אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
בית הספר להנדסת חשמל ומחשבים

דו"ח תיעוד פרויקט מסכם לקורס
"מבנה מחשבים ספרתיים" 361-1-4191

מערכת לגילוי מקורות אור וניטור אובייקטים במרחב

חברי הקבוצה: עילי ברוך 209128677
גיא מיוסט 316414697

שם המדריך האחראי: חנן ריבוא

תאריך הגשה: 01.09.2025

תוכן עניינים

הגדרת ומטרת הפרויקט

בפרויקט הגמר בקורס מבנה מחשבים ספרתיים נאחד את הידע שרכשנו במהלך הסמסטר בהרצאות ובמעבדות לידי תכנון ומימוש מערכת מבוססת MCU לגילוי מקורות אור וניטור אובייקטים במרחב באמצעות מד מרחק UltraSonic, חיישני אור LDR ומנוע Servo. במסגרת הפרויקט פיתחנו קוד בשפת C למימוש מערכת Embedded מבוססת גרעין הפעלה FSM וכתבנו את המערכת במתודולוגיה של שכבות אבסטרקציה למימוש מערכת Embedded מרובת חיישנים. מימוש צד משתמש, בצד PC הוא על ידי שימוש בממשק GUI כך שהMCU מחובר לPC באמצעות תקשורת טורית אסינכרונית בסטנדרט RS-232.

קוד המערכת פותח בשפת C ויממש מכונת מצבים מבוססת פסיקות לתפעול הרכיבים ושליחה וקבלה בערוץ התקשורת. מכונת המצבים תפורט בהמשך בהרחבה.

קוד צד המחשב יפותח בשפת python ויציג ממשק משתמש (gui) ממנו המשתמש יוכל לתפעל כל פעולה המוגדרת במערכת ודורשת תצוגה וממשק למשתמש. כמו כן, הממשק יאשר העברת קבצים הכוללים פקודות High-level מקודדות למימוש בצד הבקר ויבדקו את חלקי המערכת. הקבצים בצד הבקר ישמרו בזיכרון הflash ובחירת הקוד להרצה יעשה דרך ממשק הgui.

תיאור הפרויקט

המערכת מחולקת ל4 פונקציות עיקריות:

1. ניתור אובייקטים במרחב תוך ביצוע סריקה אחת בלבד בהיקף של 180 מעלות ורמת דיוק אופטימלית. בסוף הסריקה הוצגו אובייקטים על גבי המסך עם פרמטרים של מרחק וזווית מנקודת הסריקה וגם רוחב אובייקט.
2. מיקום חיישן האולטרה סוניק בזוית שנבחרה על ידי המשתמש בממשק הGUI והצגה על גבי מסך הPC את המרחק הנמדד מחיישן המרחק בזמן אמת באופן דינאמי.
3. ניתור מקורות אור במרחב בטווח של עד חצי מטר בביצוע סריקה בהיקף 180 מעלות ורמת דיוק אופטימלית.
4. שליחה מPC של עד עשרה קבצים עם גודל משתנה ושמירתם בזיכרון הflash. הקבצים הם מסוג text או script. קבצי text יוצגו על גבי מסך LCD של MCU וקבצי script הם קבצים שיכילו פקודות High-level .

תיאור ביצועי החומרה והתוכנה

זיהוי אובייקטים במרחב בעזרת חיישן ultrasonic

במשימה זו השתמשנו בחיישן ulatrasonic ובמנוע servo לצורך זיהוי אובייקטים במרחב ממרחק 2 ס״מ ועד 450 ס״מ. בצד PC, דרך GUI המשתמש יוזם סריקה. מנוע הסרבו עובד על אות PWM. ערך ה duty cycle קובע את מיקום הזרוע. אצלנו לאחר כיול זוויות קצה, קיבלנו ערך מינימום 450ms , עבור זווית 0 מעלות , וערך מקסימום 2175ms, עבור זוית 180 מעלות.

על גבי זרוע מנוע הסרבו קיים חיישן ulstrasonic שמקבל דרך רגל הtrigger פולס ברוחב של לפחות 10usec עם דיליי של לפחות 60msec כלומר תדר עבודה של מקסימום 16.7Hz. בסיום הפולס חיישן המרחק שולח גל קול באורך שמונה מחזורים בתדר 40kHz לכיוון האובייקט וקולט את ההחזרים המגיעים ממנו. המעגל החשמלי הנמצא בחיישן ממיר את החזרי גל הקול לפולס היוצא מרגל הEcho. הפולס שיוצא הוא אורך הזמן שעבר מרגע שידור גל הקול ועד לקבלת החזרים מהאובייקט הנמצא מול החיישן. הפולס היוצא מרגל הEcho נכנסת לרגל P2.4 עם קונפיגורציה של input capture של טיימר A1. דרך input capture אנחנו מודדים את הרוחב הפולס שמגיע דרך רגל Echo.

צד PC שולח את ערך הthreshold שנקבע על ידי המשתמש. בכל זווית אנו דוגמים 3 פעמים ולוקחים את הערך החציוני. ערך זה אנחנו שולחים דרך UART בתקשורת טורית לצד המחשב. המחשב בכל פעם מקבל מידע בגודל 2 bytes דרך הUART ומקדם את הזווית במעלה נוספת. כך אנחנו חוסכים בהפסק ומגדילים יעילות (נשלחים שני בתים במקום שלושה). כל דגימה שמגיעה נשמרת בטבלה. האלגוריתם תוכנן לקטלג דגימות עם זוויות עוקבות ומרחק דומה לכדי אובייקט אחד. כאשר האלגוריתם כבר לא מזהה את הדגמות כשייכות לאותו אובייקט, האלגוריתם מחשב את זווית האובייקט כממוצע הזוויות שנמדדו. כלומר לוקחים את ממוצע כל הזוויות בהן הופיע האובייקט.

$$\varphi = round(\frac{\sum_i deg_i}{N})$$

חישוב המרחק מתבצע על ידי אנליזה של אותו רצף דגימות. לוקחים את כל המרחקים בהם נמצא האובייקט ומחשבים ממוצע בין כל המרחקים.

$$\rho = round(\frac{\sum_i distance_i}{N})$$

בפועל המרחק נגזר מזמן ההד באולטרסיניק כיוון שאנחנו יודעים שגל הקול יצא מTX התפשט עד האובייקט וחזר. עד שגל ההחזר הגיע לRX הוא עבר $2dists$ ולכן:

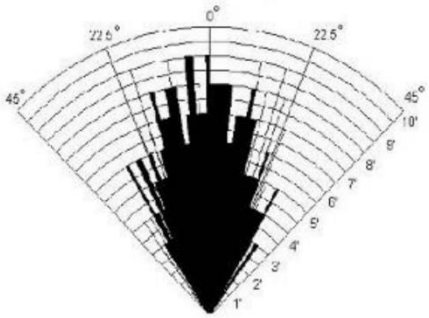
$$dists = \frac{vt}{2}$$

חישוב אורך האובייקט מתבצע עבור אותו רצף דגימות תוך שימוש בחישוב לפי משפט הקוסינוסים:

$$l = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2\cos(\Delta\theta)}$$

כאשר r_1, r_2 הם מרחקי קצוות הרצף, $\Delta\theta$ זה הזווית מפתח בין שני קצוות הרצף.

לאחר מכן אנחנו עושים תיקון בשל התנהגות מפתח הסאונד המוחזר כמו בתמונה:

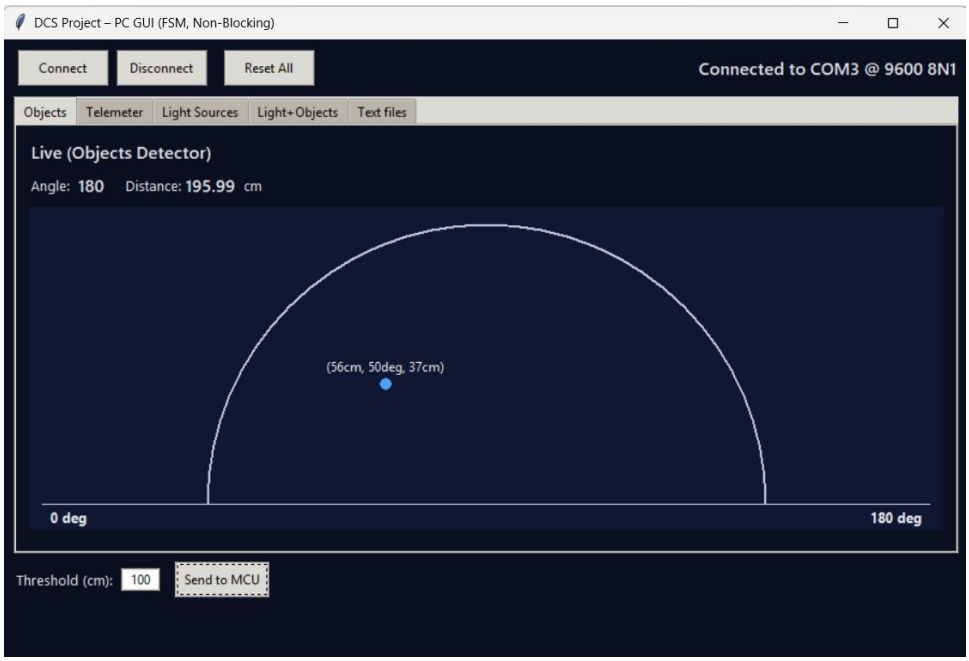


Practical test of performance,
Best in 30 degree angle

לכן קיבלנו:

$$l = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2\cos(\Delta\theta)} - \tan(15) * (r_1 + r\_2)$$

עבור כל אובייקט שנמצא רחוק יותר מהthreshold צד הPC לא שומר ערכים ולכן הדבר חוסך בסיבוכיות מקום. בסוף הסריקה מופיע על מסך הPC מפת הראדר ועליה מצויינים ערכי המרחק, הזווית ורוחב האובייקט.



Telemeter – מדידת מרחק האובייקט בזווית קבועה באופן דינאמי

במצב זה המשתמש מגדיר זווית סריקה סטטית. חיישן האולטרסוניק עובד באותה דרך המוסברת בהרחבה במצב Object Detector. רגל הEcho נדגמת בעזרת טיימר A1 ב input cupture. כל דגימה נשלחת לPC דרך UART וזאת מוצגת על גבי המסך GUI של המשתמש.

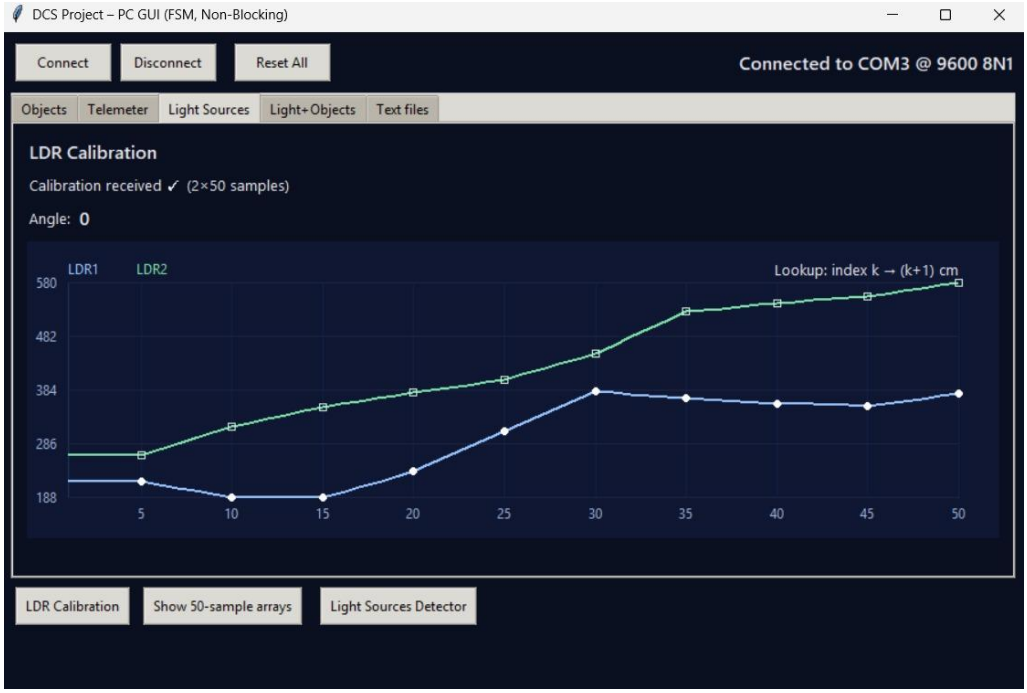
כיול גלאי אור

כיול גלאי אור הוא שלב חשוב ביותר לפני גילוי מקורות האור. גלאי האור משמש כנגד משתנה ולכן כל שינוי של אור במרחב החיישן יכול לשנות את התנגדות החיישן. הכיול מתבצע בעזרת מטר על מנת להעלות את הדיוק. על המשתמש להכנס בממשק GUI למצב Light Source Detector וללחוץ על כפתור LED Calibration. המשתמש צריך לדגום 10 דגימות מ5 ס״מ ועד 50 ס״מ בעזרת לחיצה על כפתור PB0. בסיום תהליך הדגימה, הבקר שומר את הדגימות בסגמנט D על גבי הFlash בעזרת data struct חדש שהגדרנו.

בצד הבקר הגדרנו struct חדש בשם LDRFile המכיל את המשתנים הבאים:

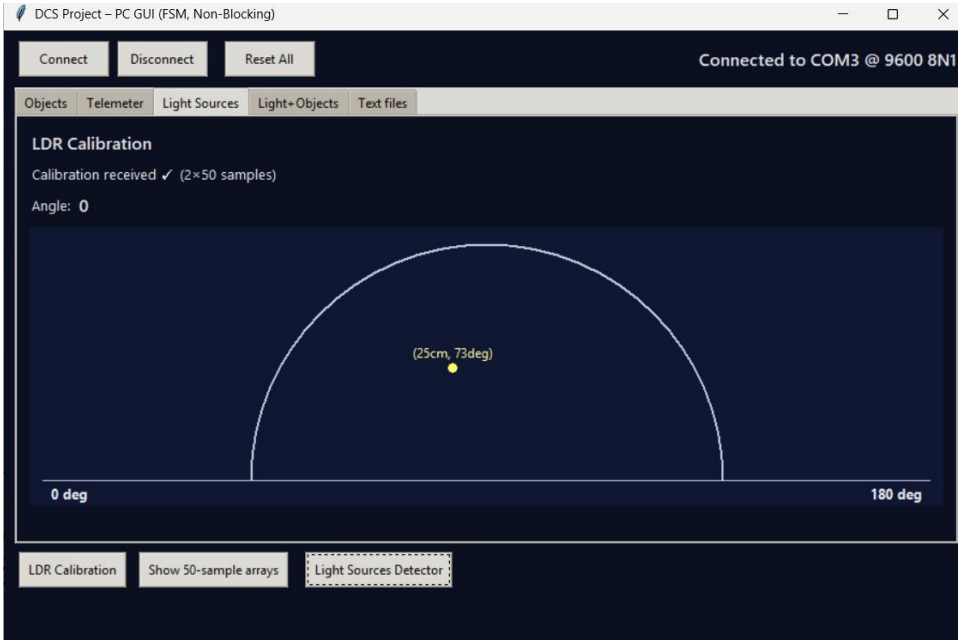
	struct LDRFile
מערך שמכיל את דגימות ldr1	ldr1[10]
מערך שמכיל את דגימות ldr2	ldr2[10]
שם	name[10]
גודל המידע המוכל בstruct	size
סוג המידע	type[10]

לאחר שמירת ה struct בסגמנט D, נשלחות הדגימות דרך UART לצד PC. צד PC מקבל את הדגימות ומייצר Lookup Table על ידי אינטרפולציה לינארית ומציג למשתמש את הגרף.



זיהוי מקורות אור במרחב

בשלב זה על ידי לחיצה על כפתור Light Source Detector מתחילה סריקה של 180 מעלות. שני חיישני ldr נדגמים בעזרת ADC10 כל זווית 3 דגימות. בצד MCU מתבצע חישוב חציון עבור ערכי כל חיישן ולאחר מכן מחשבים ממוצע בין שני החציונים. הערך הממוצע נשלח לצד PC דרך UART שאוגר את כל הנתונים בטבלה. זווית הגלאי אינה נשלחת MCU, ובכך חוסכים בהספק המערכת, אלא צד הPC מקדם עבור כל דגימה שנשלחת (2 בתים בלבד)את הזווית במעלה אחת. צד PC מקטלג כל רצף של דגימות ברוחב גדול מ4 מעלות עם ערך דומה למקור אור פוטנציאלי. צד PC מחשב את הנקודות המינימום בדגימות שקיבל. התוכנית מחשבת לפי LUT את המרחק מהאובייקט. לבסוף מוצג על גבי מסך הGUI מקורות האור שהתגלו.



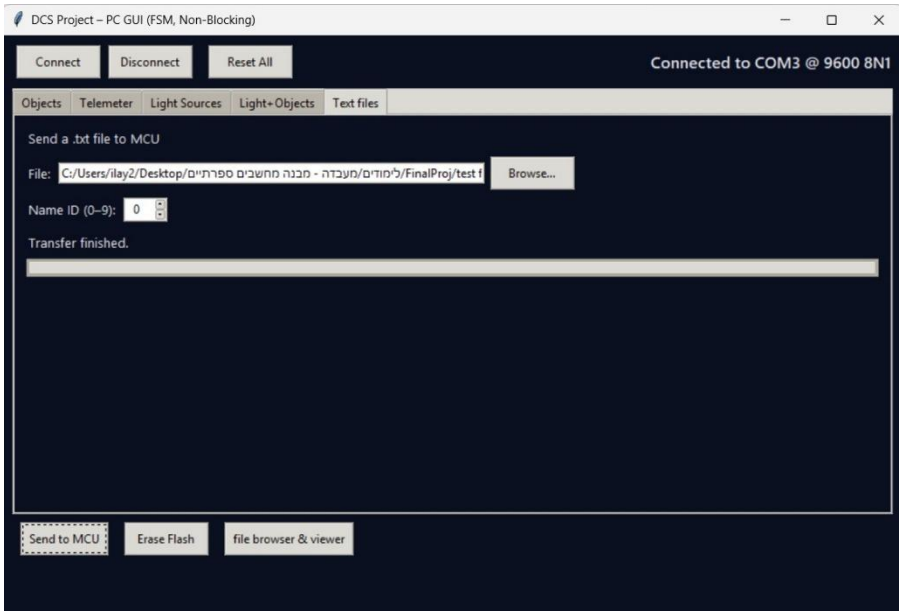
טעינת טקסט והצגתו על גבי מסך LCD

במצב 4 המשתמש יוכל לטעון עד 10 קבצי text לא דחוסים, ולהציג אותם על גבי מסך LCD בצד MCU. סך קבצי הטקסט והscript הוא 10. בממשק GUI אפשר לבחור קובץ מהPC ולטעון אותו לMCU דרך UART. בצד הבקר הגדרנו struct חדש בשם FileEntery המכיל את המשתנים הבאים:

	struct FileEntery
שם הקובץ הוא מספר מ0 עד 9	name
סוג הקובץ – 0 קובץ טקסט, 1 קובץ סקריפט	type
גודל המידע ביחידות של bytes	Size_bytes
כתובת התחלתית בה שמור המידע בזכרון flash	Start_addr

MCU מקבל תחילה את חלק ה header של הקובץ. ה header של הקובץ מכיל שם, סוג וגודל הקובץ ביחידות של bytes. שם הקובץ הוא מספר מ0 עד 9, זאת על מנת לחסוך בזמן ובמקום, בשילוב עם ידיעה של הסוג הקובץ כלומר type נוכל לשחזר את השם המלא של הקובץ. לדוגמה – name=0; type=0 נוכל לשחזר לשם text0.txt. גודל הקובץ חשוב מאוד לתהליכים רבים בניהול הזיכרון. לאחר קבלת הheader, הMCU שולח את האות 'A', שהיא אומרת שהMCU קיבל את הheader ללא שגיאות וכי יש מספיק מקום בזיכרון על מנת לקבל את המידע ולאכסנו. במידה ונשלח האות 'F' זה אומר כי זיכרון הflash מלא וכי אין אפשרות לקבל את הקובץ, כאשר נשלח האות 'E' זה אומר כי קיימת שגיאה.

בעת קבלת האות 'A' הבקר יכול לשמור את הstruct שמכיל מידע על הקובץ text. השמירה של כל הstructs היא בסגמנט C, בעוד שהמידע עצמו נשמר בסגמנטים 4 עד 1. התוכנית מגיעה עד לכדי מספר סגמנטים מכתיבת הdata החדש, לכן הכתיבה לא דורסת ערכים קיימים. הPC מתחיל להעביר byte אחרי byte אל הMCU, כאשר כל byte שמתקבל נכתב ישירות לתוך הflash. כאשר כל המידע עובד בהצלחה MCU שולח לצד PC את האות 'K' ובצד הGUI מופיע All Data Trasmited. עד כה היה שלב הטעינה ושמירה בflash.



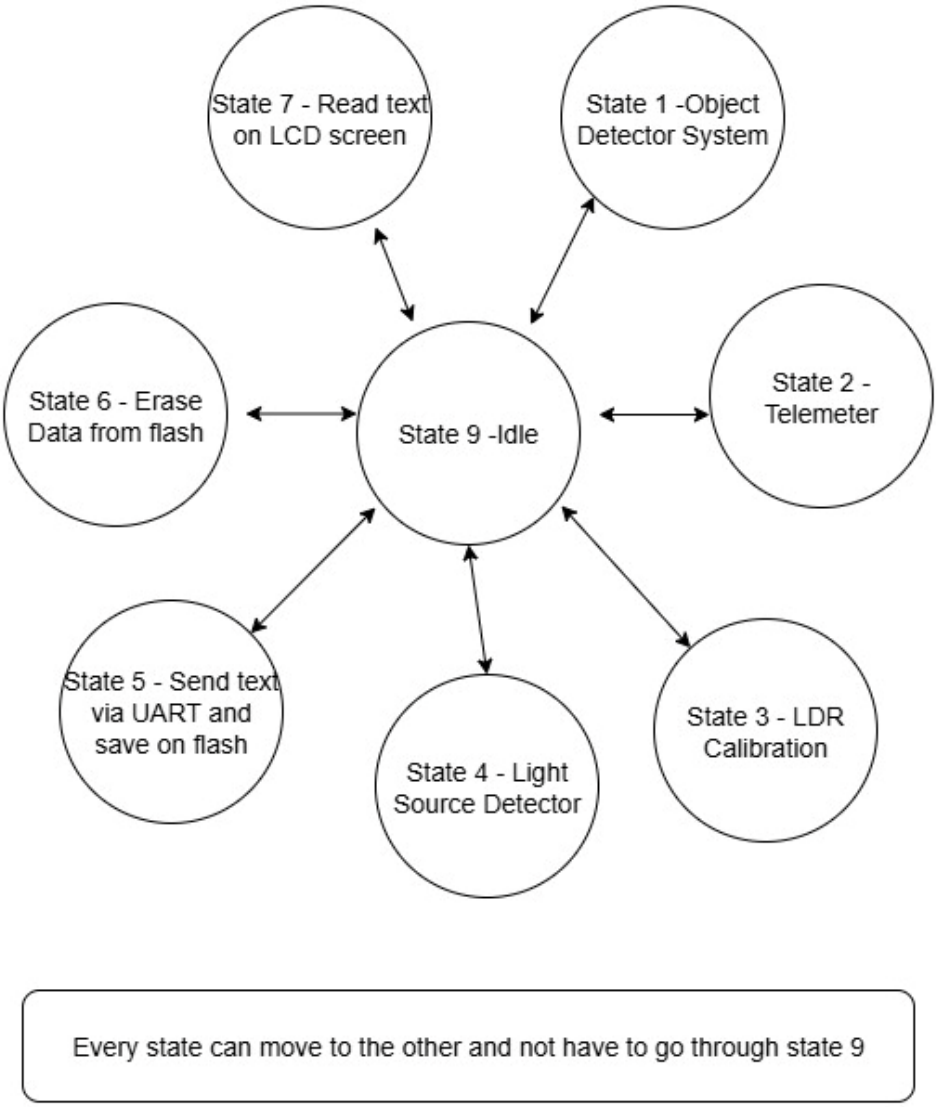
כאשר אנחנו לא שומרים את קובץ הטקסט אנחנו יכולים להשתמש בPB0 על מנת לדפדף בכל קבצי הטקסט הקיימים במערכת. שימוש בPB1 מאפשר לנו לקרוא קובץ ספציפי. בכל דף ניתן להציג עד 32 אותיות וזאת בגלל מגבלה של גודל הLCD. יציאה חזרה לתפריט תהיה על ידי לחיצה נוספת על PB1.

הרצת קוד על הבקר

בתכנון מצב זה המשתמש יוכל לטעון עד 10 קבצים מהמחשב, ולהריץ אותם על הבקר. סך קבצי הטקסט והscript הוא 10. לחיצה על כפתור הsubmit שולחת כל קובץ שנבחר לבקר על ידי תקשורת טורית ונשמרת בזיכרון הFLASH של הבקר. לאחר מכן המשתמש יוכל לבחור להריץ את אחד הסקריפטים שטען.

בצד הבקר הגדרנו struct בשם FileEntry, אותו struct שהשתמשנו עבור הtext.
המשתנים מתעדכנים בעת הטעינה של הסקריפטים וכתיבתם לזיכרון הflash, ומשמשים את הבקר בעת קריאה מהזיכרון והרצה של הסקריפט.

FSM - מכונת מצבים צד MCU



פירוט מצבים לפי פונקציות עיקריות

זיהוי אובייקטים במרחב בעזרת חיישן ultrasonic

בחירת פונקציה ראשונה ממשק המשתמש ← הגעה למצב state1 ← תחילת תנועת מנוע Servo ותחילת דגימה של חיישן ה Ultrasonic על ידי Input cupture mode. בסיום המצב הצגה של מפת אובייקטים שזוהו על גבי המפה. מצב זה הוא מצב אטומי וניתן לעבור לכל מצב רק בסיום הסריקה.

Telemeter

בחירת פונקציה שנייה ממשק המשתמש ← הגעה למצב state2 ← דגימת חיישן Ultrasonic והצגה של המרחק האובייקט באופן דינמי על מסך GUI. ניתן לעבור ממצב זה לכל מצב אחר בכל עת.

כיול חיישני LDR

בחירת פונקציה שלישית מממשק המשתמש ← הגעה למצב state3. לחיצה על הכפתור PB0 תדגום בעזרת ADC10 את ערכי חיישני הLDR. נדגום מ-5 ס"מ ועד 50 ס"מ 10 דגימות. בסיום הכיול יופיע גרף האינטרפולציה של ערכי החיישנים. מצב זה אינו אטומי וניתן לעבור ממצב זה לכל מצב אחר בכל עת.

Light Source Detector

בחירת פונקציה רביעית מממשק המשתמש ← הגעה למצב state4. במצב זה נבצע סריקה של חיישני הLDR, אשר ידגמו בכל זווית 3 פעמים כל אחד בסיום המצב יופע מפת זיהוי מקורות אור בממשק המשתמש. מצב זה הוא מצב אטומי וניתן לעבור לכל מצב רק בסיום הסריקה.

שמירת קובץ text בזיכרון הFlash

בחירת פונקציה חמישית מממשק המשתמש ← הגעה למצב state5. נפתח מסך המאפשר לטעון עד 10 קבצים מהמחשב. לחיצה על כפתור הsubmit שולחת את קבצי הקוד לבקר ומתחילה את תהליך השמירה בflash. צד בקר מנהל את הזיכרון בעזרת data struct שהגדרנו שנשמרים בסגמנט C בעוד שהמידע עצמו נשמר בסגמנטים 4-1 (טווח כתובות: 0xF600 – 0xFE00) . קובץ גדול מ2KB אינו נשלח ונעצר בצד PC. ראשית הPC שולח את שם הקובץ, סוג הקובץ וגודל הקובץ. במידה ואין מקום מספיק כדי לשמור את הקובץ נשלחת הודעת שגיאה. במידה ויש מקום, צד בקר שולח 'A' לPC ואז הPC מתחיל להזרים את הקובץ עצמו. בסיום השמירה נקבל ack.

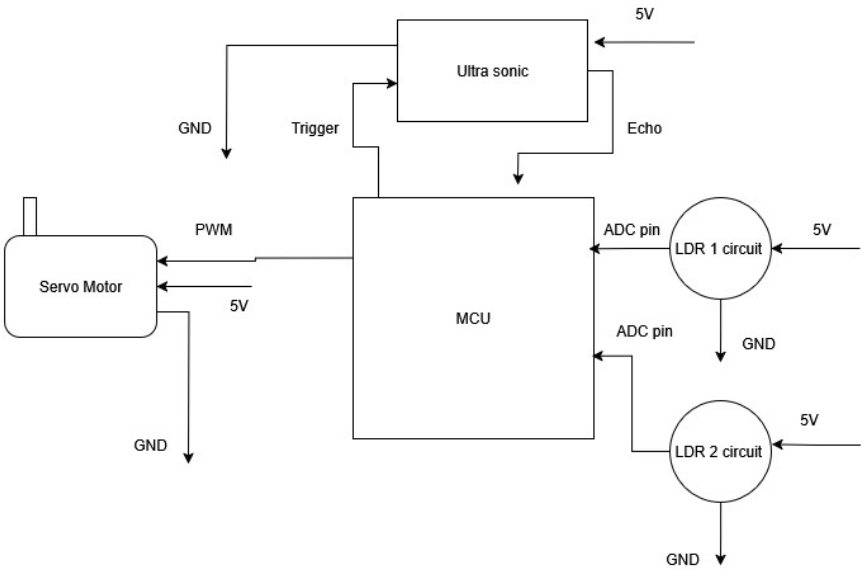
מחיקת קובץ text בזיכרון הFlash

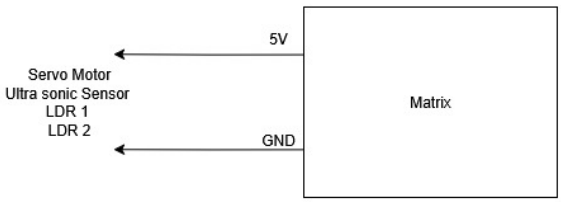
בחירת פונקציה שישית מממשק המשתמש ← הגעה למצב state6. ניתן ללחוץ על כפתור Erase Flash על מנת למחוק את כל הFlash. בסוף התהליך נקבל ack.

קריאת קבצי text על גבי מסך LCD

בחירת פונקציה שבעית מממשק המשתמש ← הגעה למצב state7. בעת לחיצה על כפתור PB0 ניתן לדפדף על שמות הקבצים הקיימים בזכרון. לחיצה על PB1 קריאת text על גבי מסך LCD ששמו מופיע בשורה הראשונה. לחיצה נוספת על PB0 דפדוף נוסף על מנת להמשיך לקרוא את הtext. ולחיצה על PB1 חזרה לתפריט שמות הקבצים.

תיאור חיבורי חומרת קצה





מסקנות והצעות לשיפורים

- חשבנו הרבה על תכנון המערכת ועל זמן העבודה למול יעילות הקוד והחומרה. למדנו המון על תכנון מערכות ובניית מערכת סגורה עם ממשק למשתמש.
- חיישני הLDR מתנהגים שונה בין חיישן לחיישן, חיישנים שונים בעלי רגישות שונה. אנו מציעים לתת את דגם החיישן הספציפי על מנת לאפשר לנו למצוא את הdata sheets של היצרן ולבדוק האם אנחנו מקבלים תוצאות דומות לתכנון היצרן.
- בהינתן יותר זמן היינו רוצים לדייק יותר את המערכת על מנת להפוך אותה לטובה הרבה יותר ואיכותית יותר.