הנחתת האות	זווית פיזור
3 mm	69%	14°
9 mm	80%	17°
18 mm	10%	24°

טבלה 1 - הקשר בין עובי רקמת שומן תת עורי להנחתה ופיזור של אות EMG

בעבודה עם שרירים גדולים, אם כך, מומלץ להשתמש בחוטים מאריכים ל-3 האלקטרודות הזמינות על גבי החיישנים.

שריר זרוע

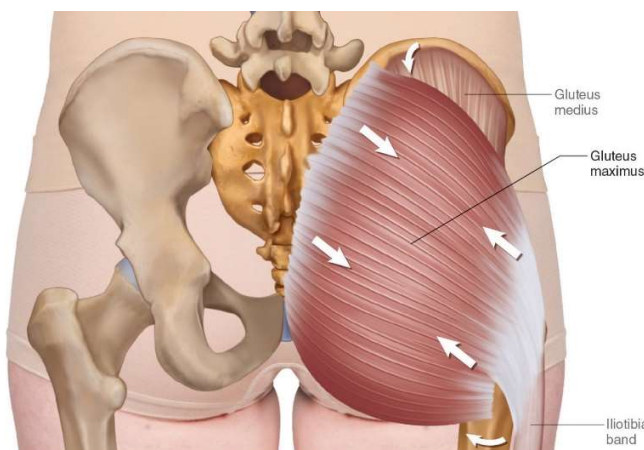
שריר הזרוע העליונה, ספציפית long head bicep, השריר המומלץ ביותר לשימוש על ידי החברה sparkfun לחיישנים, מתאפיין ברקמת שומן דקה יחסית ורקמת שריר עבה. השריר נפסל לשימוש בפרויקט זה מכיוון שידוע כי שימוש בעצבים באזור הגדם עלול לגרום לחזרה של כאבי פאנטום עבור קטועי יד.



איור 5 - שריר long head bicep

שריר ישבן

שרירי הישבן הם Gluteus maximus ו-Gluteus medius. המקסימוס הוא שריר דחיפה בעוד המדיאוס הוא שריר יציבה.



נציג את רמת האקטיבציה שלהם בעת ביצוע פעולות שונות על פי המאמר מאת Michael P.R & Lori A.B.

יחידות המידה לתיאור יכולת כיווץ שריר הינן MVIC (Maximum Voluntary Isometric Contraction) כולומר, הכיווץ האיזומטרי הרצוני המרבי של שריר מסוים ביחס לכיווץ המקסימלי האפשרי.

- רמת האקטיבציה של השרירים Gluteus Maximus/Medius עבור הפעולות הבאות מוצגת בטבלה 2 –
- רמת אקטיבציה של השרירים השונים בישיבה בתנוחות שונות - טבלה 2.
1. סקוואט חד-רגלי (Single-limb squat) - תרגיל סקוואט שבו מבצעים את התנועה על רגל אחת.
 2. עליית צד (Lateral step-up) - עלייה למדרגה מצד אחד, תוך שמירה על יציבות ורגל אחת נושאת בנטל.
 3. לאנג' במצב גב ניטרלי (Lunge neutral trunk position) - ביצוע הלאנג' תוך שמירה על זווית גוף ישרה ונטולת הטיית הגב.

פעולה	Gluteus maximus [MVIC]	Gluteus medius [MVIC]
סקוואט חד-רגלי	59% ± 27%	64% ± 24%
עליית צד	41%	41%
לאנג' במצב גב ניטרלי	36%	34%

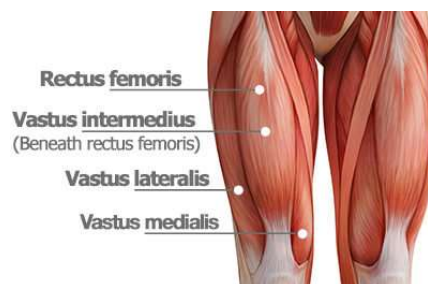
טבלה 2 – רמת אקטיבציה של השרירים השונים בישיבה בתנוחות שונות [4]

לאור נתונים אלו, בחרנו בפרויקט זה באופני הפעלת השריר הבאים כדי ליצור גילוי של אות בחיישנים:

- דחיפה של הרגל כלפי מטה בדומה לסקוואט
- כיווץ רצוני של שרירי הישבן

שריר רגל

שריר הרגל העליונה, ספציפית rectus femoris (RF), שהינו חלק מקבוצת שרירי ה-quadriceps (femoris), הוא שריר בעל רקמה שומנית דקה יותר משרירי הישבן, שניתן להפעלה בצורה דיסקרטית דומה.



איור 7 - שריר rectus femoris

נציג את רמת האקטיבציה שלהם עבור פעולות שונות על פי המאמר מאת NIH [5].

פעולה	rectus femoris [MVIC] עם קירוב הירך לחזה	rectus femoris [MVIC] ללא קירוב הירך לחזה
סקוואט (SQ)	43.66% ± 22.78%	24.10% ± 12.43%
פשיטת ברך (KE)	52.22% ± 22.07%	42.85% ± 23.26%
הרמת רגל ישרה (SLR)	21.64% ± 48.62%	21.25% ± 61.87%

טבלה 3 - רמת אקטיבציה של השרירים השונים בישוב בתנוחות שונות [5]

סקוואט (SQ): יש עלייה משמעותית באקטיבציה של ה-RF עם קירוב ירך, ולכן זו פעולה רצונית מתאימה להפעלת היד.

פשיטת ברך (KE): יש עלייה קלה באקטיבציה של ה-RF עם קירוב ירך, ולכן זו פעולה רצונית מתאימה קצת פחות להפעלת היד.

הרמת רגל ישרה (SLR): יש ירידה באקטיבציה של ה-RF עם קירוב ירך, ולכן פעולה זו אינה נשלטת ולא מתאימה לשליטה על היד.

לאור נתונים אלו, בחרנו בפרויקט זה באופני הפעלת השריר הבאים כדי ליצור גילוי של אות בחיישנים:

- בעמידה – נעילה של הברך או ביצוע סקוואט.
- בשכיבה – נעילה של הברך או הרמה של הרגל.
- בישיבה – הרמה של הרגל או דריכה שלה כלפי הרצפה.

השוואה בעוצמת האות בין שריר הישבן (GM) ושריר הרגל (RF)

על פי הנתונים שהוצגו קודם ניתן לראות ששריר הישבן (GM) הוא פשוט יותר לכיווץ מלא לעומת שריר הרגל (RF).

עם זאת, לפי כתב העת מאת José M Muyor & Isabel Martín [6], אם נתבונן בפעולה האפקטיבית ביותר, סקוואט (SQ), עוצמת האות הנמדדת דומה.

שריר	Concentric (Mean ± SD) [μV] התכווצות שריר	Eccentric (Mean ± SD) [μV] התארכות שריר
Gluteus maximus	168.68 ± 85.45	102.39 ± 39.25
Rectus femoris	178.14 ± 68.67	161.50 ± 57.64

טבלה 3 - השוואה בעוצמת אות EMG בין שריר הירך (RF) ושריר הישבן (GM)

עבור החיישנים הנתונים בפרויקט זה השימוש על גבי שריר הירך הקדמי (RF) מתאים יותר. רקמת השומן הדקה יותר באזור זה סיפקה אות יציב יותר, והוא מאפשר מיקום של האלקטרודות על גבי השריר באופן פשוט יותר.

בנוסף, נלקחה בחשבון גם החשיבות לאפשר למשתמש גישה נוחה להסיר או לחבר את החיישנים מכיוון שבחיבור החיישנים לשני שרירי הישבן יש צורך בשתי ידיים ולעיתים באדם נוסף ואילו בחיבור החיישנים לשרירי הרגל ניתן לעשות זאת עם יד אחת בלבד.

3.2 אופן לבישת המערכת

חיבורי רכיבי חומרה במערכת:

חיישני MyoWare מחוברים ישירות לרגל באמצעות מדבקות מוליכות (conductive gel). נקודת ה-reference משמשת כנקודת העיגון הראשית, בעוד שנקודות ה-mid וה-end מחוברות בהתאם לתצורה המוצגת המתאימה לשריר (נספח 1 – מיקומי אלקטרודות חיישנים).

החיישנים מחוברים באמצעות חוט עם סיכוך כפול אל Arduino Uno, אשר ממוקם באזור הבטן ונחגר סביב המותניים.

מיקום הלוח נקבע לאחר התייעצות עם משתמשת עתידית למערכת כדי להבטיח גישה נוחה לניתוק החיישנים במקרה הצורך.

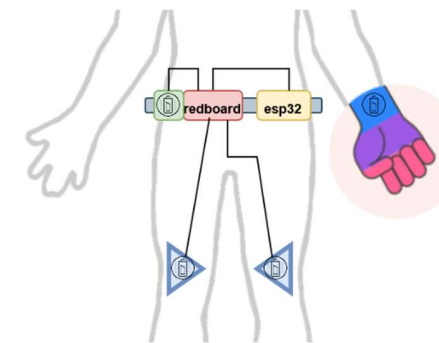
לוח ESP32 מחובר ל-Arduino Uno באמצעות חוט מסוכך והוא מעוגן אליו פיזית להבטחת יציבות וקליטת אות מיטבית.

מקורות המתח במערכת:

החיישנים מקבלים מתח מסוללה מקומית הממוקמת על לוח Shield Board, אשר מחובר ישירות אליהם.

לוח Arduino Uno מקבל מתח ממארז של 4 סוללות AA, המספקות כ-5 וולט, כאשר גם הסוללות עצמן מעוגנות לרצועה.

לוח ESP32 מקבל את המתח שלו ישירות מלוח ה-Arduino Uno.



איור 8 – אופן לבישת המערכת

בנוסף, מומלץ ללבוש נעליים עבות בעת שימוש במערכת, שכן נצפו תופעות רוויה קיצוניות בחיישנים כאשר הרגליים או הידיים באו במגע עם הרצפה או גוף שחוזה תופעות השראות מרשת קשיחה.

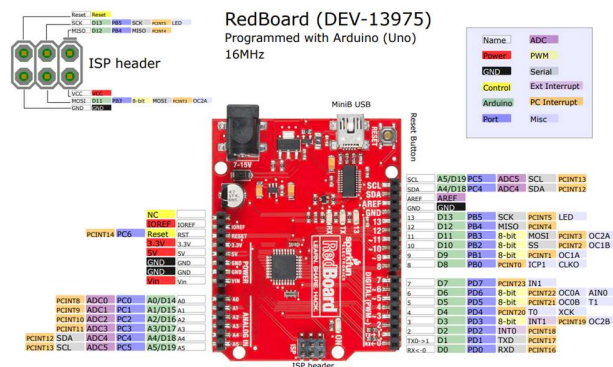
פרק 4 – תיאור חומרה

4.1 כרטיסים אלקטרוניים

Redboard - Arduino Uno

לוח פיתוח מבית SparkFun, שקול ל-Arduino Uno, שימוש בממיר USB-to-Serial CH340/FTDI, ותמיכה בתכנות דרך Arduino IDE.

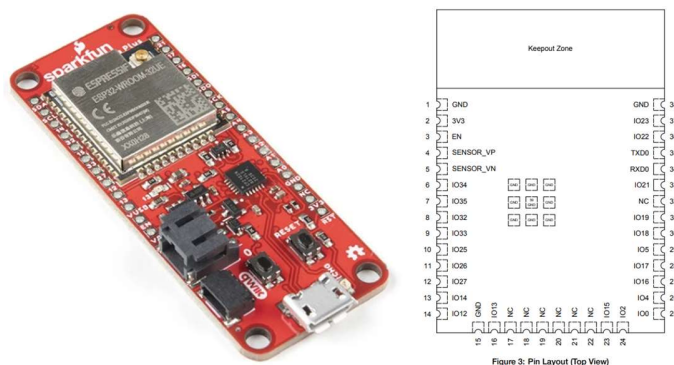
הלוח מבוסס על ATmega328P, פועל במתח 5V, וכולל כניסות אנלוגיות ודיגיטליות, מה שהופך אותו לאידיאלי לפרויקטים הדורשים חיבוריות קלה.



איור 9 – תיאור סכמתי של לוח RedBoard של SparkFun [7]

SparkFun Thing Plus

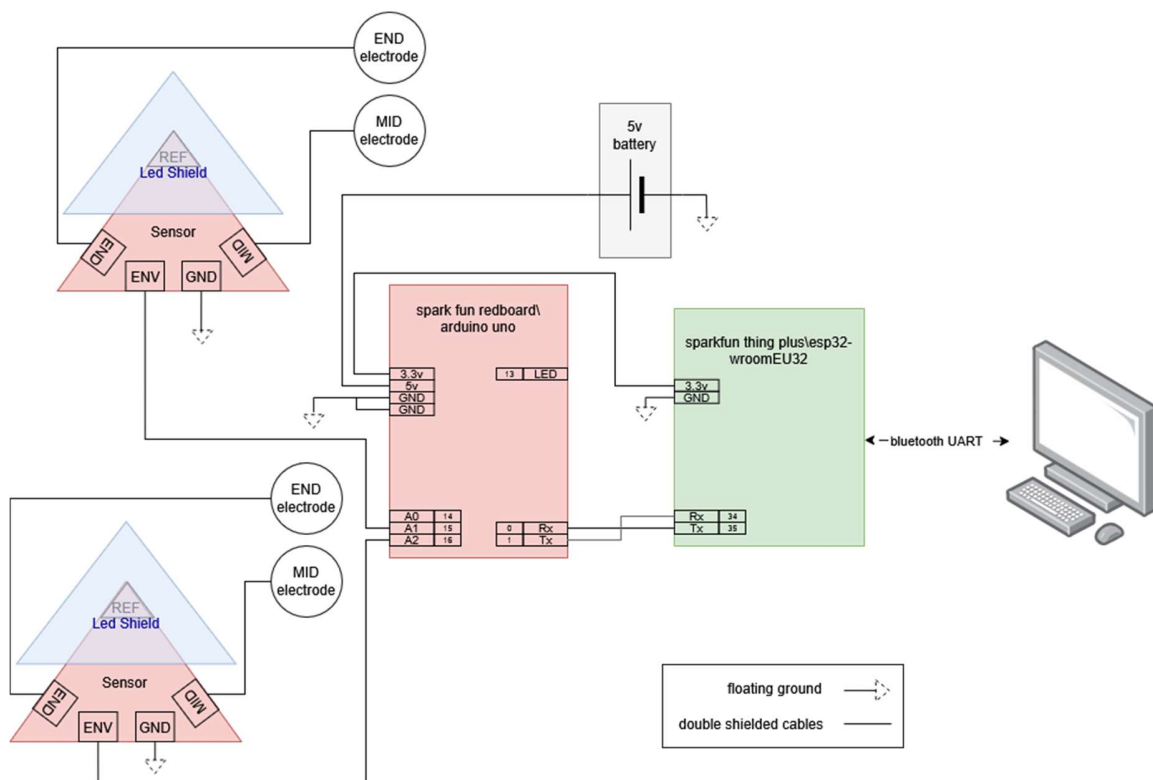
לוח פיתוח קומפקטי וחזק, מבוסס ESP32-WROOM. כולל Wi-Fi ו-BLE (Bluetooth), ולכן מתאים לפרויקטים הדורשים תקשורת אלחוטית. הלוח תומך ב-Arduino IDE, כולל מחבר USB-B וחיבורי GPIO רבים.



איור 10 – סכמת פינים של Sparkfun Thing Plus [8]

4.2 סכמה חשמלית מלאה

להלן סכמת החיבורים המלאה של רכיבי המערכת בגרסה העדכנית ביותר לפרויקט זה.



איור 11 – סכמה חשמלית של המערכת

על מנת למנוע מהחיישנים למדוד אותות חשמליים חיצוניים, המערכת כולה תוכננה כמערכת צפה לחלוטין. הדק המינוס של הסוללה משמש כ"אדמה צפה". כל החוטים במערכת הם חוטים עם סיכוך כפול. המערכת בנויה משילוב של 2 מיקרו בקרים: Arduino uno ו-esp32-wroom כדי לשמור על זמן הדגימה קבוע ככל האפשר.

פרק 5 – תיאור תוכנה

5.1 מבנה התוכנה – גרסת הקלטת אות

לצורך בניית המסנן לזיהוי לחיצות שריר, תחילה הוקלטו את האותות מהחיישן באמצעות המחשב. מכיוון שלא ניתן לחבר את המחשב ישירות לחיישנים, עמדו בפנינו שתי אופציות:

- (1) שימוש במבודד USB אופטי דיגיטלי בין לוח ה-redboard/arduino uno לבין המחשב.
- (2) כתיבה דיגיטלית של האות מתוך redboard לרכיב esp32 שכולל תקשורת Bluetooth ומשם שידור הנתונים למחשב.

בגלל קשיים של מלאי ואספקה, פרויקט זה מתמקד באפשרות השנייה.

Esp32-wroom תומך בתקשורת דיגיטלית חוטית באמצעות פרוטוקול UART (דרך חיבור usb-b או באמצעות pins RX/TX) על גבי הלוח וכן מסוגל לתקשורת Bluetooth, אך אינו מסוגל לבצע את שתי הפעולות במקביל.

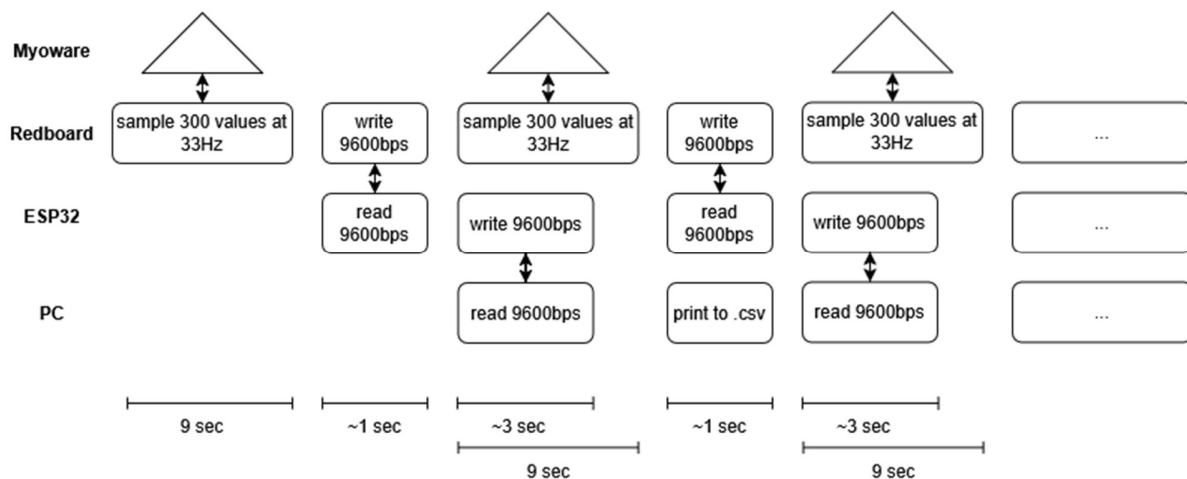
לוח RedBoard מקליט את האותות מהחיישנים של רגל ימין ורגל שמאל, כאשר כל רגל מחוברת בנפרד דרך כניסות אנלוגיות. הקלטת הנתונים מתבצעת לתוך שני מערכים בגודל מקסימלי של 300 ערכים בפורמט int. על מנת להבטיח תדר דגימה העולה על 20Hz, נקבע מרווח דגימה של 30 מילי-שניות, כמפורט להלן:

$$\begin{aligned}
 &30 \text{ [ms]} - \text{sample delay} \\
 &200 \text{ [\mu sec]} - \text{analog read from pins A1\&A2} \\
 &30.2 \text{ [m sec]} \text{ delay} \Rightarrow 33.11 \text{ Hz} > 20 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

משך זמן ההקלטה הכולל הוא כ-10 שניות. במהלך הדגימה נורה מספר 13 על גבי הלוח נשארה דלוקה כחיווי, ובזמן שליחה היא כבויה.

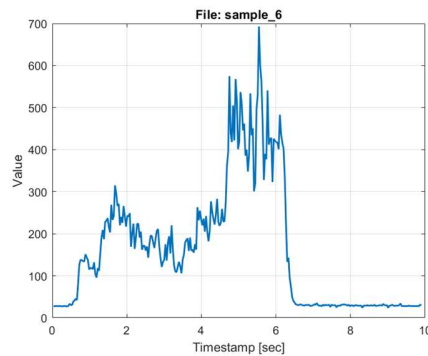
תהליך השידור מתבצע כך:

1. לוח Redboard דוגם מתוך החיישנים 300 ערכים במשך כ-10 שניות.
2. לוח Redboard פותח תקשורת בקצב 9600bps עם ESP32 ומשדר את ההקלטה באמצעות פרוטוקול UART.
3. לוח Redboard סוגר את התקשורת וחוזר לדגום מתוך החיישנים.
4. מיקרו מעבד ESP32 מקבל את ההקלטה. כאשר נסגרת התקשורת הוא יוצר קשר עם המחשב באמצעות Bluetooth ומשדר את תוכן האותות המוקלטים למחשב.



איור 12 – תיאור אלגוריתם - גרסת הקלטת האות

דוגמא לאות מוקלט:



איור 13 – דוגמא לאות מוקלט – גרסת הקלטה – לחיצה ארוכה

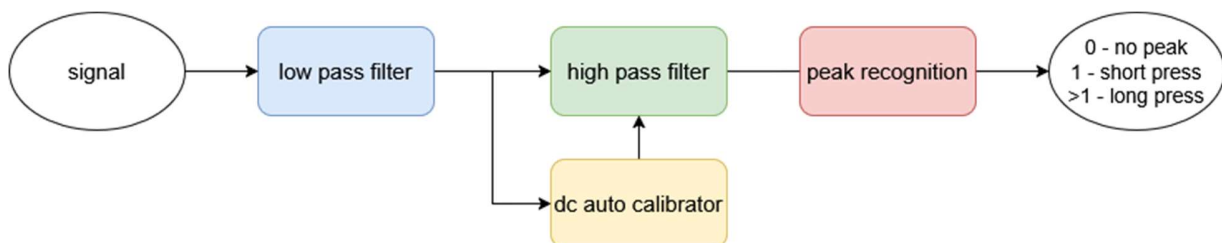
פירוט הוראות הפעלה לתוכנה של חיבור Bluetooth למחשב נמצא בנספח 2 – מציאת com קריאה וכתבייה BLUETHOOTH לוח-מחשב.

5.2 מבנה התוכנה – גרסת השימוש

5.2.1 לוח REDBOARD

תפקידי הלוח בגרסה זו של המערכת הם:

1. דגימה רציפה של האות בתדר קבוע
2. סינון רעש
3. כיול אוטומטי של ערך DC במנוחה
4. זיהוי כיווצים מכוונים בשריר



איור 14 - אלגוריתם UNO – תרשים זרימה

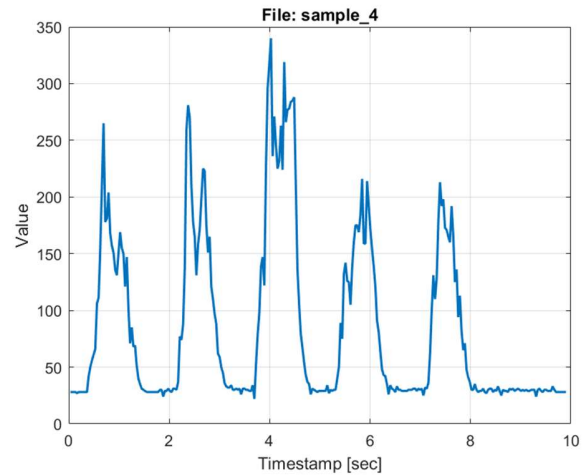
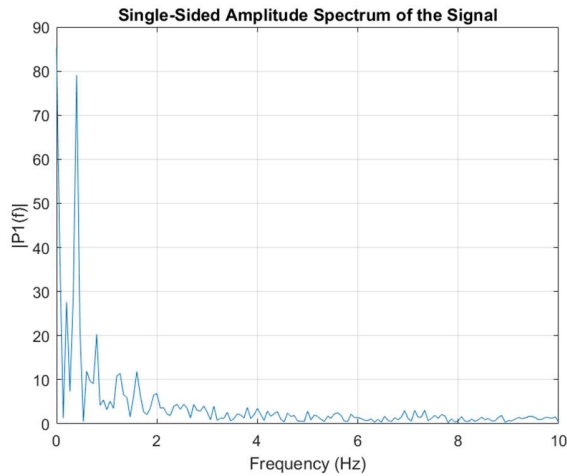
דגימה רציפה של האות

האות נדגם על ידי הלוח משני החיישנים. בניגוד לגרסת ההקלטה, קצב הדגימה נקבע להיות כ-30Hz וניתנה תשומת לב מיוחדת במהלך כתיבת הקוד לבצע מספר קבוע של פקודות, ככל הניתן, כדי לשמר את קצב הדגימה הזה.

סינון הרעש

מטרת סינון הרעש בשלב זה של המערכת הוא יצירת מעטפת חלקה לאות המקורי כדי לאפשר זיהוי נקודות שיא אשר יצביעו על כיווצים רצוניים של השריר.

תחילה אות מוקלט מראש נבחן בתחום התדר:



איור 15 – אות לדוגמא דגום ב-30Hz לצד התמרת FFT של האות – 5 כיווצי שריר רגל עליונה

תדר הדגימה הוא 30Hz.

תדר הקיטעון (cutoff) שנבחר כדי להפיק את פונקציית המעטפת של האות הוא 0.8Hz. תחום תדרים זה נקבע בעיקר על בסיס ניסוי וטעיה, תוך התאמה מדויקת למאפייני האות שנמדד.

המסנן שנבחר הוא Low Pass Filter מסוג Butterworth מכיוון שהוא מציע תגובה חלקה.

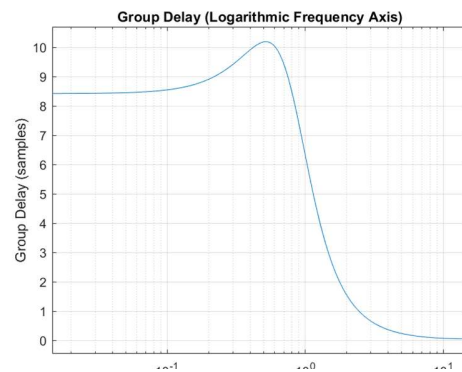
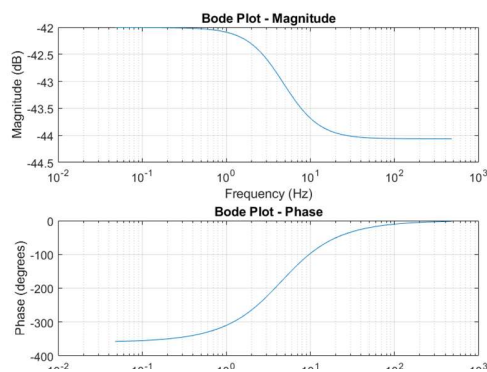
לאחר מכן, המסנן הומר למסנן בדיד בתחום הזמן:

$$y[t] = a_0 y[t-1] + a_1 y[t-2] + b_0 x[t] + b_1 x[t-1] + b_2 x[t-2]$$

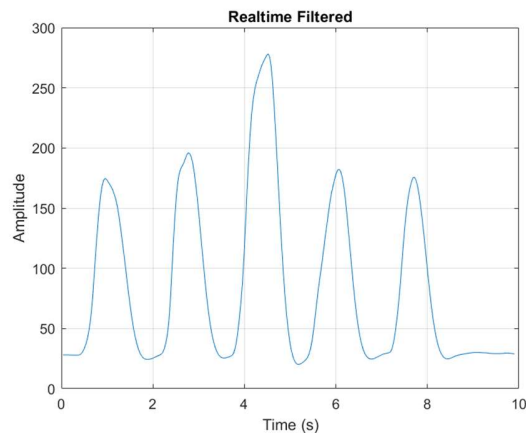
$$a = [1.76452384 \quad -0.78946712]$$

$$b = [0.00623582 \quad 0.01247164 \quad 0.00623582]$$

חישוב המקדמים נעשה באמצעות קטע קוד מוכן מראש מאת curiores [9].



איור 16 – תרשים בודה ו-group delay של מסנן lowpass מסוג butterworth מסדר שני



איור 17 – מעטפת של אות – 5 כיווצי שריר רגל עליונה לאחר סינון

כיוול אוטומטי של ערך DC במנוחה

אחד האתגרים במערכת שנבנתה הוא תופעות רוויה בחיישנים, לכן התבקש להוסיף איזשהו רכיב שיתפקד כ-HPF. מצד שני, הייתה כוונה לשמר למערכת את היכולת לתמוך בזיהוי לחיצות ארוכות.

לשם כך תוכנן אלגוריתם כיוול אוטומטי אשר לומד את ערך ה-DC של האות בזמן מנוחה ממושכת מאוד ומחסר אותו מהאות המסונן.

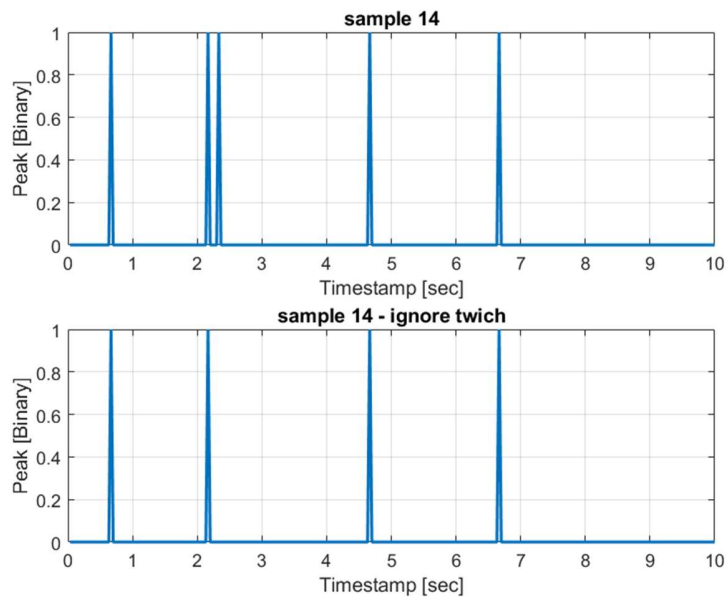
האלגוריתם מחפש חלון זמן במשך כ-128 דגימות או כ-4 שניות בהן יש שקט יחסי, כלומר כאשר ההבדל בין הערך המקסימלי לערך המינימלי הוא מתחת לסף מסוים, וקובע את ערך ה-DC בתור הממוצע של חלון זה.

המגבלה ל-128 היא בעקבות מגבלת זיכרון בלוח Arduino uno.

זיהוי כיווץ בשרירים

קביעה האם שריר מתכווץ מתבצעת על ידי איתור עלייה וירידה של האות מעל ומתחת לסף מוגדר. הסף עצמו נקבע על פי הערך המקסימלי שנצפה כאשר השריר במנוחה, כאשר לאחר סינון הנתונים במהלך העבודה על הפרויקט, נקבע כי ערכו הוא 20. לחיצה ארוכה מוגדרת להיות 30 דגימות מרגע עליית האות ועד לירידה שלו חזרה מתחת לסף, כלומר משך שניה אחת.

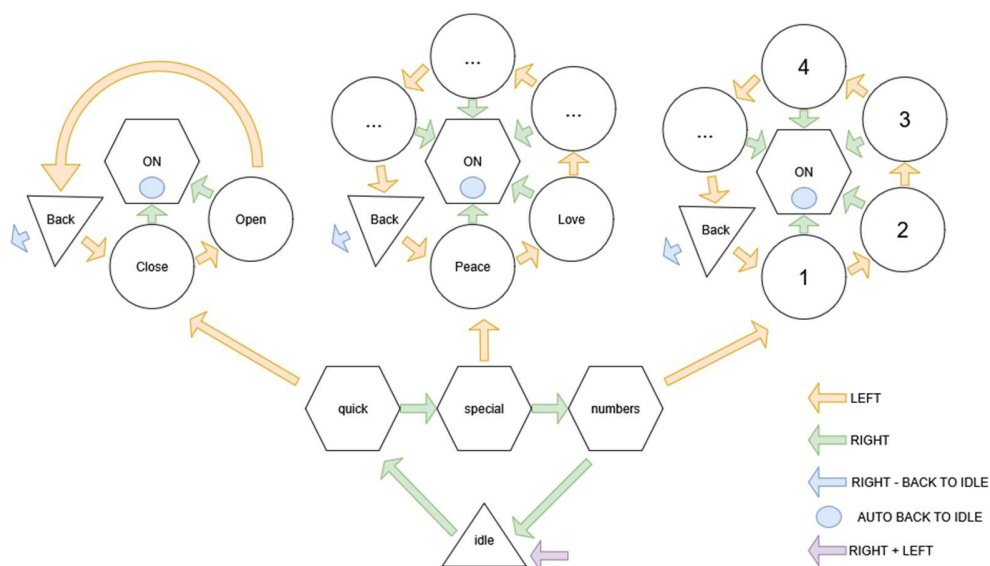
במקרים מסוימים, ככל הנראה בשל תסמין ריתוע (twitching), מתרחשת ירידה רגעית באות שעלולה להתפרש כשני כיווצים נפרדים. כדי למנוע זיהוי שגוי, האלגוריתם מתעלם מחציית הסף כלפי מעלה למשך שנייה אחת לאחר זיהוי מוצלח של כיווץ שריר.



איור 18 – השוואה בין גילוי כיוון שריר ללא התחשבות בעיוותים לעומת אחרי התחשבות בעיוותים

5.2.2 לוח ESP32-wroom-EU32

גרסת תוכנה זאת נועדה לקליטה של איתות על זיהוי לחיצות שריר מ-Arduino uno וניהול מערכת מצבים שמתרגמת רצפים של לחיצות לפעולה של היד הרובוטית. הגרסה הזאת של האלגוריתם לא לוקחת בחשבון לחיצות ארוכות, פיצ'ר שצורך בשלבים מאוחרים יותר של הפרויקט וטרם כוללת את התקשורת עם היד הרובוטית עצמה. השיטה צורפה בעיקר לצורך הדגמת שימוש.

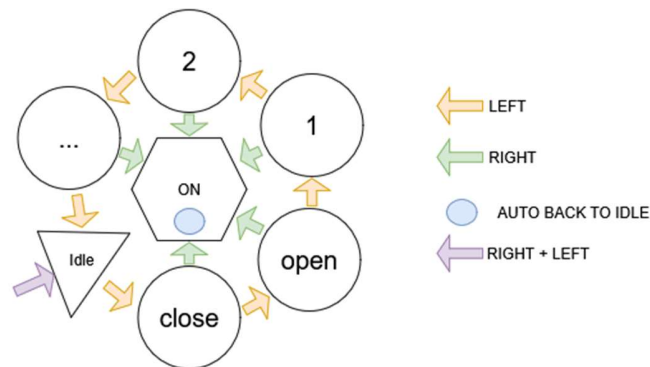


איור 19 – תרשים זרימה מכונת מצבים מלאה

מכונת המצבים המוצעת מבוססת על מעגל ראשי שמאפשר מעבר בין סוגי פעולות ותתי מעגלים לבחירת פעולה ספציפית.

בכל שלב ניתן לחזור למצב Idle במעגל החיצוני באמצעות כיווץ שני השרירים, הימני והשמאלי, ביחד. העקרון הוא לאפשר גישה מהירה לפקודות בשימוש תדיר כמו פתיחה וסגירה, תוך תמיכה במגוון רחב של פעולות.

גרסה נוספת, פשוטה יותר, של המערכת כוללת מעגל יחיד ומספר אפשרויות מצומצם יותר.



איור 20 – תרשים זרימה מכונת מצבים מצומצמת

חשוב לציין ששימוש בחיישנים אשר נמצאים על שתי הרגליים בו זמנית דורש את המיומנות להפעיל כל שריר בנפרד. במקרה שבו המשתמש מתקשה לבצע פעולה זו, ניתן להחליף את השימוש בשתי הרגליים, בכיווץ השריר לפרקי זמן שונים עם רגל אחת בלבד.

פרק 6 – מימוש מערכת לפי הנחיות יצרן – גרסה שנדחתה

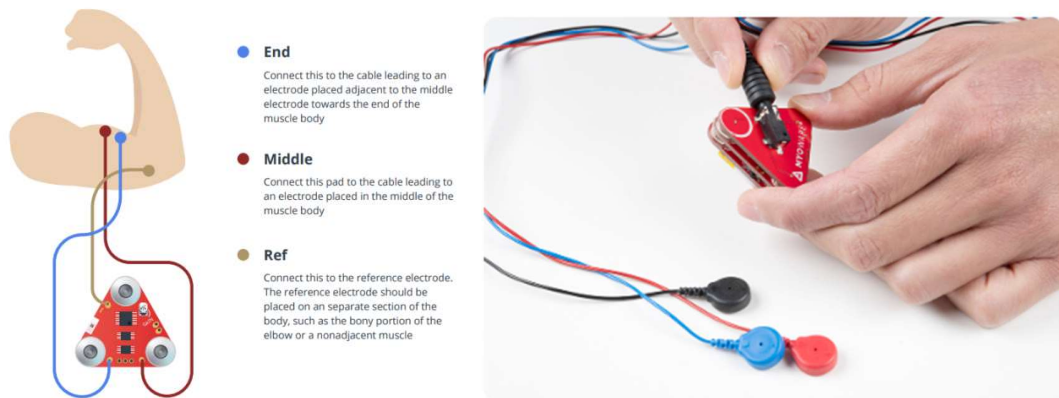
6.1 תיאור המערכת

המטרה הראשונית של הפרויקט הייתה שימוש בשריר הישבן לשליטה ביד וחיבורו באופן קווי לשריר וללוח ארדואינו ייעודי שנקנה בערכה המלאה של MYOWARE [2].

חיבור החיישן לשריר – Cable Shield:

בחיבור שריר קטן יחסית כמו שריר היד, ניתן לחבר את החיישן ישירות לאלקטרודות המודבקות על השריר. במקרה של שרירי הישבן והירך, הם ארוכים ביחס לגודל החיישן, ולכן יש צורך בשימוש בכבלים ייעודיים ובלוח ייעודי המחבר אותם לחיישן. לוח זה נקרא cable shield והוא הומלץ לשימוש במדריך.

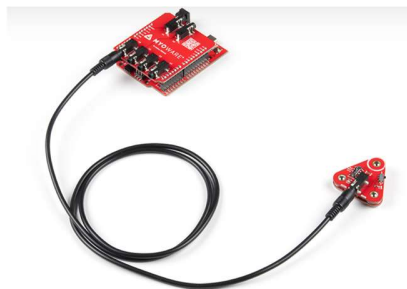
▶ PLEASE NOTE: MyoWare 2.0 Cable Shield is recommended.



איור 21 – חיבור cable shield לאלקטרודות

חיבור החיישן ללוח הארדואינו:

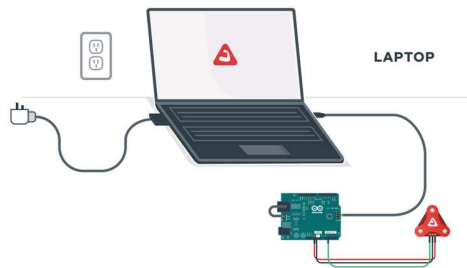
במהלך העבודה נעשה שימוש בלוח Arduino Shield, שמחובר ללוח Link באמצעות כבל TRS-to-TRS. לוח ה-Link מתחבר ישירות לחיישן, בעוד שלוח ה-Arduino Shield מחובר ישירות ללוח Arduino Uno. חיבור לוח ה-link לא מאפשר חיבור במקביל של לוח ה-Led Shield שהוא האינדיקטור הטוב והמדויק ביותר לניטור האות הנמדד על ידי החיישן.



איור 22 – חיבור מומלץ של לוח ארדואינו

חיבור לוח הארדואינו למחשב:

לוח ה-Arduino Uno חובר ישירות למחשב הנייד באמצעות כבל USB-to-USB Type C, תוך שמירה על ניתוקו ממקור חשמל על מנת למנוע רעש, כפי שצוין בהנחיות המדריך. בחיבור זה אין צורך בסיפוק מתח נוסף ללוח הארדואינו, כיוון שהוא מוזן מהמחשב הנייד.



איור 23 - חיבור מומלץ של החיישן למחשב הנייד

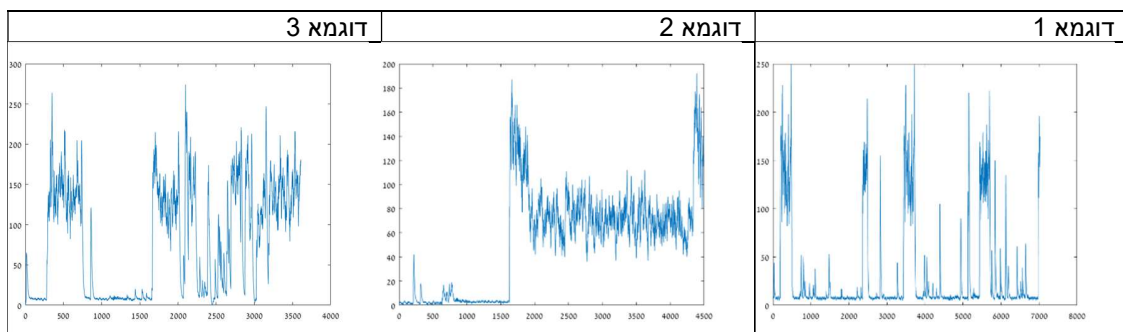
6.2 קליטת האות

בשלב זה של הפרויקט המטרה הייתה להשיג הקלטה יציבה של האות בזמן מנוחה ובעת ביצוע מספר פעולות של כיווץ השריר כדי לנתח את האות, לתכנן מסנן מתאים להתמודדות עם תופעת הרעש וזיהוי כיווצים בשריר.

קצב דגימת האות היה כ-30Hz והאותות הוקלטו למחשב באמצעות קטע קוד שמדפיס לתוך קובץ טקסט את התוכן שמתקבל ב-com ספציפי במחשב.

את הדגימות הצגנו באמצעות MATLAB.

מספר דגימות לדוגמא:



איור 24 – דוגמאות לתוצאות גרסה ראשונה

דוגמא 1 – חמישה כיווצי שריר עוקבים

דוגמא 2 – לחיצה אחת ארוכה

דוגמא 3 – חמישה כיווצי שריר במהלכם החיישנים נכנסו למצב של רוויה

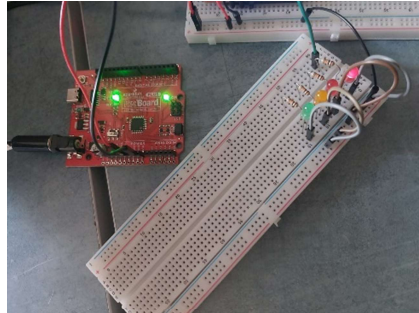
6.3 מסקנות

בגרסה הנוכחית של המערכת נעשה שימוש ב-Link Shield, וכתוצאה מכך לא התקבל חיווי למשתמש על מצב החיישנים או על עוצמת הלחיצה. בשל מגבלה זו, לא ניתן היה להבחין במצבי רוויה של החיישנים בזמן אמת, אלא רק לאחר ניתוח האותות במחשב.

צורך במשוב למשתמש:

במיוחד בשלבי הפיתוח והאימון של משתמשים חדשים ישנה חשיבות רבה למתן חיווי בזמן אמת על תקינות החיישנים ועוצמת האות הנקלט. לכן, בוצעו מספר ניסיונות לפתח שיטת מעקב חיצונית שתספק משוב מיידי למשתמש.

ניסיון לספק חיווי באמצעות נורות: LED
 אחת השיטות שנוסו הייתה חיבור נורות LED נפרדות למערכת, אך התברר כי עצם חיבור הנורות גרם לרעיוות החיישנים והשפיע על איכות קריאת האותות. בשל השפעה שלילית זו, הרעיון ננטש.



איור 25 – חיבור מערך נורות צבעוניות כמשוב לחיישנים

בעקבות הממצאים הוחלט לוותר על השימוש ב-Link Shield ו-Link Board ולשקול פתרונות חלופיים שיאפשרו מתן חיווי למשתמש ללא פגיעה בפעולת החיישנים.

אחד היתרונות של השימוש ב-Link Shield הוא הסיכון המוגבר של החוטים, אשר הפחית הפרעות ורעשים במערכת. בעקבות זאת, בשלבים מתקדמים יותר של הפרויקט, שולבו חוטים מסוככים מהסוג הזה גם בחיבור הישיר ללוחות החיישנים, וזאת ללא השימוש ב-Link Shield עצמו.

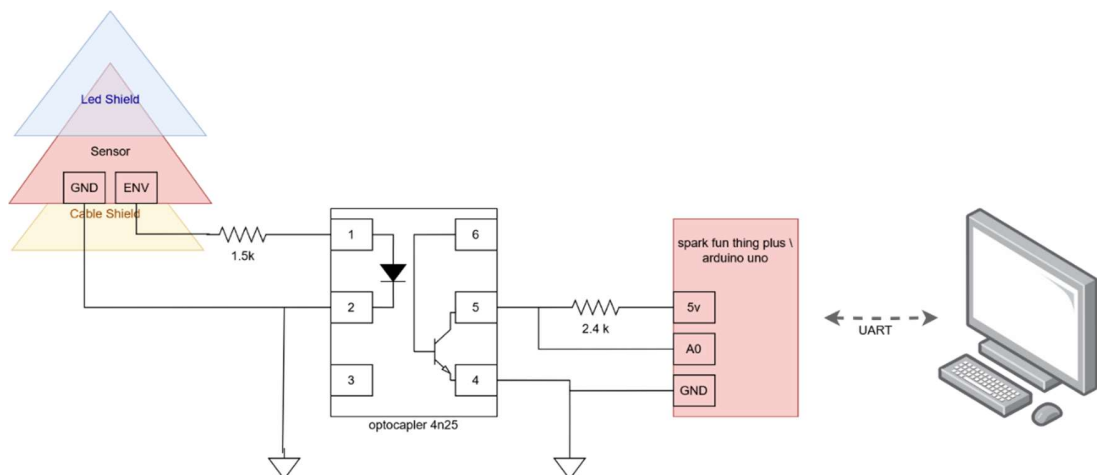
בנוסף, כדי לשפר את יציבות המערכת ולשמור עליה כמערכת צפה, נעשה בשלב זה של הפרויקט מעבר לשימוש בסוללות נטענות כמקור מתח. הלוח Arduino redboard מאפשר חיבור למערכת סוללות כזה.

פרק 7 – מימוש מערכת באמצעות מבודד אופטי – גרסה שנדחתה

7.1 תיאור המערכת

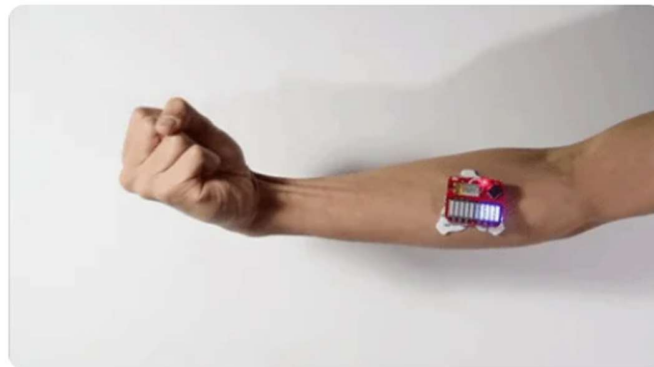
על מנת להתמודד עם הרעש ולפי המלצת sparkfun ניסינו לשלב איזשהו רכיב מבודד בין החיישנים לבין הלוח arduino uno.

הוחלט לנסות להשתמש במבודד אופטי optocapler מסוג 4n25 [10] לפי הדיאגרמה הנ"ל:



איור 8 – תרשים מערכת עם מבודד אופטי

החיישנים חוברו לשריר הנבחר – יד, רגל או ישבן, באמצעות ה-cable-shield והחוטים הנלווים. מקור המתח לרכיב ה-Arduino uno בשלב זה הוא חיבור מחשב או חיבור סוללות ומקור המתח עבור החיישנים הוא לוח leds-shield שהגיע עם הערכה. חיבור leds-shield במקום link-shield סיפק משוב מיידי והכרחי על האות הנקלט בחיישנים ואיפשר לעקוב אחר תופעות של רעש ורוויה גם ללא חיבור למחשב. חיבור פיזי למחשב בשלב זה היה כמעט בלתי אפשרי מכיוון שהוא גרם לרוויה של האות.



איור 26 – לוח led-shield

באמצעות מד מתח נייד (מבוסס סוללות) ניתן למדוד את האות שנקלט על ידי Arduino uno. בעקבות חיבור של המבודד האופטי האות נקלט במהופך, כלומר:

- שריר פעיל – לוח לדים דולק – מתח נמדד במד מתח קטן מ-5 וולט
- שריר במנוחה – לוח לדים כבוי – מתח נמדד במד מתח גדול מ-5 וולט

במערכת הנ"ל ניתן לראות שינויים באות אבל הובחנו מספר אפקטים השראותיים של קפיצות אקראיות באות (רעש) ורוויה (מתח DC קבוע).

שיטות לצמצם את הרעש:

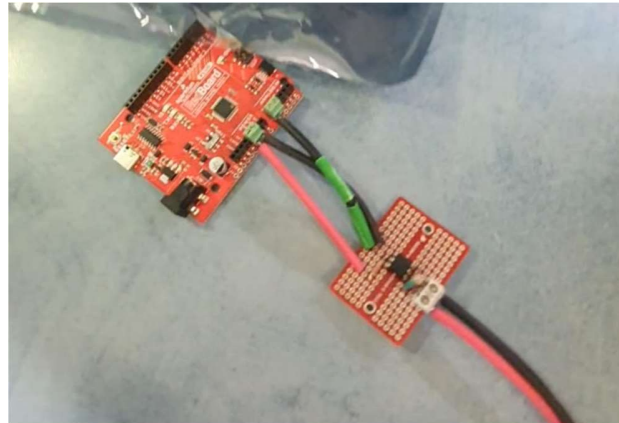
ניתן למגר את האפקטים הללו באמצעות כלוב פראדיי, שניתן ליצור למשל על ידי הזזה של יד מעל המעגל החשמלי, אך שיטה זו לא עבדה בצורה עקבית.

7.2 שיטות למיגור רעש

על מנת להתמודד עם הרעש במערכת נבחנו מספר שיטות:

1. מעגל צף – לפי היצרן לא מומלץ לחבר את המערכת לאף סוג של רשת קשיחה ללא רכיב מבודד. כחלק מהעבודה עם החיישנים, נצפה כי גם בעת שימוש באופקטוקפלר כמבודד אופטי, לא ניתן לחבר את המערכת שכוללת את החיישנים לאף רשת קשיחה או מקור מתח "חזק" כלל. לדוגמא, חיבור למחשב נייד אפשרי בדגמים מסוימים כאשר המחשב במצב סוללה חלשה לקראת כיבוי. התקשורת עם המחשב נעשתה באמצעים חלופיים בשלבים מתקדמים יותר של הפרויקט.
2. קליעת חוטים – קליעת כל החוטים במערכת לצמה כדי לצמצם אפקט השראות בין החוטים.
3. שימוש בשקית אנטי-סטטית – עטיפה של רכיבים שונים במערכת באמצעות שקית אנטי-סטטית כדי למנוע השראות הדדית – השיטה לא אפקטיבית.
4. כלוב פראדיי – נצפה כי הזזה של יד מעל המערכת, ספציפית מעל המעגל החשמלי שכולל את המבודד האופטי, מקטינה ואף מבטלת את אפקט הרעש והרוויה. לכן, נבחנה האפשרות ליישם כלוב

פראדיי באמצעות עטיפה של המערכת בבד מוליך והצמדתו לרגל, או באמצעות כלוב פראדיי חלקי משאריות מחשב ישן. שתי האפשרויות הובילו לשיפור, אבל לא למניעה מוחלטת ועקבית של הרעש.



איור 27 – מערכת משולבת optocapler

שילוב רעיונות אלו זה נראה כפתרון המבטיח ביותר, אבל הצורך בכלוב פראדיי לסיכוך הפך את המערכת למסורבלת ולעיתים עדיין נצפו תופעות רוויה. הגרסה הבאה שנבדקה סיפקה אות רועש פחות ואמין יותר ולכן התקדמנו איתה.

פרק 8 – סיכום ומסקנות

8.1 תוצאות

את תוצאות המערכת הסופית ניתן להעריך רק בצורה איכותית, שכן בחיבור נכון של החיישנים נצפתה הצלחה של 100% בזיהוי כיווצי שריר על רגל אחת בשיבה.

בשימוש בחיישנים בשתי רגליים יחד, נצפה קושי מסוים שנובע בעיקר מחוסר מיומנות של המשתמש לכווץ שריר אחד בזמן הרפיית השריר הסימטרי. לאחר מספר דקות של תרגול נצפה שיפור.

בזכות המשוב מהחיישנים דרך לוח led shield, יצירת איתות של לחיצה ארוכה ושל לחיצה קצרה היה מאוד אינטואיטיבי למשתמש ולא דרש זמן תרגול כלל ולכן נציע זאת כאופציה למשתמשים אשר מתקשים עם הפעלה מבודדת של שרירי הירך.

למערכת 2 נקודות חולשה עיקריות:

1. תופעת הרוויה בחיישנים הופחתה משמעותית אך לא נעלמה לחלוטין. לאחר שימוש ממושך (מספר שעות) החיישנים נכנסים לרוויה מוחלטת ומפסיקים להגיב. על מנת לתקן את בעיה זו, מומלץ לכבות את החיישנים למשך כשעה.
 2. המערכת מאוד רגישה להשפעות חיצוניות – כל מגע קטן עם מקור אור חזק יותר מהאורות החשמלי בשריר גורם לחיישנים למדוד את ההפרעה ברמה שלא מאפשרת סינון של האות הרצוי כלל (הדוגמא הקיצונית ביותר היא המקרה שבו מונח כבל מאריך על גבי שולחן עץ מלא וכל מגע בשולחן הכניס את החיישנים לרוויה מוחלטת).
- קיימת השהיה מסוימת בין כיווץ השריר (אשר מקבל משוב מיידי מלוח led shield) לבין האיתות על הלחיצה. ההשהיה נוצרת בעקבות מספר גורמים:
1. על מנת להבדיל בין לחיצות ארוכות לקצרות, זיהוי של לחיצה נעשה בעת שחרור השריר ולא בעת כיווץ.

2. האות שנדגם על ידי הלוח Arduino uno עובר סינון lowpass מסדר שני אשר יוצר עיכוב חבורה בשיעור של כ-10 דגימות (מתואר בנספח 3 – תכן מסנן LPF).
3. שליחת האיתות ב-Bluetooth עצמה לוקחת כשנייה ולכן זהו המקור העיקרי להשהיה.

8.2 מסקנות

בפרויקט זה תוכננה ומומשה מערכת לקריאת אותות EMG משרירי הירך, אשר מבצעת סינון ועיבוד נתונים במטרה לזהות רצף כיווצים של השרירים ולהמירם לפקודות להפעלת יד רובוטית. בשלב הבא של הפרויקט, מתוכננת הרחבה שתאפשר אינטגרציה עם ממשק התקשורת של היד הרובוטית, שהתבסס על פרויקטים קודמים.

המערכת הוכיחה יכולת מהימנה בזיהוי כיווצי שריר כאשר המשתמש נמצא במצב ישיבה. עם זאת, עקב תפקידים הקריטי של שרירי הירך והישבן בשמירה על היציבה, המערכת פחות אמינה במצב עמידה ואינה מתפקדת כלל בזמן הליכה.

לפי הממצאים של פרויקט זה, נראה כי המערכת אינה מתאימה לשימוש עצמאי ממושך להפעלת יד רובוטית, ולכן מומלץ לשלב אותה כחלק ממערכת חיישנים רחבה יותר.

יכולת הזיהוי של לחיצות ממושכות נמצאה מבטיחה במיוחד, למשל לביצוע פעולות עדינות כגון סיבוב חלקי של היד הרובוטית או סגירה הדרגתית של האצבעות.

החיישנים ששימשו בפרויקט סיפקו הוכחת היתכנות למערכת מבוססת EMG, אך מומלץ לשדרגם לחיישנים מדויקים יותר, במיוחד לצורך שימוש ממושך ואמין.

פרק 9 – הצעות להמשך

9.1 מערכת לבישה

המערכת הלבשה מכילה רכיבים רבים ולוחות גדולים ומסורבלים, מה שעלול לפגוע בניידות ובנוחות השימוש. ניתן להחליף את השילוב של Arduino Uno ו-ESP32-WROOM בלוח קומפקטי יותר, בעל שתי ליבות, אשר יאפשר לשמר את ההפרדה בין הדגימה לניהול מערכת המצבים.

כמו כן, מומלץ להשתמש בסוללה נטענת קטנה יותר, שתשפר את ניידות המערכת ותאפשר שימוש ממושך ונוח יותר. שינוי זה יתרום לצמצום מימדי המערכת, לשיפור הנוחות ולהפחתת כמות הרכיבים הנדרשים לחיבור.

אפשרות נוספת היא להשתמש במיקרו-מעבדים קטנים כגון Arduino Nano עם תמיכה ב-Bluetooth אשר יחברו ישירות לחיישנים הממוקמים על גבי הרגל. פתרון זה נועד להחליף את החוטים המחברים בין החיישנים למיקרו-מעבד האחראי על קבלת ההחלטות (בפרויקט זה ESP32-WROOM) ובכך לשפר את גמישות המערכת ולהפחית את המורכבות שלה.

9.2 מטרה שונה

מכיוון שהמערכת משתמשת בשרירים שתפקידם הראשי הוא יציבה, האות האמין ביותר מתקבל בישיבה. לכן, נציע לשלב את החיישנים במערכת שעיקר פעולתה הוא ישיבה. למשל, כחלק ממערך הפעלה של עכבר מחשב או עבור קיצורים במקלדת.

9.3 שילוב של לחיצה ארוכה

בשלביו האחרונים של הפרויקט, לאחר הוספת הכיול האוטומטי, נוספה למערכת יכולת לתמוך בזיהוי לחיצה ארוכה לפרקי זמן שונים. ניתן לשלב סוג אות זה בתוך מערך חיישנים נוספים, ובכך להרחיב את אפשרויות השליטה של המערכת.

9.4 בחירת קבוצת שרירים אחרת

אחד האתגרים המרכזיים בפרויקט היה החיבור לקבוצות שרירים שתפקידן העיקרי הוא שמירה על יציבה, מה שהוביל לתפקוד פחות יעיל של המערכת בזמן עמידה. מנגד, חשוב לבחור קבוצת שרירים בעלת רקמת שומן דקה, כדי לשפר את איכות האותות ולשמור על דיוק ויציבות במדידות.

בפרויקטים עתידיים מוצע לבחון את קבוצת השרירים המחוברת לשכמות בשרירי החזה (אצל גברים).

9.5 תמיכה בלחיצות ארוכות יותר

משך זיהוי לחיצה ארוכה שנתמך על ידי המערכת הוא כ-4 שניות, וזאת בעקבות מגבלות זיכרון ברכיב Arduino Uno.

להלן שתי הצעות לשיפור:

1. ניתן להחליף את הלוח UNO בלוח עם זיכרון RAM גדול יותר, ובכך לאפשר לו להחזיק מערך גדול יותר.
2. בפרויקט זה נעשה שימוש במערך של 128 משתנים מסוג int שגודלו 16bit אך למעשה כדי לייצג את ערכי הדגימה מתוך החיישנים מספיק להשתמש ב 10bit ובכך לתמוך במערך גדול יותר ללא זיכרון נוסף.

- [1] sparkfun, "mayoware . ", Available: [https://myoware.com./](https://myoware.com/)
- [2] sparkfun, "Advanced Guide . ", Available: https://myoware.com/wp-content/uploads/2022/03/MyoWare_v2_AdvancedGuide-Updated.pdf.
- [3] M. M. L. a. N. S. .. S. T. A. KUIKEN, "The effect of subcutaneous fat on myoelectric signal amplitude and cross-t . ", Available: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.3109/03093640309167976>.
- [4] L. A. B. Michael P Reiman, "A literature review of studies evaluating gluteus maximus and gluteus medius activation during rehabilitation exercises . ", Available: https://www.researchgate.net/publication/51728472_A_literature_review_of_studies_evaluating_gluteus_maximus_and_gluteus_medius_activation_during_rehabilitation_exercises.
- [5] NIH national library of medicine, "Quadriceps Electromyographic Activity in Closed and Open Kinetic-Chain Exercises with Hip-Adductor Co-Contraction in Sedentary Women . ", Available: [https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9566802./](https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9566802/)
- [6] I. M.-F. ., D. R.-R. J. A. A.-V. José M Muyor, "Electromyographic activity in the gluteus medius, gluteus maximus, biceps femoris, vastus lateralis, vastus medialis and rectus femoris during the Monopodal Squat, Forward Lunge and Lateral Step-Up exercises . ", Available: [https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7112217./](https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7112217/)
- [7] sparkfun, "RedBoard (DEV-13975) . ", Available: <https://cdn.sparkfun.com/assets/1/3/5/9/6/Redboardv2.pdf>.
- [8] sparkfun, "SparkFun Thing Plus - ESP32 WROOM (Micro-B) . ", Available: https://cdn.sparkfun.com/assets/4/3/1/7/6/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en_v1-6.pdf.
- [9] curiores, "Real Time LPF Guide on Arduino . ", Available: <https://github.com/curiores/ArduinoTutorials/blob/main/BasicFilters/Design/LowPass/ButterworthFilter.ipynb>.
- [10] Vishay Semiconductors, "Optocoupler, Phototransistor Output, with Base Connection . ", Available: <https://www.vishay.com/docs/83725/4n25.pdf>.
- [11] physipedia, "physipedia . ", Available: https://www.physio-pedia.com/Gluteus_Medius.
- [12] sparkfun, "Quick Start Guide . ", Available: https://myoware.com/wp-content/uploads/2022/03/MyoWare_v2_QuickStartGuide.pdf.

רשימת איורים

6.....	איור 1 – מבנה כללי של המערכת.....
7.....	איור 2 – חיישן MAYOWARE.....
8.....	איור 3 - מיקום שגוי של האלקטרודות עלול לגרום לשינויים באות הנמדד.....
8.....	איור 4 - מפה של השרירים ונקודות הרפרנס (נקודות רפרנס כנקודות שלמות משמאל).....
9.....	איור 5 - שריר long head bisap.....
10.....	איור 6 – שריר GLUTATEMUS.....
10.....	איור 7 - שריר rectus femoris.....
12.....	איור 8 – אופן לבישת המערכת.....
13.....	איור 9 – תיאור סכמתי של לוח RedBoard של SparkFun.....
13.....	איור 10 – סכמת פינים Sparkfun Thing Plus.....
14.....	איור 11 – סכמה חשמלית של המערכת.....
15.....	איור 12 – תיאור אלגוריתם - גרסת הקלטת האות.....
16.....	איור 13 – דוגמא לאות מוקלט – גרסת הקלטה – לחיצה ארוכה.....
16.....	איור 14 - אלגוריתם UNO – תרשים זרימה.....
17.....	איור 15 – אות לדוגמא דגום ב 30Hz לצד התמרת FFT של האות – 5 כיווצי שריר רגל עליונה.....
17.....	איור 16 - תרשים בודה ו group delay מסן butterworth מסוג Lowpass סדר 2.....
18.....	איור 17 – מעטפת של אות – 5 כיווצי שריר רגל עליונה לאחר סינון.....
19.....	איור 18 – השוואה בין גילוי כיווץ שריר ללא התחשבות בעיוותים לעומת אחרי התחשבות בעיוותים.....
19.....	איור 19 – תרשים זרימה מכונת מצבים מלאה.....
20.....	איור 20 – תרשים זרימה מכונת מצבים מצומצמת.....
21.....	איור 21 – חיבור cable shield לאלקטרודות.....
21.....	איור 22 – חיבור מומלץ של לוח ארדואינו.....
22.....	איור 23 - חיבור מומלץ של החיישן למחשב הנייד.....
22.....	איור 24 – דוגמאות לתוצאות גרסה ראשונה.....
23.....	איור 25 – חיבור מערך נורות צבעוניות כמשוב לחיישנים.....
24.....	איור 26 – לוח led-shield.....
25.....	איור 27 – מערכת משולבת optocapler.....

רשימת טבלאות

9.....	טבלה 1 - הקשר בין עובי רקמת שומן תת עורי להנחתה ופיזור של אות EMG.....
10.....	טבלה 2 – רמת אקטיבציה של השרירים השונים בישבן בתנוחות שונות [4].....
11.....	טבלה 3 - השוואה בעוצמת אות EMG בין שריר הירך (RF) ושריר הישבן (GM).....

נספחים

נספח 1 – מיקומי אלקטרודות חיישנים

במהלך הפרויקט החיישנים חוברו למספר קבוצות שרירים, כולל שריר הישבן והרגל העליונה. מיקומי חיישנים אפשריים ניתנו על ידי היצרן, ובטבלה למטה מוצגים בפירוט רב יותר.

מקרא:

● - אלקטרודות REF – מחוברת במקביל לקו בין MID-END או לנקודה ניטרלית.

● - אלקטרודות MID – במרכז השריר.

● - אלקטרודות END – בסוף השריר.

שריר נבחר	פירוט	תמונה
שריר הזרוע עליונה Long Head Biceps	End - בסוף השריר, בסמוך לגומץ העצבי. Mid - במרכז השריר, בחלק במוגבה ביותר בזמן כיווץ השריר. Ref - סמוך למרפק יש לשים תשומת לב מיוחדת להניח את האלקטרודות על גבי שריר אחד ולא לגלוש ל- Short Head Biceps	
שריר זרוע תחתונה (forearm) branchioradialis	השריר נמצא בהמשך ישיר מהאגודל לכיוון המרפק. End - בסוף השריר Mid - במרכז השריר, בחלק בגובה בשרירי היד. Ref - סמוך למרפק, בדומה לזרוע עליונה.	
שריר הישבן Gluteus Maximus	End - בחלק העליון של השריר. Mid - במרכז השריר, בחלק המורגש ביותר בזמן כיווץ השריר. Ref - בנקודה שלא משתנה במהלך הפעלת השריר, תחתית הגב, על גבי עצמות האגן. במיקום החיישנים על גבי שריר הישבן מומלץ להניח את החיישנים יותר לצד השריר (lateral) איפה שרקמת השומן דקה יותר, אך חשוב להישאר מתחת ל gluteus medius.	

 <p>Rectus femoris</p> <p>Vastus intermedius (Beneath rectus femoris)</p> <p>Vastus lateralis</p> <p>Vastus medialis</p>	<p>End - בסוף השריר, בסמוך לחיבור שריר הירך הקדמי והאגן.</p> <p>Mid - במרכז השריר, בחלק המורגש ביותר בזמן כיווץ השריר.</p> <p>Ref – פנים הירך, במקביל לקו חיבור החיישנים.</p>	<p>שריר הירך הקדמי</p> <p>Rectus femoris</p>
---	---	--

נספח 2 – מציאת com קריאה וכתביה BLUETHOOTH לוח-מחשב

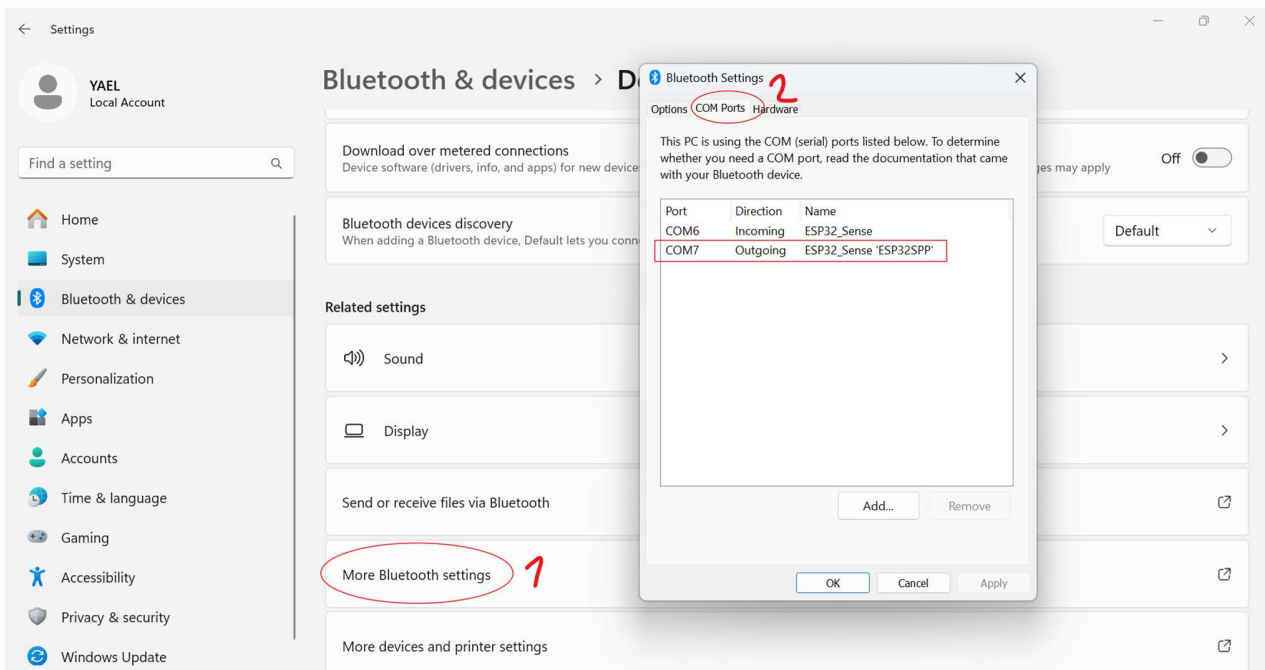
על מנת לקשר בין מחשב נייד ל-ESP דרך Bluetooth ולקרוא ערכים באמצעות script python יש לחבר את המחשב לרכיב דרך תקשורת ה-Bluetooth של מערכת ההפעלה.

לאחר מכן, על מנת לבצע קריאה, יש לברר דרך איזה COM מתרחשות קריאה וכתביה:

בחלון הגדרות Bluetooth יש ללחוץ על More Bluetooth Settings.

יש לבחור בלשונית COM Ports.

ה-COM המבוקש לקריאה לתוך המחשב הוא COM Outgoing.



את ה-COM הרלוונטי ניתן לעדכן בקטע הקוד comToXL (מצורף בתיקיית הפרויקט).

קטע קוד זה קורא את הטקסט הנשלח מהרכיב במקושר ומדפיס אותו.

נספח 3 – תכן מסנן LPF

המסנן המתוכנן הוא Lowpass מסוג Butterworth מסדר שני בזמן בדיד עם $\text{DC gain} = 1$ ותדר cutoff $f_c = 0.8$ הנוסחה הסטנדרטית למסנן מסוג זה היא:

$$H(s) = \frac{1}{\sum_0^n \frac{a_k}{\omega_c^k} s^k}$$

כאשר:

- n – סדר המסנן
- $\omega_c = 2\pi \times f_c$
- $a_{k+1} = \frac{\cos(k\gamma)}{\sin((k+1)\gamma)} a_k, a_0 = 1, \gamma = \frac{\pi}{2n}$

במקרה של $n = 2, f_c = 0.8$ מתקבלת פונקציית התמסורת:

$$H(s) = \frac{1}{0.0395s^2 + 0.281s + 1}$$

ניתן לחשב את פונקציית ההתמרה בזמן בדיד לפי תדר הדגימה $f_s = 30\text{Hz}$.

$$\Delta t = \frac{1}{f_s}$$

$$s = \frac{2}{\Delta t} \left(\frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right)$$

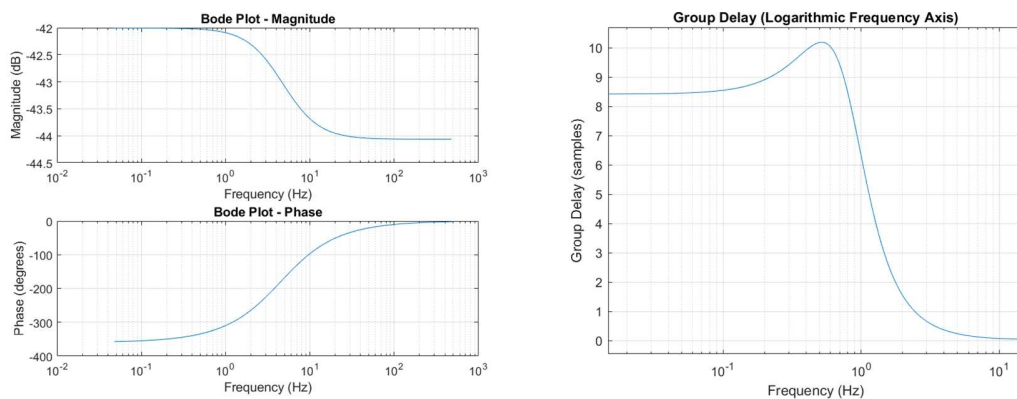
$$H(z) = \frac{0.0062z^{-2} + 0.0124z^{-1} + 0.0062}{z^{-2} - 1.764z^{-1} + 0.7894}$$

בהמרה לתחום הזמן:

$$a_0 y[t] = a_1 y[t-1] + a_2 y[t-2] + b_0 x[t] + b_1 x[t-1] + b_2 x[t-2]$$

$$[a_0 \ a_1 \ a_2] = [1 \ -1.764 \ 0.7894] \quad [b_0 \ b_1 \ b_2] = [0.0062 \ 0.0124 \ 0.0062]$$

תרשים בודה ו-group delay:



העיכוב המקסימלי הוא כ-10 דגימות, כלומר כשליש שנייה, זניח ביחס להשהיה מחיבור Bluetooth.