



AI : רכב רובוטי חכם מבוסט MARICH

מוגש ע"י :

מריה נחלה – 207716762

בריסטיאן חמיסה – 324304955

בנהנויות : אלחנן דרגוליכוב

חתימה :

29.9.2025 י' בתשרי ה'תשפ"ו

הוגש לשם מילוי חלקו של הדרישות לקבלת תואר
"בוגר במדעים B.Sc. בהנדסת חשמל ואלקטרוניקה"

ו. תקציר:

הפרויקט בוצע במסגרת תכנן הנדסי פנימי פרויקט גמר ב"ימכלאת אורט בראודה" כרמיאל.

במסגרת פרויקט גמר זה פותח רכב רובוטי חכם מבוסס Raspberry Pi 5 המשולב עסםיסך מגע קיבולי בגודל 7 אינץ', מערכת ראייה ממוחשבתובינה מלאכותית מתקדמת, המאפשרות לו לזהות רגשות, מחוות ותנוונות גוף, לבצע מעקב פנים, ולזהות תווים פנים.

הרכב מבוסס על צ'אסיס מתכת מצויד בגלגלי Mecanum המאפשרים תנועה 360° ומתרגם ליכולת ניווט בכיוונים שונים. החומרה כוללת מצלמות USB בגובה 1 MP עם 2-DOF PTZ, מסך OLED ובומר(buzzer).

בחינת תוכנה, נעשה שימוש בספריות OpenCV ו MediaPipe ליישומי זיהוי צבע, מעקב מטרות, זיהוי לוחיות רישוי, מעקב ופענוח פנים, זיהוי מחוות ותנוונות גוף.

סביבת הפיתוח מבוססת Python עם התממשקות דרך :

(ROS2 (Humble Edition) המאפשרת למידה הדרגתית, שליטה נוחה ותשתיית מתקדמת לרובוטיקה חינוכית והתנסותית.

המטרה המרכזית היא ליצור מערכת אינטראקטיבית טבעיות ואינטואיטיבית, המאפשרת להציג בזמן אמת לסביבה האנושית עם משקל מגע, תגובות ויזואליות ובסיס למידה וगמישות. הפרויקט משתמש כפלטפורמה חינוכית המועדת ללימוד רובוטיקה ו AI המותאמת במיוחד לסטודנטים ולחובבים.

תוכן עניינים

2.....	0
6.....	1
6.....	2
6.....	2.1 חומרה
7.....	2.2 תוכנה
7.....	2.3 מפרט פונקציונלי:
7.....	2.3.1 מערכת לביישה (On-board System)
8.....	2.3.2 מרכז הבקרה (Control Center)
8.....	2.4 מפרט טכני – טבלת פירוט מרכיבי המערכת
9.....	2.5 תרשימים מבנים:
10.....	2.6 עקרון פעולה המערכת:
10.....	3. מטלות
10.....	3.1 מטלות הנדסיות:
11.....	3.2 ביצוע המטלות ע"י המתמחה :
11.....	3.2.1 שלבי התכנון :
16.....	3.2.2 תכנון אב
19.....	3.2.3 תרשימי זרימה
22.....	3.2.4 סכמה חשמלית
23.....	3.2.5 סימולציות
30.....	3.3 בעיות ואתגרים הנדסיים
31.....	4. סיכום ודיון :
31.....	4.1 הצורך בפרויקט :
32.....	4.2 סיכום ומסקנות:
32.....	4.3 תוספות עתידיות:
33.....	4.4 עמידה בדרישות:
34.....	5.ביבליוגרפיה:
34.....	6. נספחים:

רשימת טבלאות וגרפים:

9.....	טבלה 1: מפרט תכני
29.....	גרף 1: זמני התגובה של ה-AI
29.....	טבלה 2: דיק htshabot
33.....	טבלה 3: עמידה בדרישות

רשימת האיורים:

9.....	איור 1: תרשימים מלבים
13.....	איור 2: הרכבת המכונית, שלב 1
13.....	איור 3: הרכבת המכונית, שלב 2
14.....	איור 4: הרכבת המכונית, שלב 3
14.....	איור 5: הרכבת המכונית, שלב 4
15.....	איור 6: מסך LCD
15.....	איור 7: רכב מלא ללא מסך
15.....	איור 8: התוצאה הסופית
19.....	איור 9: תרשימים זרימה כללי
20.....	איור 10: תרשימים זרימה IR
21.....	איור 11: תרשימים זרימה AI
22.....	איור 12: סכמה חשמלית
23.....	איור 13: זיהוי פנים באור חזק
23.....	איור 14: זיהוי פנים באור בינוני
24.....	איור 15: זיהוי פנים באור נמוך
24.....	איור 16: זיהוי פנים כאשר מספר פרצופים זמינים
25.....	איור 17: תנועת יד עוקבת
26.....	איור 18: זיהוי צבע
27.....	איור 19: זיהוי גוונים שונים של חול
28.....	איור 20: זיהוי אובייקטים
28.....	איור 21: זיהוי לוחות רישי

AI – Artificial Intelligence

B.Sc. – Bachelor of Science

CPU – Central Processing Unit

CSV – Comma Separated Values

DOF – Degrees of Freedom

FPV – First Person View

GUI – Graphical User Interface

I2C – Inter-Integrated Circuit

IP – Internet Protocol

IR – Infrared

LCD – Liquid Crystal Display

LLM – Large Language Model

MP – Megapixel

OLED – Organic Light-Emitting Diode

PTZ – Pan, Tilt, Zoom (Camera movement)

RGB – Red, Green, Blue

ROS2 – Robot Operating System 2

STT – Speech-to-Text

TCP – Transmission Control Protocol

TTS – Text-to-Speech

USB – Universal Serial Bus

Wi-Fi – Wireless Fidelity

1. מבוא:

שילוב הרובוטיקה עם בינה מלאכותית וראייה ממוחשבת מציב אתגרים משמעותיים, ולא פחות מכך – פוטנציאל לשיפור אינטואיטיביותו והימוד בתחום. כיום, רובוטים אינטראקטיביים מעטים משולבים עם ממשקים טבעיות כמו מסכי מגע, יכולות זיהוי רגשות ותגובה בזמן אמת, במיוחד בפיתוחים חינוכיים שיכולים להנגיש טכנולוגיות מתקדמות לסטודנטים וחובבים.

פרויקט זה מתמקד בתכנון ובניה של **רובר רובוטי חכם** מבוסס על Raspberry Pi 5 המשולב במסך מגע בקיבולי בגודל 7 אינץ', עם **יכולת תנועה رب-כיוונית** באמצעות גלגלי Mecanum וזיהוי מתקדם של מחוות, רגשות, פנים ומדידת מרחק באמצעות מצלמת USB עם **PTZ-מזרחי**, חיישני אולטרסונייק, פסים מוארים (RGB) ומסך OLED. כל זאת, תוך שילוב טכנולוגיות כמו Python ו-ROS2 MediaPipe, OpenCV וה-OpenCV. הפרויקט יאפשר למשתמשים ליצור אינטראקטיביות טבעית ותגובה מהירה עם הסביבה האנושית.

המטרה המרכזית היא לפתח מערכת אינטואיטיבית, אינטראקטיבית וجمישה, המספקת ממשק מגע וראייה לרובוט, ומאפשרת לו לקבל החלטות ולהגיב בזמן אמת. פרט לכך, הפרויקט פותח כפלטפורמה **חינוכית ומעשית**, המאפשרת למידה הדרגתית של טכנולוגיות רובוטיקה, ראייה ממוחשבת ו-AI-תוך מתן אפשרות להרחבה ושדרוג עתידי קל.

2. תיאור המערכת:

2.1 חומרה

- **בקר מרכזי Raspberry Pi 5 ROS2 (Humble Edition):** מארח סביבת ROS2 ומתחכנת בו Python פתרון מותאים גם למשתרכים וגם למתקדמים.
- **שלדה:** גוף מותכני עמיד התומך בגלגלי Mecanum, המאפשרים תנועה חלקה בכל כיוון (כולל צדדים וסיבובים במקום).
- **מסך מגע קיבולי בגודל 7" (LCD):** משולב למשק משתמש ויזואלי אינטואיטיבי, מציג מידע בזמן אמת ומאפשר שליטה ישירה ללא צורך לשימוש במחשב חיצוני — תורם לחוויה משתמש חלקה, הופך את הרובוט לפלטפורמה עצמאית ונגישה.
- **מצלמה חכמה: מצלמת USB ברזולוציה בינונית (1MP) המותקנת על גימבל PTZ (2-DOF)** מאפשרת תנועות מעלה ומטה ופנחה ומסביב לצורך מעקב ותצוגה חכמה.
- **חיישנים משלימים:** כוללים חיישני עקיבה (4-ערוצים), חיישן אולטרסונייק למדידות מרחוקים, פסי תאורת RGB, מסך OLED אינפורטטיבית ו-buzzer לצילילים — כולם מחוברים דרך הרחבה YILODIT.

2.2 תוכנה

- **ספריות ואלגוריתמים :** משתמשים ב-OpenCV ו-MediaPipe לעיבוד תמונת ליזיוהי ותנועות גוף, פרצופים ומוחות.
- **מערכת ROS2 :** מאפשרת ארכיטקטורה מודולרית וקלת לפיתוח, עם תמיכה ב-rviz, rqt ו-micro ROS אידאלית ללמידה, לתחינות ולמחקר.
- **שליטה מרובה ערכאים :** פיקוד נעשה דרך אפליקציית FPV חיבור דרך Wi-Fi, שלט אינפרא-אדום או דרך מחשב עם סביבת ROS מבטיח גמישות שימוש.

2.3 מפרט פונקציונלי:

2.3.1 מערכת לבישה (On-board System)

1. **יכולת קליטת נתוני תנועה**
המערכת כוללת חיישני עקיבה (4-ערוצים) ומצלמה עם PTZ המאפשרים קליטת תנועות, קווים ומעקב חזותי.
2. **יכולת קליטת מצב תאורה**
מערכת OpenCV מאפשרת המרת תמונת הסביבה ליזיוהי קבועים ותנאי תאורה באמצעות מסך ומצלמה.
3. **יכולת צילום**
מצלמת USB ברזולוציה ~1 MP עם גימבל 2-DOF מבצעת צילום ועיבוד בזמן אמת.
4. **יכולת עיבוד נתונים וקבלת החלטות**
שליטה המערכת נעשית באמצעות Raspberry Pi 5, Python ו-ROS2, תוך שימוש ב-OpenCV ו-MediaPipe ליזיוהי מחוות, פרצופים, תווית רכב ועוד.
5. **יכולת עבודה רצופה באופן אלחוטי למשך שלוש שעות**
אמנם לא צוין במפורש, אך המערכת פועלת באמצעות סוללה 7.4 V ליתיום סולידייט, שספקת פעולה ממושכת ללא חוטי חיבור.
6. **יכולת התראה בזמן אמת לנמען מוגדר**
כוללת פلت חיישה חזותי (RGB, OLED) וקולוי (buzzer) כאמצעי התראה מיידי.
7. **יכולת העברת נתונים (תמונות + DATA) באמצעות פרוטוקול IP-TCP**
תמכית ROS2 ותקשורת דרך Wi-Fi מאפשרים שידור נתונים בזמן אמת למיכשרים חיצוניים.
8. **יכולת עבודה באופן אוטונומי**
המערכת תומכת בעקביה עצמאלית (line tracking, visual tracking), הימנעות מכשולים ויזיהו תווים, QR, תווית פנים באופן אוטונומי.

2.3.2 מרכז הבקרה: (Control Center)

9. יכולת עיבוד נתונים וקבלת החלטות

מרכז הבקר (ה-5 Pi) מנהל שליטה חכמה, מעבד נתונים מצלמה וחישנים ומחליט על תוצאות.

10. יכולת קבלת נתונים באמצעות פרוטוקול IP-TCP

מאפשר קבלת נתונים בזמן אמת מהחישנים דרך Wi-Fi או ROS2.

11. יכולת שמירת נתונים (לצורך מעקב ולמידת הרגלים)

אפשר לשמר תמונות, לוגים ונתונים לניתוח מאוחר או אימון מודלים ROS2 – תומך בלוגים ושמירת מידע.

12. יכולת צילום

גם במרכז הבקרה נעשה תיעוד רגיל של תמונות/וידאו באמצעות מצלמה, לשם ניתוח או תצוגה בזמן אמת.

13. יכולת הträאה בזמן אמת

תצוגה חזותית (על מסך 7''), פלט RGB/OLED וב-Buzzer מאפשרים הträאה והתראה באמצעות מרכז הבקרה.

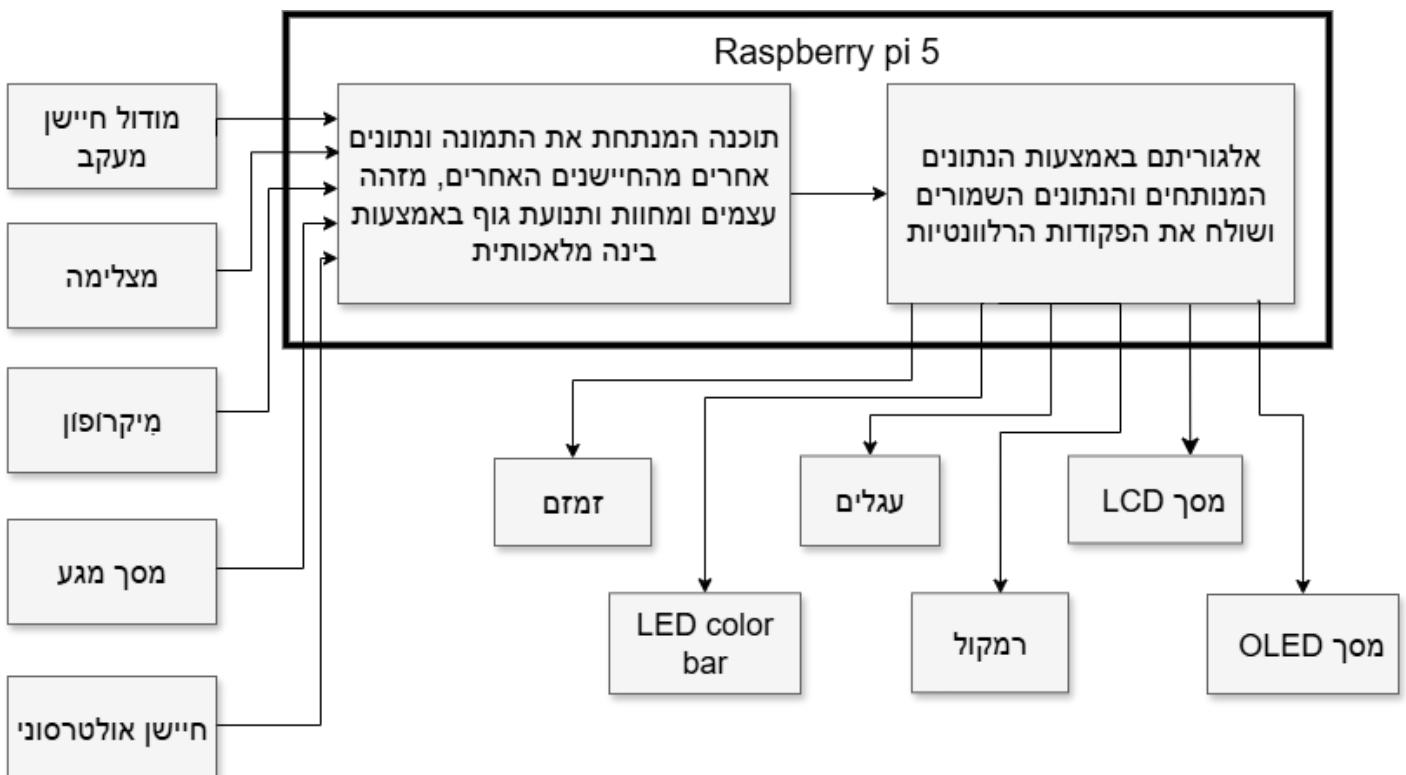
2.4 מפרט טכני – טבלת פירוט מכלולי המערכת

מספר	רכיב / מכלול	תיאור תכליתי	מפורט טכניים עיקריים
1	בקר הראשי : Raspberry Pi 5	איסוף נתונים מהחישנים, עיבודם, קבלת החלטות, שליטה בתנועה ובתגובה כלפי משקל המשמש AI ומודולי AI	ROS2 Humble, Python, I2C, USB-C PD 5V/5A
2	מסך מגע קיבולי "7 (LCD)	משק משתמש ישיר לצפייה במצב הרובוט, זיהויים ותגובה ; מאפשר שליטה ללא תלות במחשב חיצוני	ביטוי ויזואלי, מגע רב-תכליתי (עדיות מהפרויקט)
3	מצלמת 1 USB + גימבל PTZ 2-DOF	צילום וסריקה בזמן אמת של הסביבה — עקיבה אחרי פנים, מחאות, תווילוחיות ; תגובה בזמן אמת באמצעות עיבוד AI	רזולוציה 480p, FoV 720p, 120° דיאגונלי, סריקה אופקי + אנכי
4	גלגלי מנועים Mecanum	תנועה בכל כיוון — קדימה, אחורה, הצד, אלכסון וסיבוב במקום, כולל בתנאים מורכבים	מотор, TT ~245 RPM מומנט Nm0.8
5	חישוני עקיבה (4-ערוצים)	זיהוי מסלול רצוף (line tracking) ופיקוד על התנועה בהתאם לקרקע	חישוני אינפרא-אדום מדוייקים במיוחד
6	חיישן אולטרסונייק	מדידת מרחקים והימנעות ממכתולים באופן אוטונומי	מודול קצה קדמי, זיהוי עצמים לאורך הדריך

OLED הציגת>Status ; RGB בראלקטרוני עם buzzer, אפקטים	מצב (IP, CPU) הציגת נתוניים, מערכות, זיהוי, AI אינדיקציה חזותית וקולית מהירה למשתמש	פלטימס, RGB + Tzogahe Buzzer	7
Wi-Fi Hotspot FPV, שלט PC אינפרא-אדום, ממשק	ש망אפשרים שליטה באופנים מוגוונים : אפליקציית FPV, שלט IR או ממשק מחשב דריך ROS2	כלי שליטה חיצוניים	8
2000 mAh, 2.1 שעות	מאפשרת פועלה רציפה ללא תלות במתוך קווי, עבודה בשטח ובזמן אמות	ספקת אנרגיה : סוללה 2S 7.4 V Lipo	9
כולל חיבורים ל-I2C, מנועים, OLED, חיישנים, משדר IR, דחפים וכפתורים	משק בין Raspberry Pi לחישנים, מנועים ורכיבים אקטואטיביים אחרים	לוח הרחבה (Expansion Board)	10

טבלה 1: מפרט תכני

2.5 תרשימים מלכניים:



איך לתרגם מילון

2.6 עקרון פעולה המערכת:

המערכת מבוססת על יחידת עיבוד ראשית Raspberry Pi 5 המחברת למלמת USB באיכות 1 MP המותקנת על מתקן PTZ דו-צירי (2DOF) ולמוך מגע קיבולי בגודל 7 אינץ'.

בעת הפעלת המערכת, הרובוט מתחבר לסייעתו ומוחילה לאסוף נתונים מהמצלמה ומהחישנים השונים (אולטרסוני, חייני מעקב, סרגל תאורה RGB). המידע שנאסף עובר עיבוד בזמן אמת באמצעות ספריית OpenCV ומסגרת MediaPipe לזיהוי פנים, מעקב אחר תנועות, זיהוי צבעים, מחוות ידיהם ולוחות רישוי.

במקביל, תצוגת הרובוט בمسך המגע מדמה הבוות פנים ורגשות בהתאם לסייעאה באמצעות משק גרפי (GUI) אינטואיטיבי. מערכת החישה והעיבוד מתואמת עם מנועי גלגלי - Mecanum המאפשרים תנועה חכמה וחילקה לכל כיוון, תוך הימנע ממכשולים בעזרת חייני האולטרסוני.

המערכת משלבת בין עיבוד נתונים, תגובה מיידית ותנועה מתקדמת לייצור אינטראקטיבית טבעיות וחכמה עם המשתמשים והסביבה.

3. מטלות:

3.1 מטלות הנדסיות:

- תכנון ובנית המערכת המכנית – הרכבה שלדת מרכבת, התקנת גלגליים ומנועים**
لتנועה חכמה.
הערכה זמן : שבועיים
- חיבור והטמעת רכבי החומרה – שילוב מלמת USB על מתקן PTZ, חייני אולטרסוני, מסך מגע קיבולי, חייני מעקב OLED, ותאורת RGB.**
הערכה זמן : שבוע
- פיתוח אלגוריתמים לעיבוד תמונה וזיהוי אובייקטים – יישום OpenCV ו-MediaPipe**
לזיהוי פנים, מעקב תנועות, זיהוי צבעים ומחוות.
הערכה זמן : שלושה שבועות
- פיתוח משק גרפי – (GUI)** עיצוב ובנית תצוגת רגשות ודמות אינטראקטיבית על מסך המגע.
הערכה זמן : שבועיים
- פיתוח מערכת בקרה ותנועה – כתיבת קוד לשיליטה במנועים וגלגלים, תיאום תנועה חילקה בעזרת חייני אולטרסוני.**
הערכה זמן : שבועיים
- אינטגרציה בין רכבי חומרה לתוכנה – חיבור מלא בין המערכת המכנית, חיינים,**
אלגוריתמים וממשק המשתמש.
הערכה זמן : שבועיים

- בדיקות מערכת ואופטימיזציה** – הרצת ניסויים, איתור תקלות ושיפור ביצועים למערכת יציבה ויעילה.
- הערכת זמן : שבועיים**
- הנת דוח מסכם והציגת הפרויקט** – כתיבת דוח טכני, הנקת מצגת והדגמת המערכת.
- הערכת זמן : שבוע**
- סה"כ משך זמן מוערך : כ-12 שבועות.**

3.2 ביצוע המטלות ע"י המתמחה :

3.2.1 שלבי התכנון :

שלבי התכנון וביצוע המטלות

המשימות בוצעו בהתאם לארבעה תחומים עיקריים, עם הפרדה ברורה בין תכנון חומרה, תוכנה, תקשורת ו-interface חכמה:

א. פיתוח ממשק IP להעברת נתוניות

מטרה: ליצור ערוץ תקשורת י济ב להעברת תמונות, קבצי לוג או CSV בין מערכת הלבישה למרכז הבקרה (או לסביבה חיצונית).

ביצוע:

- שימוש ב-ROS וב-Wi-Fi לצורך תקשורת IP/TCP בין רכיבי המערכת.
 - כתיבת מודול Python (Publisher/Subscriber), המאפשר שליחת קבצים (תמונות, לוגים) בזמן אמת.
 - בדיקה עם משלוח ומעקב של קבצים בין הלוח לרובוט, תוך חיווי חזותי על שידור מוצלח.
- תוצאה:** ממשק תקשורת אמין לשילוח נתונים מקומי ובין-מכונה.

ב. פיתוח מודול AI לזיהוי מחוות, פרצופים ותנועות גוף

מטרה: להעניק לרובוט יכולת אינטראקציה טبيعית עם משתמש, לזיהוי מחוות ותנועות גוף.

ביצוע:

- שימוש ב-OpenCV ו- MediaPipe לזיהוי תווים חזותיים (כולל פרצופים ומחוות גוף) בזמן אמת.
- עריכת ניסויים : ביצוע תרחישי תנועה שונים (הציג פנים, הרמת יד, תנועה מקוונת) כדי לכלייל Thresholds ורגישות.

- הטמעת תగובה מהירה לדוגמה: שינויצבע פס RGB או תצוגת טקסט/קול בהתאם למחווה מזוהה.
- **תוצאה:** אלגוריתם יציב שמזהה מחוות תוך זמן תגובה מהיר ומונחה זיהוי אמין בסביבה מבוקרת.

ג. תכנון חומרה וmieוקום רכיבים במערכת הלבישה

מטרה: לארגן פיזית את הרכיבים על הגוף הרובוטי לחווית אינטראקטיבית חלקה ותפקוד רציף בשטח.

ביצוע:

- קביעת מיקום מצלמת ה-USB על גימבל PTZ לזרות ראייה מקסימלית.
 - סיור חיישני IR, אולטרסונייק, פס OLED ,RGB ו- buzzer באופן שמאפשר קלות גישה ונקודת חיבור נוחה ללוח ההרחבה.
 - בחירה בסוללה ליתיום (mAh 2000, V 7.4) הכוללת איזון משקל (פחות מ-100 גרם) ומספקת זמן עבודה ממוצע של כ-3 שעות.
- תוצאה:** מערכת יציבה, מאוזנת ומשקל נמוך — מתאימה לשימוש תנועתי ולא דורשת חיבור חיצוני במהלך פעילות.

ד. תכנון מרכז הבקרה ותפקידיו

מטרה: ליצור מודול בקרה חכם שמרכזו את עיבוד הנתונים, השמירה והtagובה בזמן אמיתי.

ביצוע:

- פיתוח מודול ROS2 ב-Python לתחוך אירופים, שמירתלוגים ותיעוד תמונות.
 - אינטגרציה עם רכיבים: תצוגת OLED להציג IP, מצב מערכת, מצב AI; פס RGB להציג סטטוס ו-buzzer-לאזהרות קוליות.
 - תכנון מנגנון תגובה — לדוגמה: בעט זיהוי מזוהה, שינוי צבע הפס והציגת הודעה על המסך.
- תוצאה:** מרכז בקרה שמנטור את הפעולות, מתעד ויכול להתריע בזמן אמיתי על אירופים.

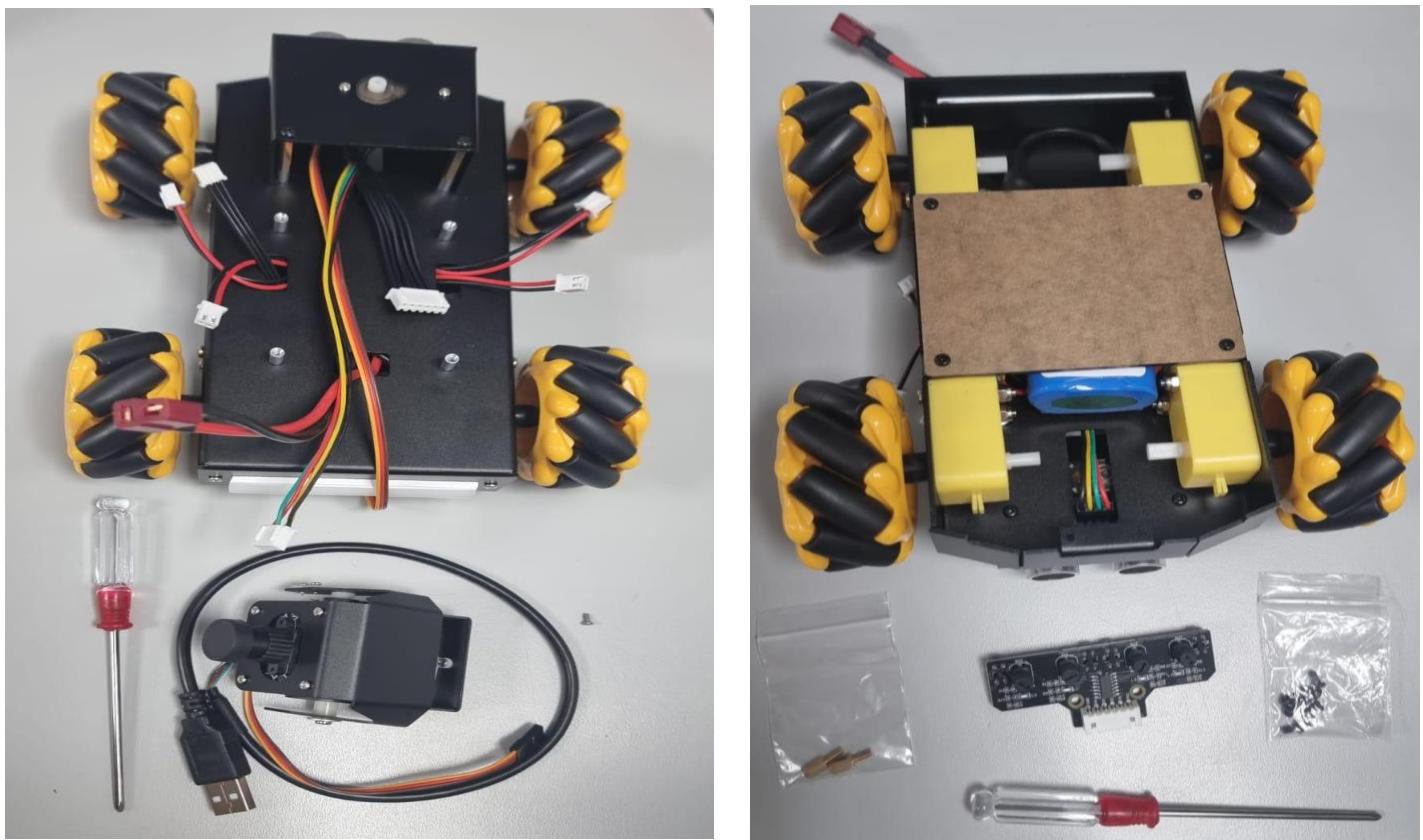
איך התחילנו



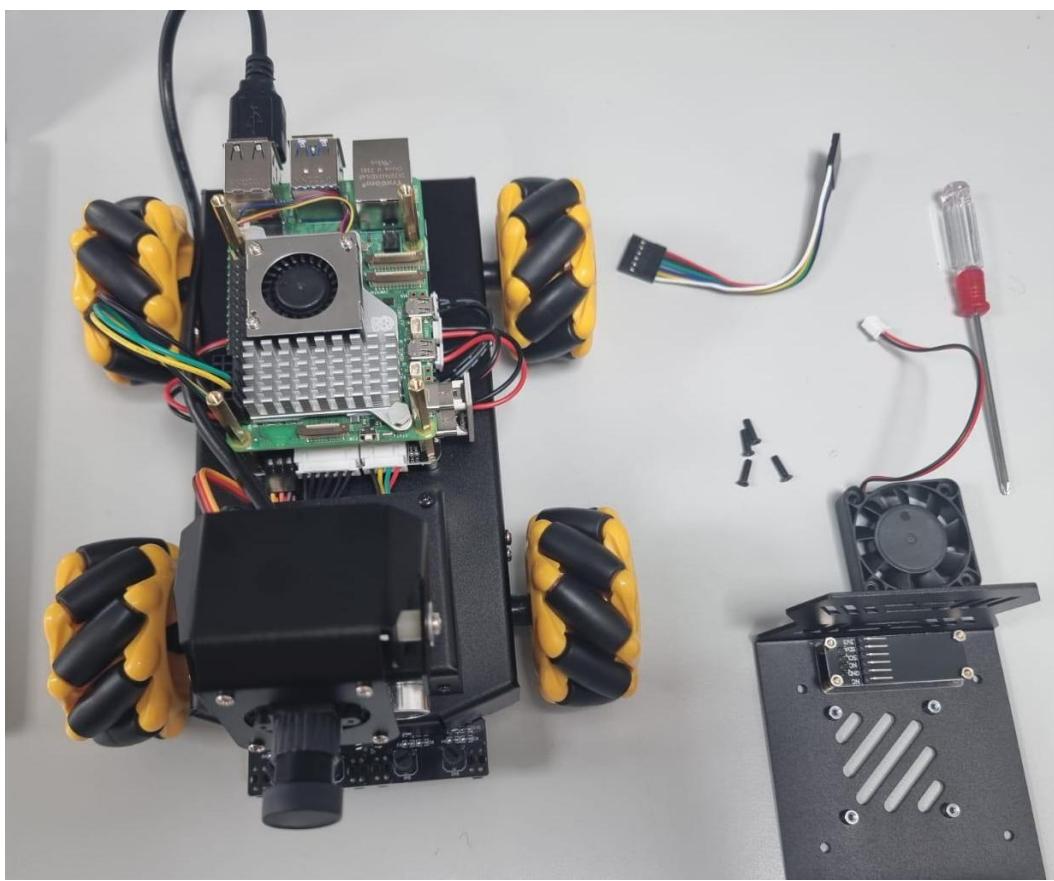
איור 2: הרכבת המכונית, שלב 1



איור 3: הרכבת המכונית, שלב 2



איור 4: הרכבת המכונית, שלב 3



איור 5: הרכבת המכונית, שלב 4



איור 6: מסך LCD



איור 7: רכב מלא ללא מסך



איור 8: התוצאה הסופית

3.2.2 תכנון אב

סביבת פיתוח :

סביבת הפיתוח שנבחרה לפרויקט זה מבוססת על שפת **Python** ועל מערכת הפעלה **Linux** המותקנת על גבי בקר ה-5 Raspberry Pi. הבחירה ב-**Python** נובעת מחזינות הרחבה של ספריות מתקדמות וחזקות בתחום הרובוטיקה, ראייה ממוחשבת והבינה המלאכותית.

הפרויקט מתבסס באופן מרכזי על שתי ספריות קוד פתוחות :

1. **OpenCV** : משמשת לביצוע משימות עיבוד תמונה בזמן אמת, כגון זיהוי צבעים ומעקב אחר אובייקטים.

2. **MediaPipe** : ספרייה של גוגל המאפשרת זיהוי מתקדם של תווים פנים, מחוות ידיהם ותנועות גוף, ומספקת יכולות אינטראקטיבית טבעית עם המשתמש.

בנוסף, כל המערכת מנוהלת תחת

ROS2 (Robot Operating System 2, Humble Edition), המספקת תשתיית מודולרית לתקשורת בין רכיבי הרובוט (צמתים), ניהול נתונים, וכליים מתקדמים לווייזאליזציה ובקרה. סביבה זו נבחרה כדי לאפשר פיתוח הדרגתני, גמישות ויכולת הרחבה עתידית של הפרויקט.

בקרים :

הבקר הראשי שנבחר עבור הרכיב הרובוטי הוא **Raspberry Pi 5**. בקר זה נבחר בזכות יכולות העיבוד החזקות שלו, המאפשרות לו להריץ אלגוריתמים מורכבים של ראייה ממוחשבת ובנייה מלאכותית בזמן אמת. ה-5 Raspberry Pi משמש כיחידת העיבוד המרכזי (CPU) של המערכת, והוא אחראי על :

- איסוף ועיבוד נתונים מכלל החישנים (מצלמה, חיישנים אולטרסוניים, חיישני עקיבה).
- הרצת סביבת ROS והקוד שנכתב ב-**Python**.
- קבלת החלטות אוטונומיות הבוססות על הנתונים, כגון הימנעות ממכשולים, מעקב אחר אובייקטים ותגובה למחאות.
- שליטה על כלל הרכיבים ההיקפיים, כולל המנועים, מסך המגע, תאורת ה-RGB והזזם, באמצעות לוח הרחבה ייעודי.

הבקר כולל יכולות תקשורת אלחוטית (Wi-Fi), המאפשרות שליטה מרוחק והעברת נתונים למערכות חיצונית.

תיכון חומרה:

- מצלמת 1MP USB + גימבל PTZ-2 :** מצלמת HD המותקנת על מתון ממונע המאפשר תנועה דו-צירית (אופקית ואנכית). המצלמה משתמשת כ"عينים" של הרובוט ומאפשרת יישומים כמו מעקב פנים, זיהוי מוחות וסריקת הסביבה. היא מתחברת לבקר באמצעות כבל USB ואינה דורשת התקנת דרייברים.(Plug-and-Play).
- **גלגלי Mecanum :** ארבעה גלגלים מיוחדים המאפשרים לרכב תנועה ב-360 מעלות. כל גלגל מורכב מגליילים קטנים המותקנים בזווית של 45 מעלות, מה שמאפשר תנועה קדימה, אחורה, הצד, אלכסון וסיבוב במקום על ידי שליטה בכיוון ובמהירות של כל מנוע בנפרד.
 - **מסך מגע קיובלי 7 אינץ' :** מסך ברזולוציה של 1024 X 600 המשמש כמסך משתמש אינטראקטיבי. הוא מאפשר להציג מידע חיוני, ויזואלייזציה של זיהויים, מסך גרפי (GUI) המדמה הbuffת פנים, ולקבל קלט מהמשתמש ישירות על גבי הרובוט.
 - **חיישן אולטרסוני :** חיישן למדידת מרחק המשמש למניעת התנגשות במכשולים. הוא פועל על ידי שליחת גל קול וחישוב המרחק על סמך הזמן שלוקח להד לחזור.
 - **חיישן עקיבה 4 ערוצים :** מודול המכיל ארבעה חיישני אינפרא-אדום, המאפשר לרובוט לעקוב אחר קו שחור על משטח לבן (ולחיפה). החישושים מזהים את החור האור מהמשטח ובהתקנים לכך מאפשרים ניוט מדויק לאורך מסלול מוגדר.
 - **מסך OLED 0.91 אינץ' :** מסך קטן ברזולוציה של 128x32 אפיקסלים, המתחבר לבקר באמצעות פרוטוקול I2C. הוא משמש להציג מידע מערכת חיוני ומהיר, כגון כתובות IP, עומס על המעבד, או מצב הסוללה.
 - **לוח הרחבה(Expansion Board) :** לוח ייודי המשמש כמתווך בין בקר ה-Raspberry Pi 5 לבין הרכיבים העיקריים השונים. הוא מספק חיבורים מסוימים למנועים, לסרויים, לחישונים, לתאורת RGB ולזזם, ומנהל את אספקת המתח לרכיבים השונים.
 - **סוללה ליתיום 2000mAh, V7.4 :** מספקת את האנרגיה הדרושה להפעלת המערכת באופן אלחוטי, ומאפשרת זמן עבודה רציף של כשבתיים-שלוש.

תכלן תוכנה:

מודול AI ליזיהוי ואינטראקטיבית חזותית: פותח מודול ב-Python המשמש בספריות OpenCV ו-MediaPipe לעיבוד הווידאו המתkeletal מהמצלמה בזמן אמת. הקוד אחראי על:

- **זיהוי פנים, מחוות ותנועות גוף:** האלגוריתם מנתח כל פריים מהוידאו כדי לזהות דפוזים מוכרים כמו פנים אנושיות או תנועות ידיהם ספציפיות.
- **תגובה חזותית וקולית:** בעת זיהוי מוצלח, המערכת מפעילה תגובה, כגון שינוי צבע בתאורת-h-RGB, הצגת הודעה על המסך או השמעת צליל מהזומזם.

מערכת AI לשיחה אינטראקטיבית: כדי לאפשר אינטראקטיבית קולית טבעיות, שולבה מערכת שיחה הבנויה משלושה רכיבים מרכזיים:

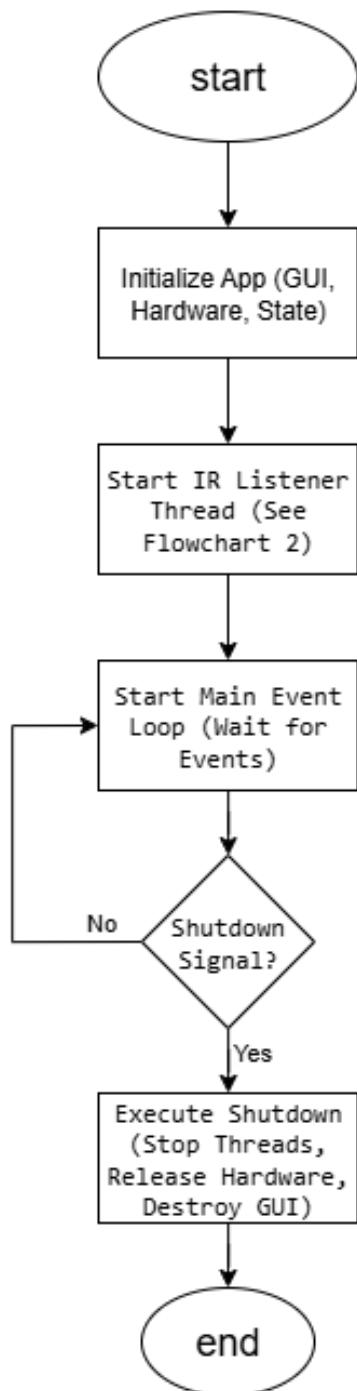
- **Vosk (דיבור לטקסט - STT):** ספרייה קוד פתוח המשמשת להמרת הדיבור של המשתמש, הנקלט דרך מיקרופון, למחזרות טקסט.
- **gemma2:2b (מודל שפה גдол – LLM):** מודל AI המקבל את הטקסט המומר, מנתח את כוונת המשתמש ומיציר תגובה טקסטואלית אינטלקנטית ורלוונטית.
- **piper-tts (טקסט לדיבור – TTS):** מנוע המקבל את התגובה הטקסטואלית ממודל השפה וממיר אותה לקובץ שמע קולי, המושמע דרך רמקולים.

ממתק תקשורת מבוסס ROS2: התקשרות בין חלקים התוכנה השונים (למשל, קוד עיבוד התמונה וקוד בקרת המנועים) ממומשת באמצעות ארכיטקטורת Publisher/Subscriber של ROS2. מודל זה מאפשר העברת נתונים (תמונות, פקודות, מידע מחיישנים) באופן אמין וייעיל בין "צמתים" שונים במערכת. התקשרות מתבצעת על גבי רשת Wi-Fi בפרוטוקול TCP/IP.

מערכת בקרה ותגובה: נכתב קוד ייודי השולט במנועי ה-DC-Shield גלגלי-h-mecanum. הקוד מקבל פקודות תנואה ומירגם אותן למהירות וסיבובים הנדרשים מכל אחד מארבעת המנועים. המערכת משלבת את נתוני החישון האולטרסוני כדי למשיכן יכולות אוטונומיות של הימנעות ממכתשולים.

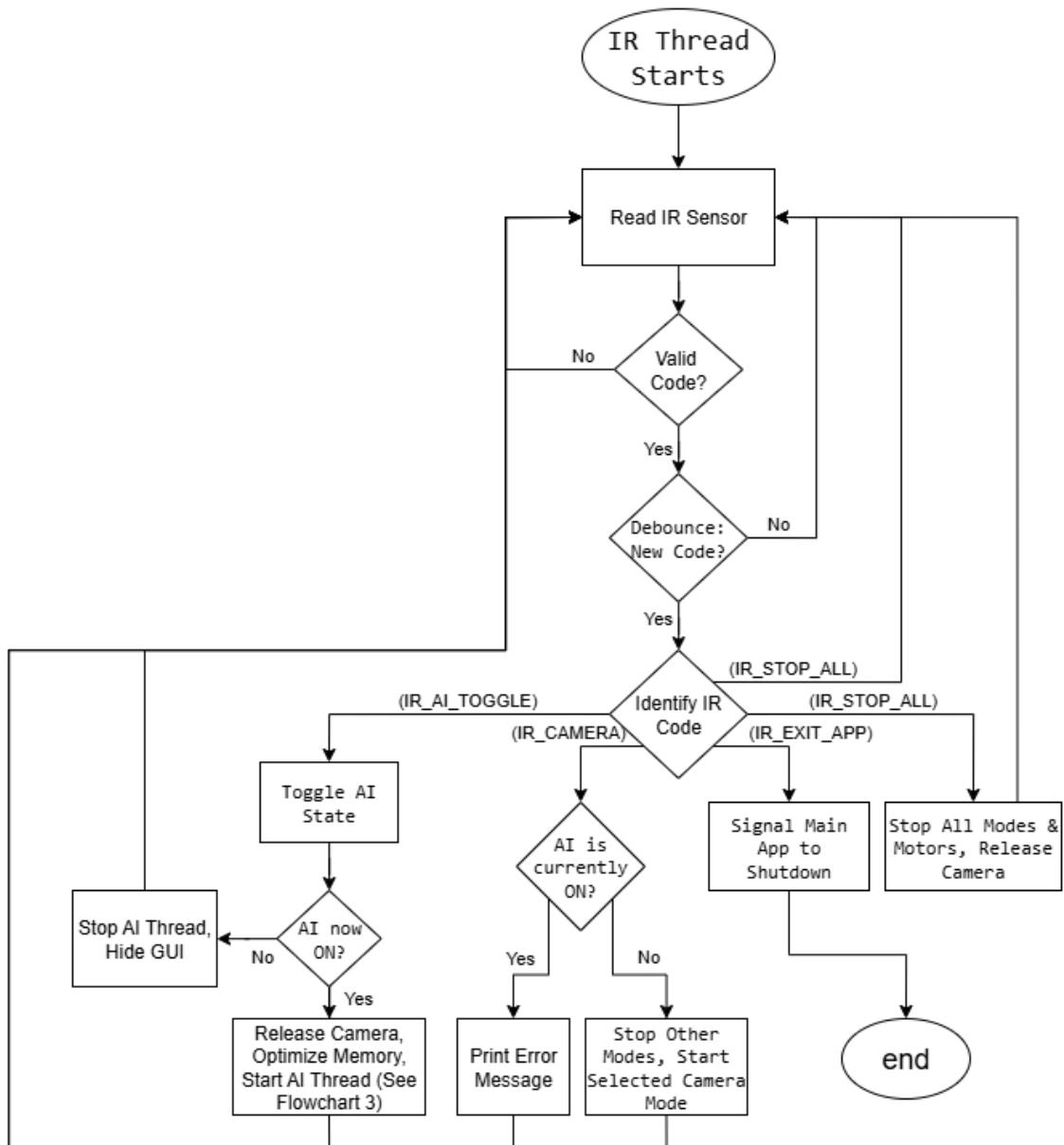
ממתק גרפי (GUI): פותח ממתק משתמש עבור מסך מגע בגודל 7 אינץ'. הממתק נועד להציג דמות אינטראקטיבית שמגיבה למתרחש בסביבה ומדמה רגשות. מערכת השיחה הקולית מסונכרנת עם הממתק הגרפי, כך שתנועות השפתיים והבעות הפנים של הדמות תואמות לדיבור המופק, ובכך נוצרת חווית שימוש טבעיות וסוחפת יותר.

Main Application flow



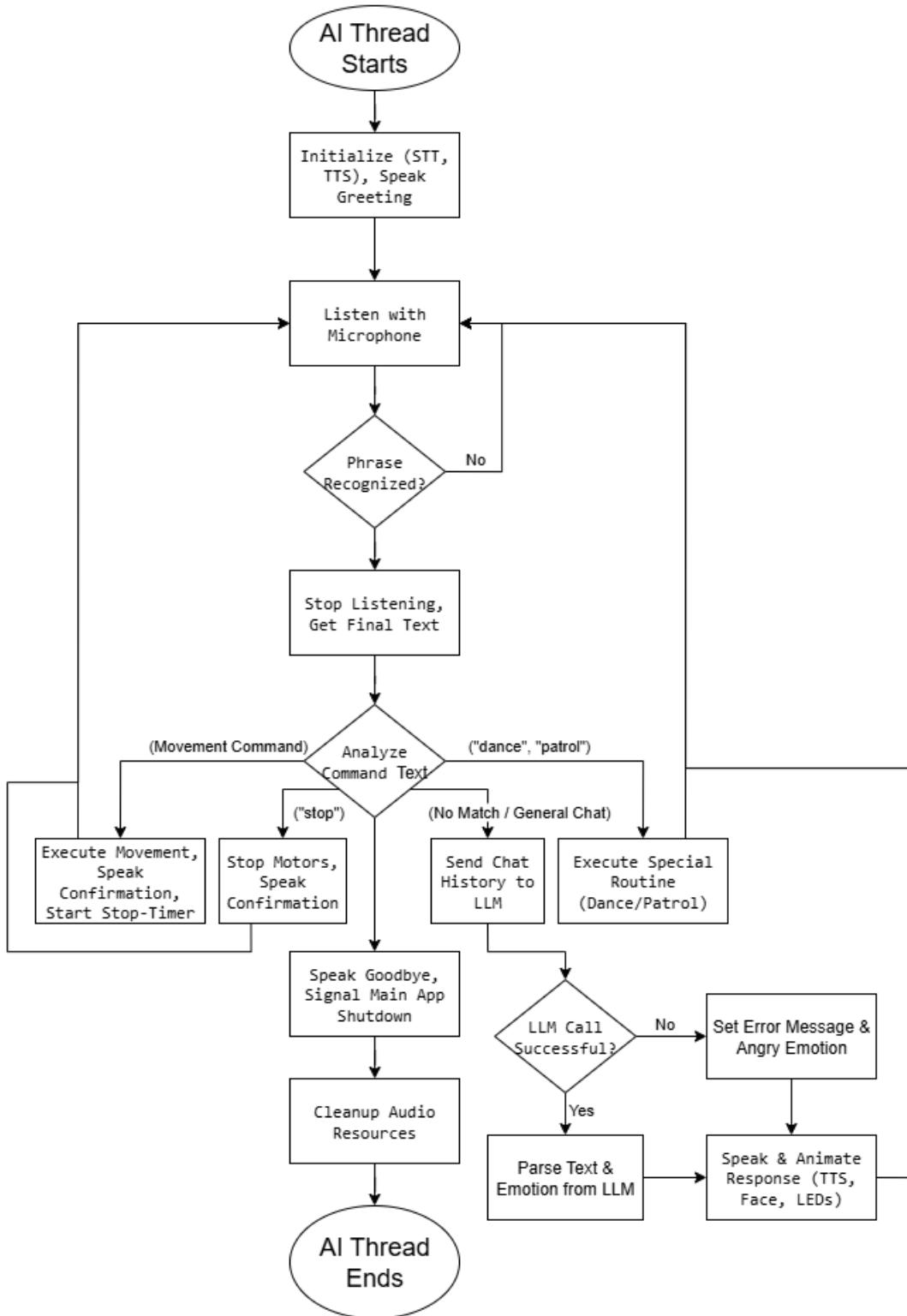
איור 9: תרשים זרימה כללי

IR Remote Trigger



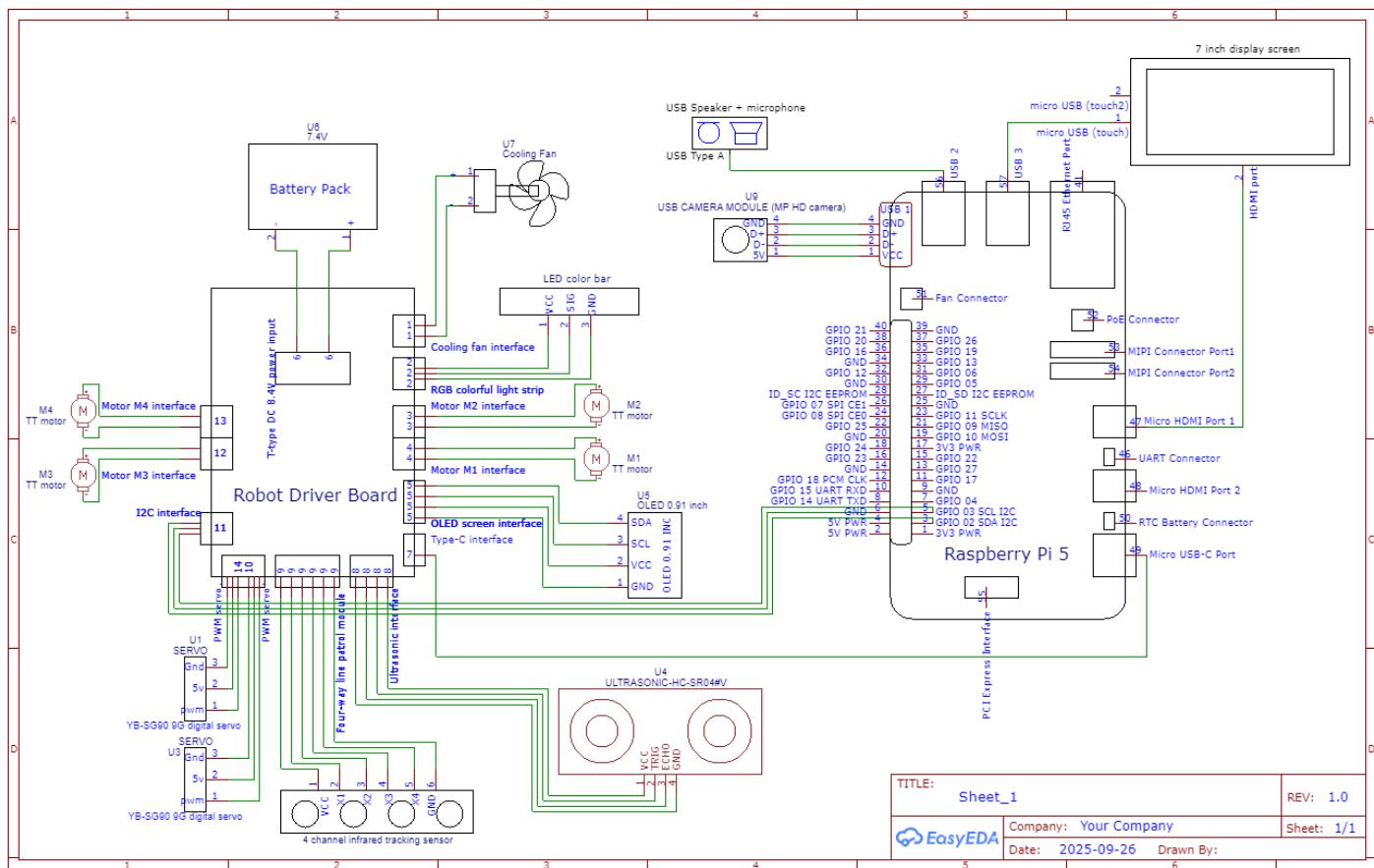
איור 10: תרשים זרימה IR

AI Chatbot Logic



איור 11: תרשים זרימה AI

3.2.4 סכמה חשמלית



איור 12: סכמה חשמלית

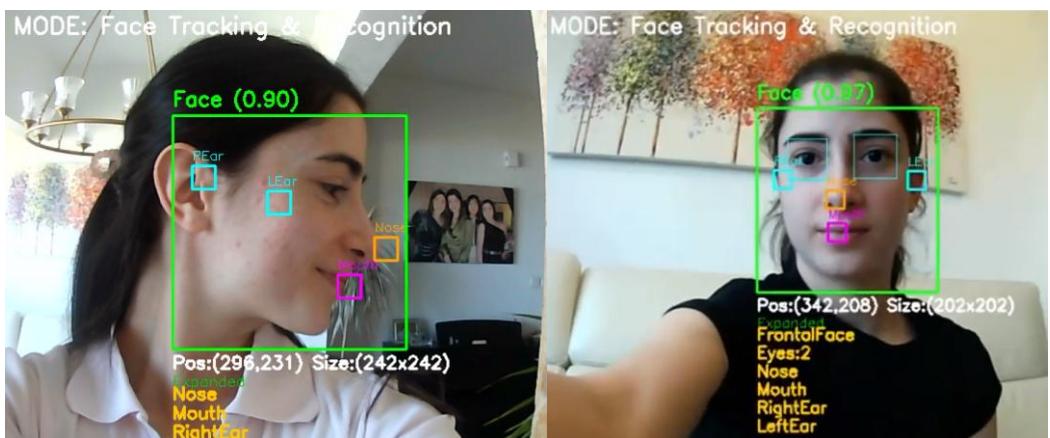
3.2.5 סימולציות

בחלק זה נבצע מספר בדיקות וסימולציות על היבטים ופונקציות שונות של "Marich". הבדיקה תחולק לשני חלקים עיקריים, הראשון יחקור את כל פונקציות הבינה המלאכותית הוייזואלית של המצלמה, והשני יעבור על פונקציות הבינה המלאכותית של LLM:

המלאכותית הוייזואלית:

- זיהוי פנים ומעקב:

כאנ בדקנו את יכולתה של המצלמה לזהות את פניו ולעקוב אחריהם. תחילת בדקנו אותה בתנאי תאורה טובים, הנה כמה תמונות מהבדיקה:



אирו 13: זיהוי פנים באור חזק

הבדיקה הראתה לנו בבירור שזיהוי הפנים והמעקב עובדים מוצין, היא אפילו ניבאה היכן אמורים להיות חלקיק פנים מסוימים.
לאחר מכן בדקנו את הפונקציה זו בתנאי תאורה שונים:

רמת אור בינוני:



אирו 14: זיהוי פנים באור בינוני

רמת אoor נמוכה :

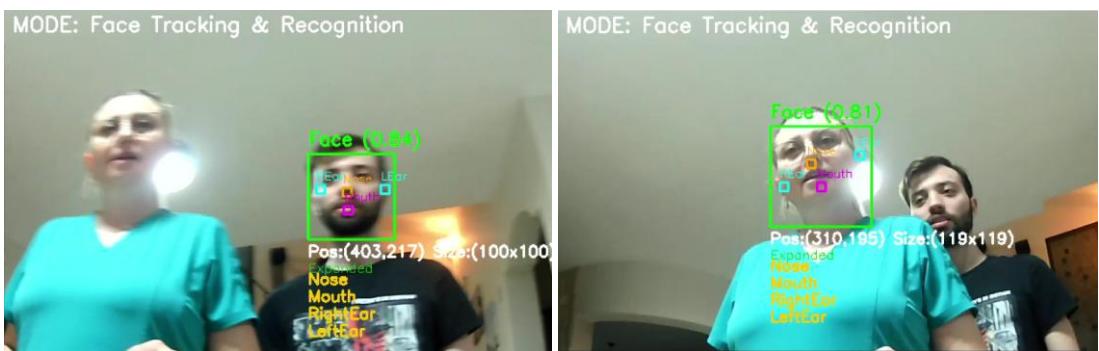


איור 15 : זיהוי פנים באoor נמוכה

כפי שניתן לראות לעיל, בתנאי תאורה בינוניים, זיהוי הפנים והמעקב עדין אמינים למדי, אם כי ניתן לראות דרך המספרים בתמונות שהתוכנית פחותה ב佗וחה בהחלטתה.

ואז, כאשרחנו עוברים לתנאים חשוכים עוד יותר, כפי שניתן לראות בקובץ התמונות האחורונה, התוכנה עדין יכולה לזרות מדי פעמי פרצופים, אבל היא גם מתחילה "לזהות" אותם גם במקומות בהם הם לא קיימים. בתנאי תאורה כאלה יכולות המעקב אינן אמינים.

הדבר האחרון שרצינו לבדוק בנוגע למספר פנים הוא התנהגות התוכנית כאשר מספר פנים נמצאות ב佗וח הראייה שלה :

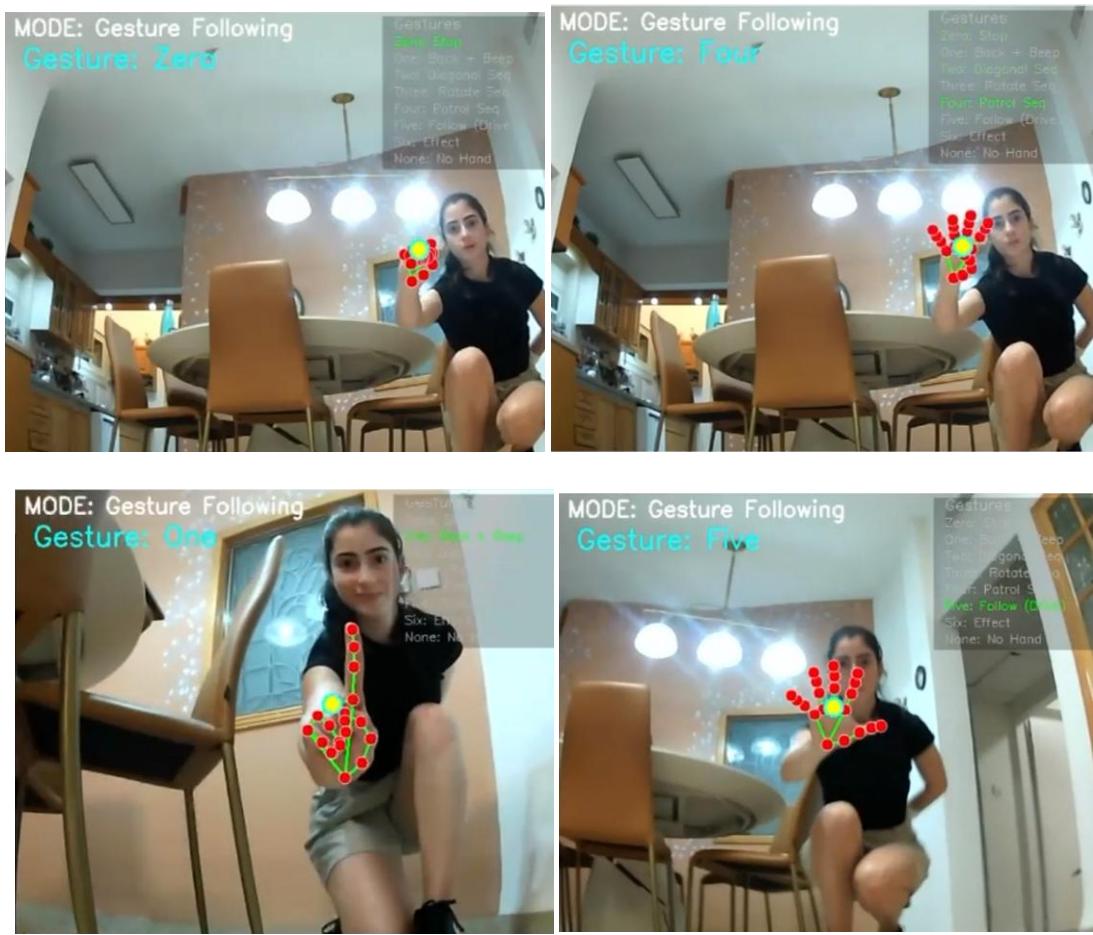


איור 16 : זיהוי פנים כאשר מספר פרצופים זמינים

מהבדיקה ראיינו שהתוכנית מזזה ומתמקדת בפנים אחד בכל פעם, תוך מעבר בין אנשים שונים מדי פעם. נראה כי נוכחותם של מספר אנשים לא הפרעה לכ יכולות המעקב שלה.

• תנועת יד עוקבת :

מצב זה עוקב אחר מיקום היד ומזזה כמה אצבעות מזרמת. יש לו 6 מצבים התנהגות, בהתאם למספר האצבעות המזרמת, מ-0 עד 6 (6 הוא כאשר רק האגודל והזרת מזרמת). הנה כמה תמונות של התוצאות.



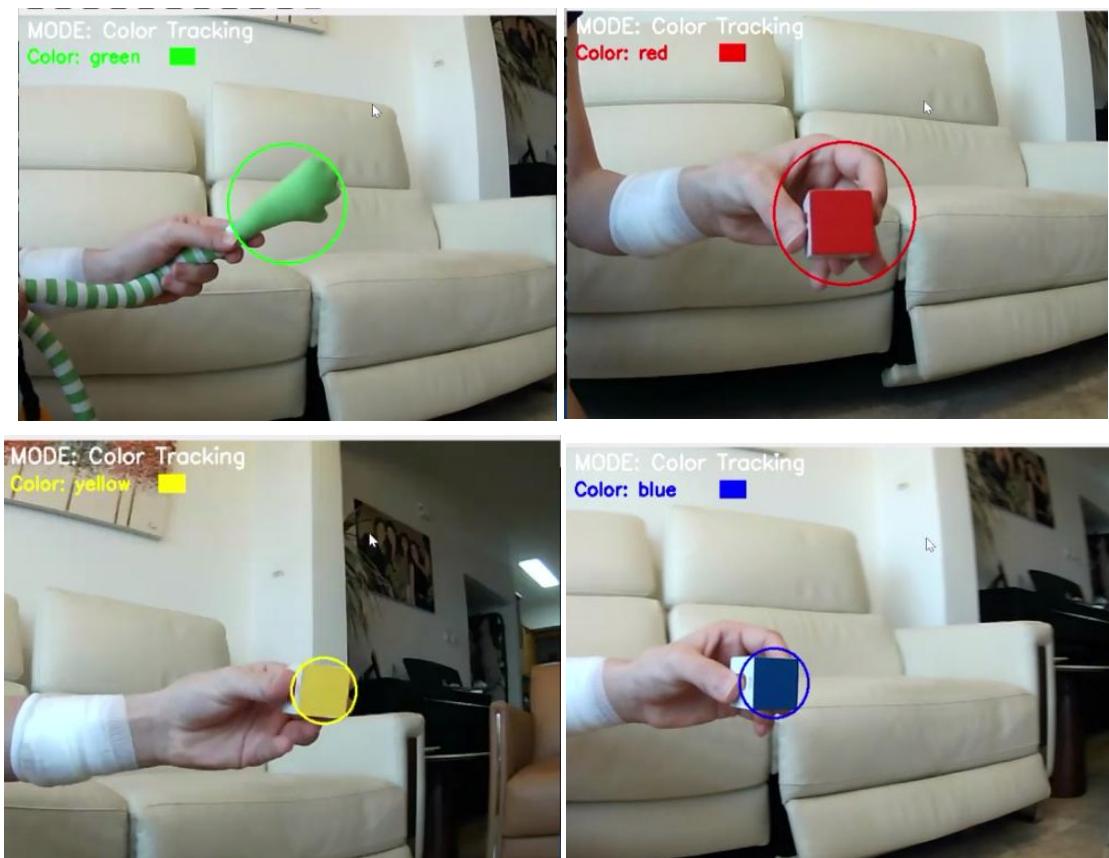
איור 17: תנועת יד עוקבת

המערכת הזו עבדה מצוין, אפילו ממרחקים גדולים יותר. הגיבה למחוות בצורה הנכונה, ולא איבדה הרבה קשר עם היד.

• **מעקב צבעים :**

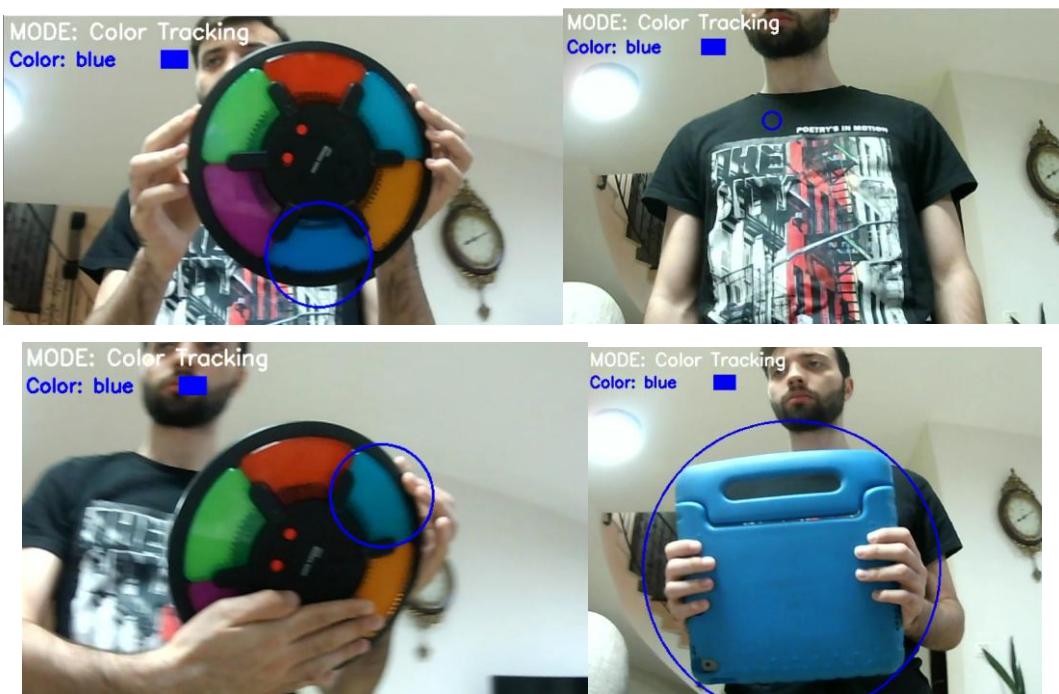
כאן נוכל להגיד אם איזה צבע נרצה לעקוב, והמצלמה שילך תעקוב אחריו, הנה כמה

דוגמאות :



איור 18: זיהוי צבע

כאשר ניתנה לה אדום או כחול בסיסי, המערכת לא התקשתה לזהות אותו ולעקוב אחר כך. כדי לבדוק זאת לעומק בדקנו גוונים שונים של כחול :



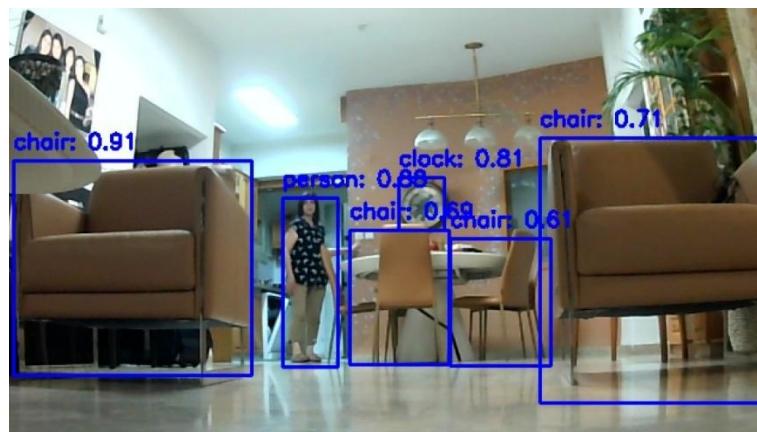


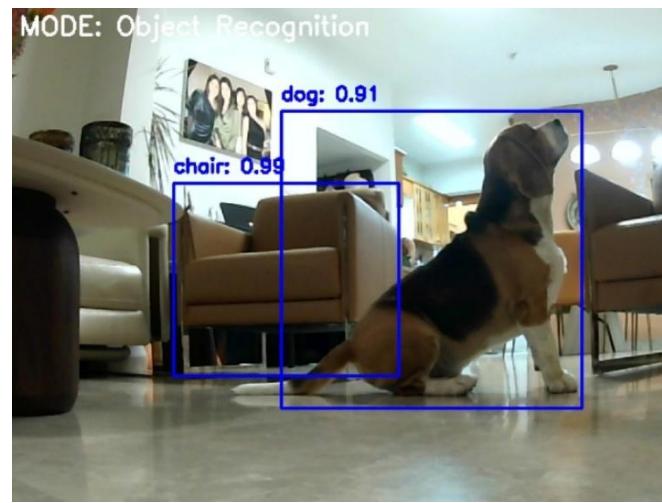
איור 19: זיהוי גוונים שונים של כחול

כפי שניתן לראות, גווני כחול ב嚷ון רחב של גוונים זוחו בצורה נcona (הכחולים השונים נראים שונים יותר זה מזה במציאות), זה מראה שהמערכת לא צפופה לפספס משאנו כחול, אולם היא גם זיהתה את החולצה שלי ככחולה מספר פעמים במהלך הבדיקה, כשהלמזה היא שחורה, כך שאולי טוח הערכים הנחשיים ככחולים רחב מדי.

- **זיהוי אובייקטים :**

מצב זה יכול לזהות עצמים שונים בתצוגת המצלמה, כגון אנשים, כלבים, כיסאות, שעונים ועוד ...





איור 20: זיהוי אובייקטים

במבחן שלנו, ראיינו שיכולה הזיהוי, למרות היותה טובה למדי, יכולה לעיתים להטעם מוחזרים, כמו אורות או צירום, או לזיהות אותם בטעות. לדוגמה, המאמן זיהה כיושבר ראש במבחן אחד, וכמאמן אחר. זיהוי שגוי זה אינו כזה גרווע.

- **זיהוי לוחות רישוי:**

ולבסוף, מצב זה יכול לזיהות לוחות רישוי ואת המספרים הכתובים עליהם.

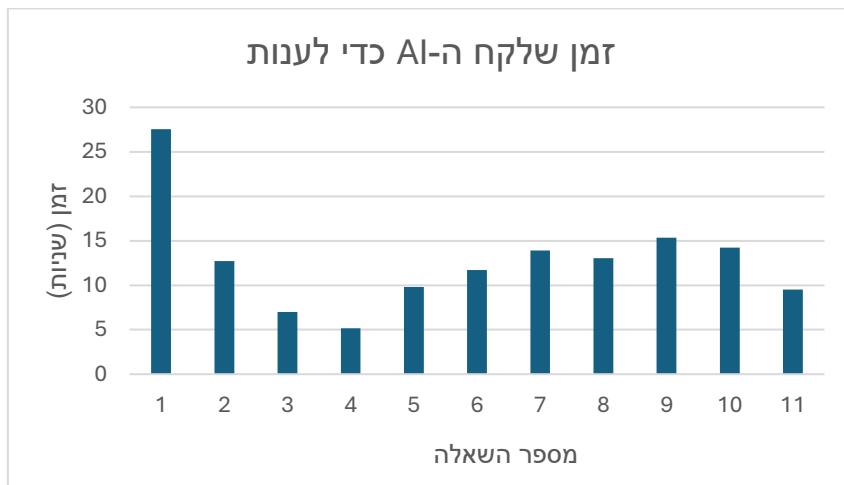


איור 21: זיהוי לוחות רישוי

כפי שאנו רואים, הוא מזזה את המספרים بصورة נכונה, אך לוחית הרישוי לא צריכה לנوع מהר וקרוב מספיק כדי שיזוהו.

הבינה המלאכותית של LLM:

- זמן התגובה של ה-LLM
במבחן הראשון שלנו, טענו את מודל ה-LLM ושאלנו אותו 10 שאלות, בכל פעם תיעדנו כמה זמן לקח לו להגיד:



גרף 1 : זמני התגובה של ה-AI

העמודה הראשונה מציינת את הזמן שלקח למודל LLM להיטען, ולכון זה לקח את הזמן הארוך ביותר. שאר העמודות מציינות את הזמן שלקח לשאלות שונות לקבל תשובה. ניתן לראות שהזמן נע בין מינימום של 5.15 שניות למקסימום של 15.37 שניות.

- רמת הבנה:
באמצעות אותן 10 שאלות לעיל, אנו מסוגים את השאלות לשאלות מורכבות ושאלות פשוטות. שאלת מורכבת היא שאלת שמסתמכת על תשובות קודמות (זיכרונו של הבינה המלאכותית) והכילה סרקיים או בדיחות.

אחוז הדיווק	עגה נכון	מספר השאלות	מורכבות השאלה
100%	5	5	פשוט
60%	3	5	מסובך
80%	8	10	כל השאלות

טבלה 2 : דיקוק התשובות

מהתוצאות ניתן לראות שכאלת שאלת פשוטה, הבינה המלאכותית נותנת תשובה סבירה, אך כאשר נשאלת שאלה מורכבת יותר, הבינה המלאכותית מתחילה להתקשות ועלולה לעשות טעויות.

שmeno לב גם שההבדל בין השאלות המורכבות שקיבלו תשובה מדויקת, לבין השאלות המורכבות שקיבלו תשובה לא מדויקת, הוא שבسؤالים היו פחות מילים בניסוח השאלה, מה שנתן לבינה מלאכותית פחותה הקשור לעובוד אליו, בעוד שהسؤال הפורמלי היה ארוך יותר, מה שנתן לבינה מלאכותית יותר הקשור לעובוד אליו.

דיקן הרגש שהוולוג היה קשור גם לדיקון התשובה, דבר זה מראה ששיטת הבחירה וההצגה של רגש מתאימה היטב ועובדת כמתוכנן.

לבסוף, מבחינת זיכרון, הבינה המלאכותית נועדה לזכור עד 3 שאלות ותשובות אחרות, ובאמצעות הבדיקות שלנו ראיינו שזה המצב.

3.3 בעיות ואתגרים הנדרסים

במהלך הפיתוח של הרכיב הרובוטי החכם, התמודדנו עם מספר אתגרים הנדרסים משמעותיים שנבעו מהשילוב המורכב של חומרה מתקדמת, מערכות תוכנה מרובות ודרישות גבוהות לאינטראקציה בזמן אמת.

1. עיבוד בינה מלאכותית בזמן אמת על חומרה מוגבלת :

אחד ממטרות הליבה של הפרויקט היא אינטראקציה טبيعית ומהירה. הפעלת מספר מודלי AI במקביל על בקר 5 Raspberry Pi הציבה אתגר חישובי ממשמעותי. המערכת נדרשה לעבד וידאו מהמצלמה בזמן אמת באמצעות MediaPipe (לזיהוי פנים, מחאות ותנועות גוף), ובמקביל להריץ את כל שרשרת האינטראקציה הקולית: זיהוי דיבור (STT), עיבוד שפה טبيعית באמצעות מודל שפה גדוול (LLM), והמרת טקסט לדיבור (TTS). האתגר היה לבצע אופטימיזציה לקוד, לנחל את משאבי המעבד והזיכרו ביעילות, ולבחור במודלים קל משקל מספק (כמו 2: gemma2) כדי להשיג זמן תגובה מהיר שייצור חווית משתמש חלקה ולא מקוטעת.

2. כיוול ובדיקה של מערכת הנעה רב-כיוונית (גלגלי Mecanum) :

גלגלי המকאנום מאפשרים לרובוט תמרון יוצא דופן של 360 מעלות, אך דיקון התנועה שלחם תלוי באופן קרייטי בכיוול ובקרה מדויקים. האתגר המכני והתוכנוני היה להבטיח שככל ארבעת המנוועים פועלים במתירות מסווגרת לחולטין כדי לאפשר תנועה ישירה (קדימה או צדית) ללא סחיפה (drift) או סיבוב לא רצוי. כל הבדל זעיר בביוצוי המנוועים, בחיכון הגלגלים עם המשטח או בחלוקת המשקל של הרובוט היה צריך להיות מפצה על ידי אלגוריתם הבקרה. הדבר דרש תהליך ממושך של ניסוי וטעייה לכיוונו פרמטרים בתוכנה כדי להגיע לתנועה חלקה, צפופה ואמינה.

3. אמינות מערכת הראייה הממוחשבת בתנאי סביבה משתנים :

ביצועי אלגוריתמי הראייה הממוחשבת (OpenCV ו-MediaPipe) תלויים מאוד בתנאי הסביבה. האתגר היה להבטיח זיהוי אמין של פנים, רגשות ומחאות בתנאי תאורה משתנים – אור חזק, צללים, או תאורה חלה. רקעים מורכבים או הסתרה חלקית של פני המשתמש או ידיו היו גם

הם מכשול. הפתרון דרש התאמות באlgorigthms, כגון נורמליזציה של התמונה, ושימוש מושכל ביכולות הגימבל (PTZ) של המצלמה כדי למקם את המשטמש במרכזו הפריים. עם זאת,/noter אתגר להתמודד עם מצב קיצון, והמערכת נדרשה להיות מתוכננת כך שתזהה מתי תנאי הסביבה אינם אפשריים זיהוי אמין.

4. הבנת פקודות קוליות בהקשר הנכון וסינכרון התגובה :

אתגר מרכזי היה להפוך את האינטראקציה הקולית לאמינה וaintroaitivity. התהליך כלל מספר שלבים : קליטת הדיבור (STT), הבנת הכוונה באמצעות מודל השפה (LLM), והפעלת תגובה מתאימה. נתקלנו בבעיות בזיהוי פקודות מורכבות שהיו משלבות בתוך משפט ארוך. במקרה, המערכת התקשתה לעיתים להבחין בין מילים שנאמרו כפקודה לבין מילים שנאמרו בהקשר אחר. לדוגמה, אמרית המילה "ימינה" כאישור ("נכון") גרמה לעיתים לרובוט לפנות ימינה פיזית. הפתרון דרש כiol של מודל השפה וקביעת מילות מפתח ברוחות יותר. אתגר נוסף היה לסincron את תחילת אינטראקציית הדיבור על המסך עם תחילת השמעת הקול מממשקת-TTS, כדי למנוע מצב שבו הדמות "מדברת" לפני שומוועים אותה, מה שפוגע בטבעיות של האינטראקציה.

5. אינטגרציה וסינכרון של מערכות חומרה ותוכנה מורכבות :

הפרויקט כלל שילוב של רכיבים רבים ומגוונים : בקר 5 Raspberry Pi, מסך מגע 7 אינץ' (הדורש חיבור HDMI ו-USB), מצלמת USB על גימבל PTZ ממונע,لوح הרחבה ייוד, חיישנים (אולטראסוני, מעקב), מנועים, סרוואו, תצוגת OLED ועוד. האתגר ההנדסי המרכזי היה לא רק לחבר פיזית את כל הרכיבים, אלא להבטיח תקשורת יציבה ונטולת קונפליקטים ביניהם. ניהול כל הרכיבים תחת מערכת הפעלה לרוביוטים (ROS2) דרש פיתוח "צמתים" (Nodes) ייודדים לכל רכיב, וסינכרון מדויק של העברת הנתונים ביניהם כדי למנוע עיכובים (latency) וכשלים במערכת.

4. סיכום ודיון :

4.1 הצורך בפרויקט :

ביעידן שבו טכנולוגיות נפגשות, פרויקט זה נולד מתוך רצון לחזור את הגבולות שבין אינטראקציה אנושית למcona. הצורך המרכזי היה ליצור פלטפורמה שהיא לא רק כלי לימוד מתקדם לטמודנטים וחובבי רובוטיקה ובינה מלאכותית, אלא גם ישות אינטראקטיבית המעוררת סקרנות, משחק והנהה.

הפרויקט עונה על מספר צרכים מרכזיים :

- **צורך חינוכי** : הוא משתמש כפלטפורמה נגישות וمتתקדמת המאפשרת למידה מעשית של טכנולוגיות מורכבות כמו ראייה ממוחשבת, בינה מלאכותית, ומערכות רובוטיות מבוססות ROS2.

- **צורך ביודורי:** הרובוט תוכנן להיות בן לוויה מהנה ומשעשע. היכולת שלו להגיב למוחות, לזרות רגשות ולהציג הבעות פנים משלו הופכת אותו ל"צעוע חכם" או אינטראקטיבי.
 - **צורך תפקודי:** מעבר למשחק, הרובוט פועל כעוזר אישי חכם. באמצעות שילוב מודל שפה מתקדם, הוא יכול לענות על שאלות, לספק מידע ולנהל שיחה, ובכך להציג את הפוטנציאלי של בינה מלאכותית בחיי היום-יום.
- שילוב ייחודי זה בין חינוך, ביודור ותפקוד יוצר מערכת רב-תכליתית המדגימה כיצד טכנולוגיה יכולה להיות אינטואטיבית, מרתתקת ומעילה בו-זמנית.

4.2 סיכום ומסקנות:

לסיכום, פרויקט זה עוסק בתכנון, פיתוח ואינטגרציה של רכב רובוטי חכם, המשלב בין חומרה מתقدמת לתוכנה מורכבת. לבת הפרויקט הייתה יצירת מערכת אינטראקטיבית המסוגלת לתקשר עם הסביבה האנושית באופן טבעי וឥוטאטיבי, תוך שימוש משקל חזותי וחן באמצעות שיחת קולית.

הפרויקט היהו אתגר הנדסי מרכיב, שדרש שילוב בין דיסציפלינות שונות: מכנית (הרכבת השלדה וגלגלי המנגנון), אלקטרוניקה (חיבור החישנים, המצלמה והבקרים), ותוכנה (פיתוח אלגוריתמים לעיבוד תמונה, ניהול מערכת הפעלה לרובוטים, וIMPLEMENTATION מודלי בינה מלאכותית ליזוחי חזותי ושיחת).

במסגרת הפרויקט נחשפנו לעומק לעולם ה-AI והרובוטיקה. רכשנו ניסיון רב בערך בפיתוח בסביבת Python, בעבודה עם ספריות קוד פתוח חזקות כמו OpenCV ו-MediaPipe, ובפיתוח ארכיטקטורת ROS2 לניהול מערכת מודולרית. ההתחמזה עס אटגרים כמו עיבוד נתונים בזמן אמת על חומרה מוגבלת וכיול מדויק של מערכות מכניות הקנתה לנו יכולות חשיבה יצירתיות ופתרונות בעיות. מעבר לערך הלימודי, הפרויקט סייפק לנו סיפוק אדיר ביצירת מערכת שקמה לתחייה ומגיבה לעולם באופן כה אנושי.

4.3 תוספות עתידיות:

הפלטפורמה שפותחה מהוות בסיס איתן להרחבות ושדרוגים עתידיים. להלן מספר כיוונים אפשריים להמשך פיתוח:

- **שיפור האינטראקטיביות והבינה המלאכותית:**
 - **הבנייה קונטקטואלית של פקודות:** כולל מערכת זיהוי הדיבור כך שתדע לה辨ין בין שיחת רגילה לבין פקודה המיועדת לרובוט, על סמך הקשר המשפט ומיilot מפתח.
 - **שילוב בין ראייה ממוחשבת למודל השפה (LLM):** יצירת אינטגרציה עמוקה יותר, כך שתגובהיו של הרובוט יושפעו לא רק מהשאלה הקולית, אלא גם

מגורמים בסביבה הנקלטים דרך המצלמה, כמו הבעת הפנים של המשתמש או זיהוי אובייקטים בחדר.

- זיהוי וזכור אישי: הוספה יכולה לזהות משתמשים ספציפיים באמצעות זיהוי פנים, ולפתח "זיכרון" ארוך המאפשר לרובוט לזכור אינטראקציות קודמות ולהתאים את תגובתו באופן אישי.

• שיפור ביצועים וחומרה:

- האצת תגובה ה-AI: בחינת שימוש בחומרה ייעודית להאצת חישובי بينما מלאכותית (כמו Nvidia Jetson או Google Coral) כדי ל凱ר את זמני התגובה של המערכת, במיוחד במודול השפה.

• הרחבת הפונקציונליות:

- הוספת משחקים ורגשות: פיתוח ישומים נוספים כמו משחקי אינטראקטיביים המשלבים תנוצה וזיהוי, והרחבה מגוון ה"רגשות" והתשובות שהרובוט יכול להביע.
- הרחבת מאגר הפקודות: הוספה פקודות קוליות ומוחות חדשות שיאפשרו שליטה רחבה יותר על תנועות הרובוט ופעולותיו.

4.4 עמידה בדרישות:

בוצע בפרויקט	דרישות
בוצע	כתיבת הצעת הפרויקט.
בוצע	תכנון, הרכבה וחיבור כל רכיבי החומרה (שלדה, גלאים, מצלמה, חיישנים ומסך).
בוצע	IMPLEMENTATION יכולות וראייה ממוחשבת באמצעות
בוצע	IMPLEMENTATION מערכת ניווט ובראה (שליטה בגלגלי פיתוח ממשק משתמש גרפי)
בוצע	בנית משחקים אינטראקטיביים לשיפור האינטראקציה עם המשתמש.
בוצע	שילוב יכולות למידת מכונה)
בוצע	אינטרגרציה מלאה בין כל רכיבי החומרה והתוכנה במערכת.
בוצע	בדיקות המערכת בתנאים שונים, איתור תקלות וביצוע אופטימיזציה.
בוצע	כתיבת ספר פרויקט מסכם.

טבלה 3: עמידה בדרישות

5. ביבליוגרפיה:

1. DeepMind. (2024). *Gemma 2: Open language models*. Retrieved from <https://deepmind.google/discover/blog/gemma-2-open-models/>
2. MediaPipe. (2024). *MediaPipe Solutions*. Google AI. Retrieved from <https://developers.google.com/mediapipe>
3. OpenCV. (2024). *OpenCV-Python Tutorials*. OpenCV.org. Retrieved from <https://docs.opencv.org>
4. Piper TTS. (2024). *piper-tts: A fast, local neural text to speech system*. GitHub repository. Retrieved from <https://github.com/rhasspy/piper>
5. Raspberry Pi Foundation. (2024). *Getting started with Raspberry Pi 5 and Raspberry Pi OS*. Retrieved from <https://www.raspberrypi.com/documentation/>
6. ROS 2. (2023). *ROS 2 Documentation: Humble Hawksbill*. Open Robotics. Retrieved from <https://docs.ros.org>
7. Vosk. (2024). *Vosk Speech Recognition Toolkit*. Alpha Cephei. Retrieved from <https://alphacepheli.com/vosk>
8. HC-SR04 Ultrasonic Sensor. (n.d.). *Technical datasheet*. Retrieved from <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>
9. Mecanum Wheel Kinematics. (2020). *Mecanum wheel kinematics and dynamics – tutorial resources*. Retrieved from <https://automaticaddison.com/mecanum-wheels-kinematics/>
10. PyImageSearch. (2024). *OpenCV + Raspberry Pi tutorials*. Retrieved from <https://pyimagesearch.com/category/raspberry-pi/>

6. נספחים:

בקובץ zip מצורפים הקבצים

בנוסף ב google drive יש תמונות וסרטונים :

https://drive.google.com/drive/folders/12vms8W5YqA-3uK9dnWR5Rz2Ld92eqmh_?usp=drive_link