


# **Real-Time Control of a Human Robotic Arm using Raspberry Pi & Camera**

**שליטה בזמן אמת על כף יד רובוטית אנושית  
באמצעות Raspberry Pi ומצלמה**



**Student Name: Avi Digma**  
**Semester summer, 2023**  
**Facilitator: Dr. Yakov Damatov**

# רציונל

פרויקטים רבים בתחום הרובוטיקה משלבים שימוש בארדואינו, לו יש יתרונות רבים, אך גם חסרונות כמו כוח עיבוד חלש יחסית והכבדה על מערכת כתוספת חומרית. על מנת להימנע מחסרונות אלו, ניגש לחומרה המשלבת כוח עיבוד טוב, קומפקטיות ויכולת חיבורית בדומה לארדואינו. ה-Raspberry Pi היא כלי העומדת בתנאים אלו – היא משלבת יכולת של מחשב יחד עם תכונות של בקר.

# מטרה

המטרה היא פיתוח פלטפורמת - מערכת שליטה בזמן אמת על כף יד רובוטית אנושית באמצעות Raspberry Pi ומצלמה שימוש ב-Raspberry Pi עם ציוד היקפי תואם כמו מסך, מצלמה, מקלדת וכו' יהפוך את המערכת לקומפקטית יותר וקלה יותר לשימוש, מבלי לפגוע בכוח העיבוד של המערכת.

# שלבי פיתוח המערכת

- שלב ראשון: עבודה מול המערכת כפיילוט – בשלב זה נבחן את יכולות המערכת כאשר נחבר אליה מצלמת USB, מקלדת ועכבר חוטיים של מחשב נייד, וחיבור למסך מחשב באמצעות כבל HDMI - Micro HDMI.
- שלב שני: נבצע מינימיזציה למערכת – נחבר ציוד היקפי המותאם ל-Raspberry Pi: מקלדת + לוח מגע אלחוטיים ומצלמת Raspberry Pi V2.
- שלב שלישי: נבצע בדיקות סופיות של כלל המערכת לאחר כל החיבורים כולל מסך מגע ייעודי עבור Raspberry Pi.

# מטלות הנדרשות לפיתוח הפלטפורמה

➤ הכנת Raspberry Pi 4 לעבודה:

➤ התקנת מערכת ההפעלה, תוכנות וספריות נדרשות.

➤ הבנת מבנה החומרה בדגש על ה-GPIO Bus.

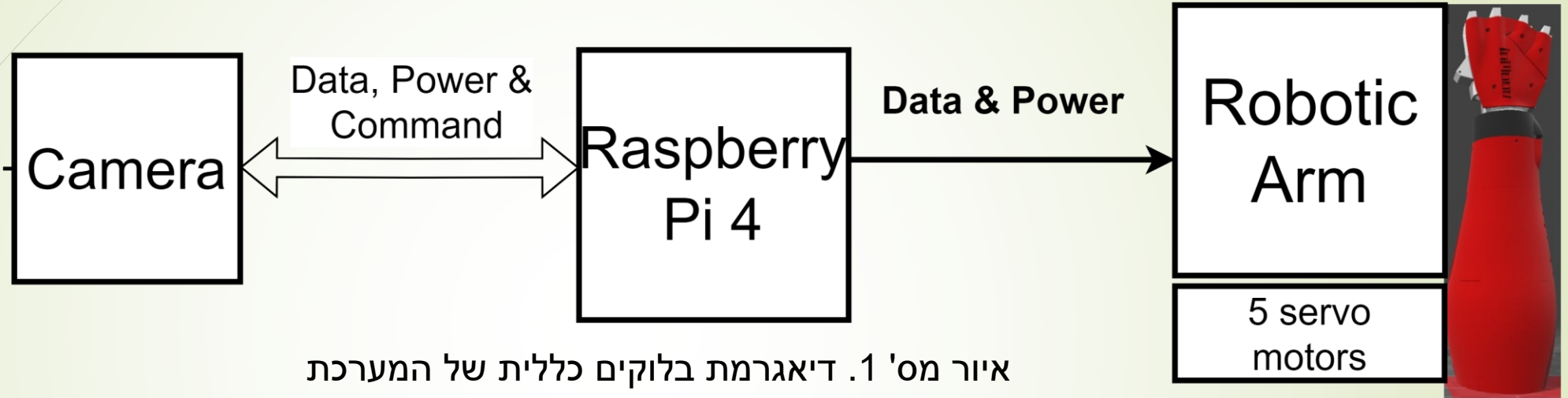
➤ למידת מערכת ההפעלה Raspbian.

➤ יצירת קישור בין כף היד הרובוטית ל-Raspberry Pi:

➤ יצירת כבל Data חדש שיקשר בין היד הרובוטית ל-Raspberry Pi

➤ פיתוח אלגוריתם ותוכנה.

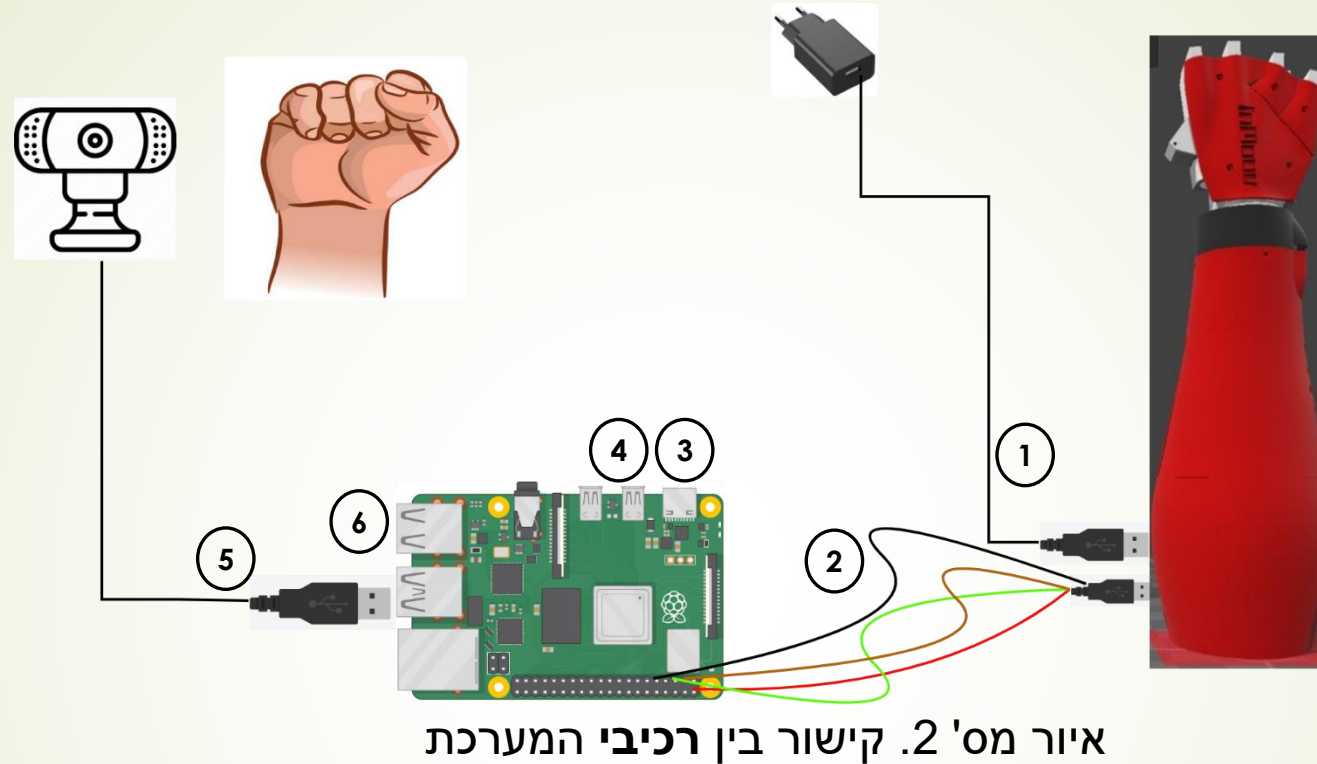
# מבנה הפלטפורמה (המערכת)



איור מס' 1. דיאגרמת בלוקים כללית של המערכת

איור מס' 1 מציג את האינטראקציה בין חלקי המערכת השונים, מתנועת האצבעות האנושיות ועד לתנועת האצבעות של היד הרובוטית הווירטואלית. המערכת כוללת מיקרו מחשב, Raspberry Pi, המקבל מידע ויזואלי מהמצלמה, מעבד מידע זה ולאחר מכן משדר את אותות הבקרה המתאימים למנועים הנמצאים בתוך הזרוע הרובוטית הווירטואלית. מנועים אלו מספקים את תנועת האצבעות של היד הרובוטית.

# חיבור בין רכיבי המערכת (שלב ביניים של פיתוח המערכת)



איור מס' 2 מציג את אחד משלבי הביניים של פיתוח המערכת, כלומר, השימוש במיקרו-מחשב Raspberry Pi במערכת במקום במחשב.

1. ספק כוח עבוד כף היד הרובוטית
2. כבל data&power המעביר אותות למנועי כף היד
3. ספק כוח עבור Raspberry Pi
4. יציאה לחיבור למסך HDMI-Micro HDMI
5. חיבור של מצלמת Logitech באמצעות USB
6. חיבורי USB למקלדת ועכבר חוטיים של מחשב נייד



# מבנה מערכת כפיילוט – Raspberry Pi (שלב ביניים של פיתוח המערכת)



איור מס' 3. חיבורי המערכת. גרסה 1.

כפי שניתן לראות באיור 3 - בגרסה זו של המערכת, ל-Raspberry Pi חיברנו: מקלדת ועכבר חוטיים של מחשב ניח, מצלמת Logitech בחיבור USB ובנוסף חיברנו למסך חיצוני של מחשב רגיל ע"י כבל HDMI-Micro HDMI.

חיבורים מסוג זה מותאמים בד"כ למחשב ניח, אך לדרישות שלנו באותו שלב זה היה מספיק על מנת לפתח את המערכת הרצויה. \* מאז המערכת עברה שדרוג בכל הנוגע לחיבורים ולקומפקטיות שלה כפי שניתן יהיה לראות בהמשך.

# משאבי מערכת שליטה בזמן אמת על כף יד רובוטית אנושית באמצעות Raspberry Pi ומצלמה (שלב ביניים)

## משאבי ה-Raspberry Pi4 - הסבר כללי :

ה-Raspberry pi4 הוא מיני מחשב שכולו נמצא על לוח אחד, ובעל יכולת לשמש בנוסף כבקר. הוא מכיל את החיבורים הבאים:

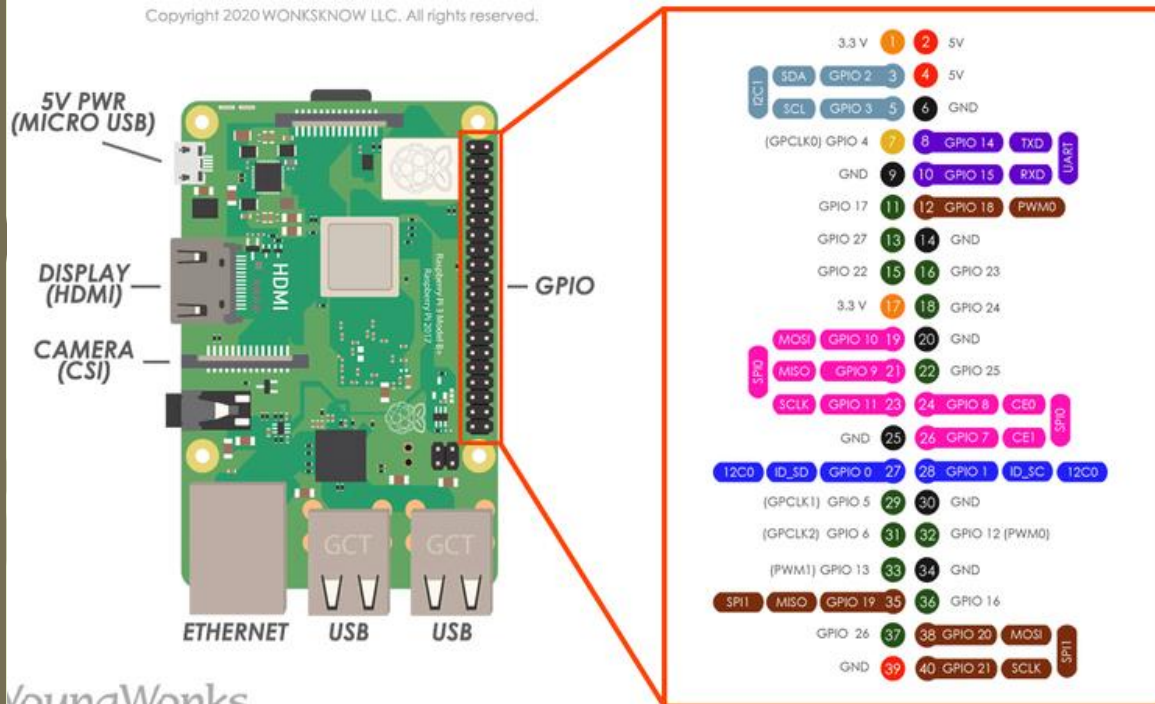
1. מעבד @ 1.8GHz 64-bit SoC Cortex-A72 (ARM v8), Broadcom BCM2711
2. זיכרון פנימי: 8 GB
3. USB-c 5V (חיבור לחשמל)
4. 2 יציאות micro-HDMI
5. 2 כניסות USB 2.0
6. 2 כניסות USB 3.0
7. כניסת Ethernet
8. יציאת Audio
9. כניסת microSD
10. 2-lane MIPI CSI (עבור מצלמת Raspberry)
11. 2-lane MIPI DSI (עבור חיבור למסך ייעודי)
12. PoE HAT (4 חיבורי פינים שמאפשרים את הפעלת המחשב באמצעות רשת Ethernet המופעלת במתח)
13. 40 Pin GPIO Header (קו של 40 חיבורי קלט/פלט המרחיבים את יכולות המחשב ומאפשרים שימוש בו כבקר)

## רשימת רכיבי מערכת ומאפייני ה-Raspberry Pi:

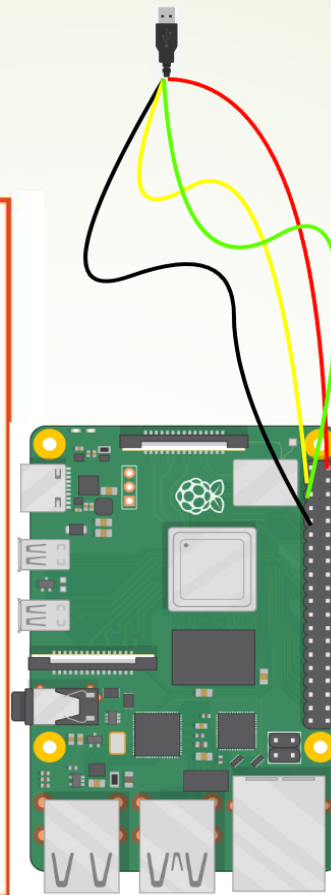
- זיכרון עבודה: 512 GB SD Card
- מערכת הפעלה: Raspbian (מערכת הפעלה ייחודית עבור Raspberry Pi מבוססת Debian)
- מעטפת: כיסוי פלסטיק קשיח כולל מאוורר המתחבר ל-GPIO
- מצלמה: Logitech מצלמת אינטרנט HD 1080 Pro Stream C922
- יד רובוטית: מכילה 5 מנועי Servo



# חיווט Raspberry Pi4



איור 5. סקירה של מבנה ה-GPIO



איור 4. חיווט כבל data&power ל-Raspberry Pi

באיורים 4 ו-5 ניתן לראות איך מתבצע חיווט כבל data&power אל Raspberry Pi4. על מנת לבצע זאת היינו צריכים להבין את מבנה ה-GPIO Bus כפי שמתואר בתמונה. גילינו שניתן לחוות את המערכת בכמה אופנים: ישנם 2 כניסות 5V, 8 כניסות GND, ו-2 אופציות של חיבורי I2C (SDA ו-SCL).

# תרשים זרימה של האלגוריתם

באיור 6 ניתן לראות כיצד האלגוריתם מתקדם מפעולה אחת לבאה. האלגוריתם כתוב כולו בשפת Python ובנוי מ-2 חלקים עיקריים: ממשק המצלמה ועיבוד התמונה והפעלת מנועי הרובוט.

## שלבי האלגוריתם:

1. הפעלת המצלמה, יצירת קשר עם לוח ה-GPIO.

2. כניסה ללולאה אינסופית:

2.1 "לכידת" תמונה.

2.2 האם זוהתה יד בתמונה? – אם כן:

2.2.1 האם זוהו אצבעות כף היד בתמונה? – אם כן:

2.2.2 עיבוד התמונה – יצירת מערך בינארי בגודל 5,

המדמה את מצב אצבעות כף היד (0 למטה, 1

למעלה).

2.2.3 פנייה לכל מנוע והפעלתו ע"פ המתקבל במערך כך

שעבור הקלט 0 האצבע שעליה שולט המנוע תורד,

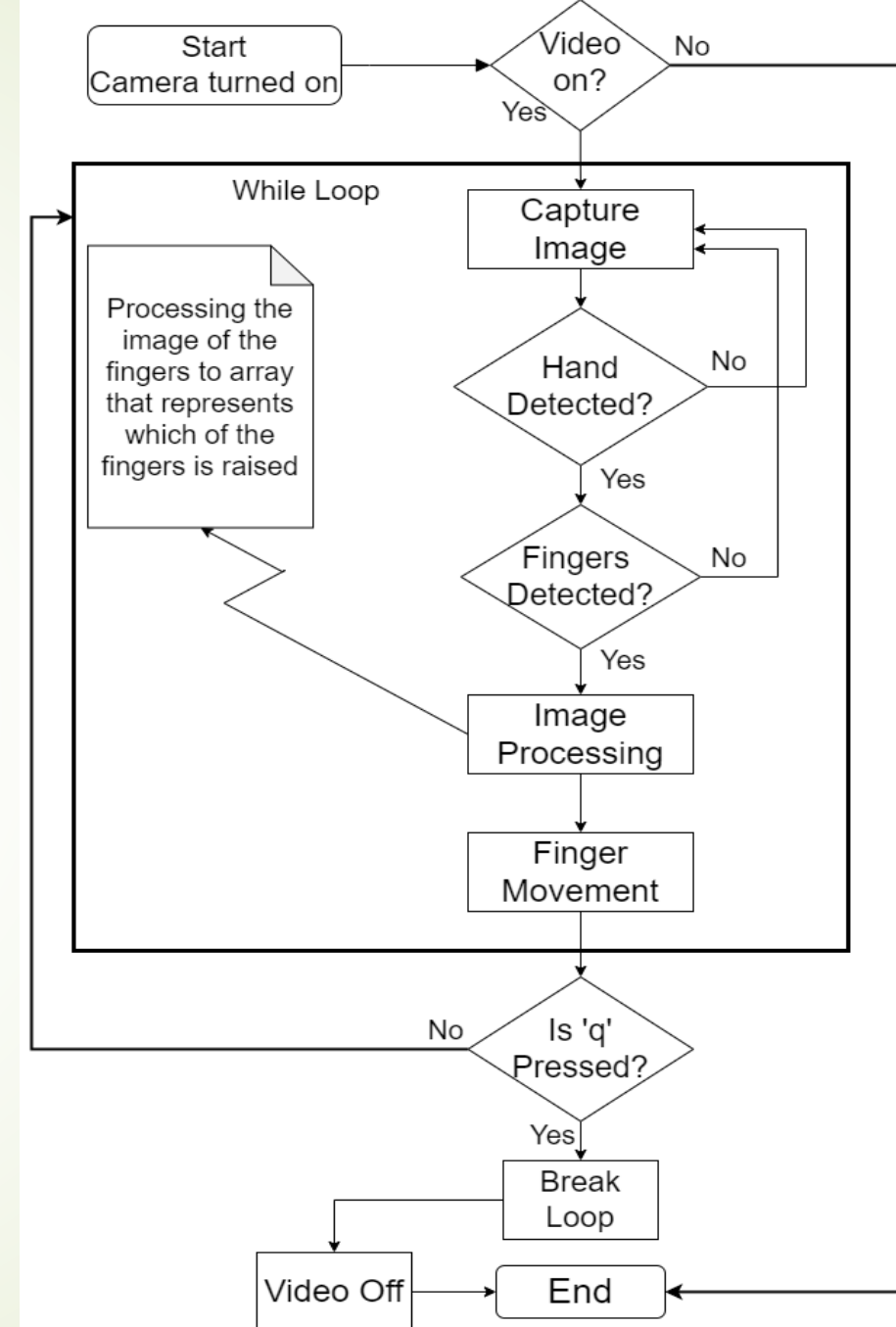
ועבור 1 האצבע תזדקף – כל זה ע"י פקודת מתן קלט

של זווית למנוע (0-180).

2.3 האם נלחץ המקש "q"? – אם כן:

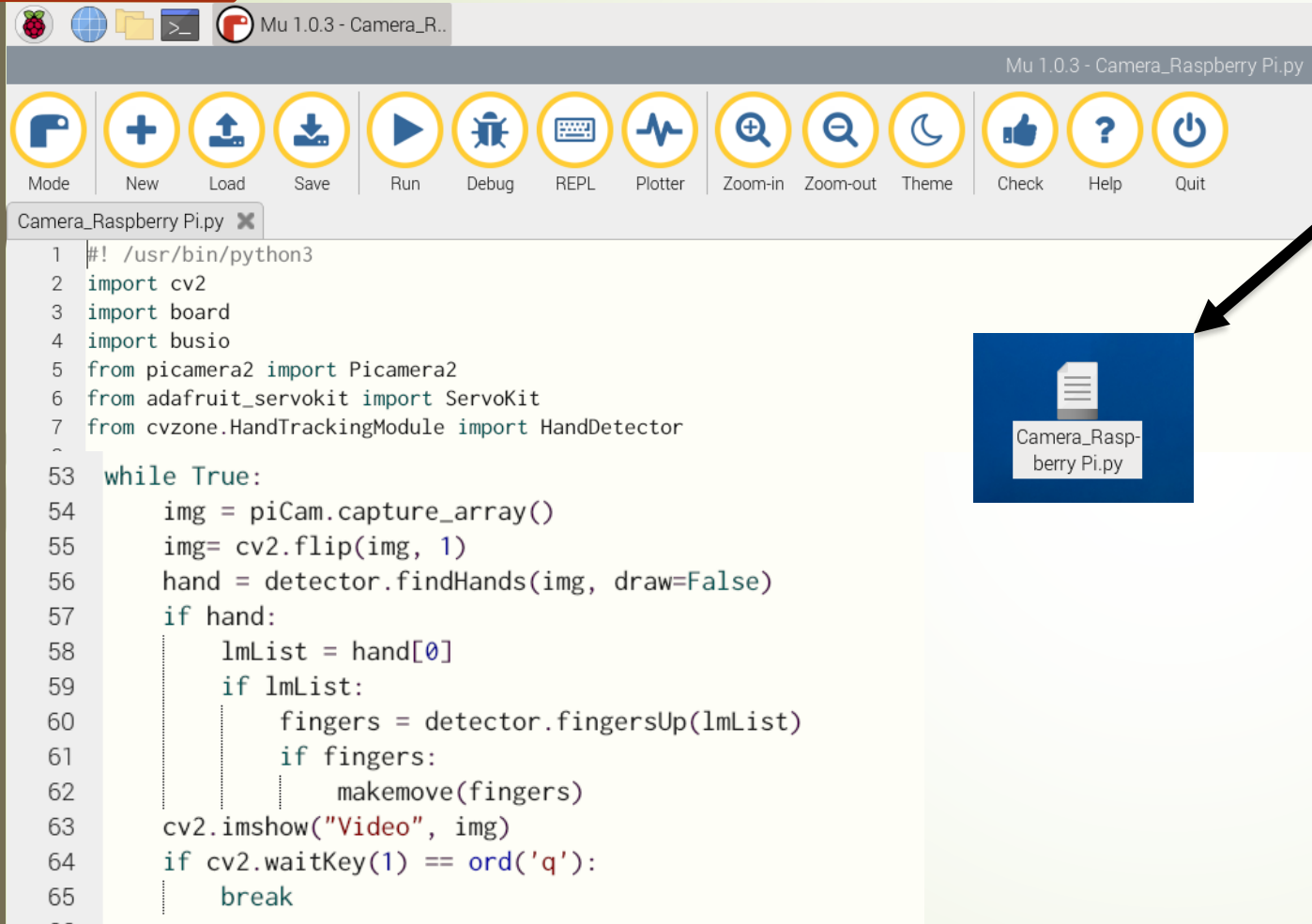
2.3.1 יציאה מהלולאה.

3. ניתוק ושחרור המצלמה.

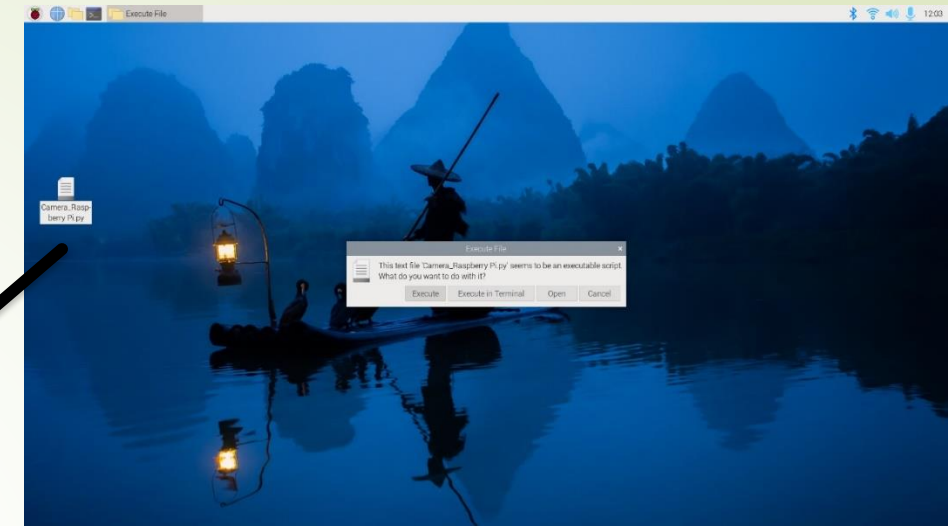
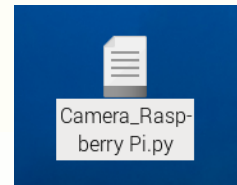


איור 6. תרשים הזרימה של האלגוריתם

# תוכנה – הפעלה וריצה



```
1  #!/usr/bin/python3
2  import cv2
3  import board
4  import busio
5  from picamera2 import Picamera2
6  from adafruit_servokit import ServoKit
7  from cvzone.HandTrackingModule import HandDetector
8
9
10 while True:
11     img = piCam.capture_array()
12     img= cv2.flip(img, 1)
13     hand = detector.findHands(img, draw=False)
14     if hand:
15         lmList = hand[0]
16         if lmList:
17             fingers = detector.fingersUp(lmList)
18             if fingers:
19                 makemove(fingers)
20     cv2.imshow("Video", img)
21     if cv2.waitKey(1) == ord('q'):
22         break
```



איור 7. הפעלת התוכנה – הרצה של מסמך הקוד כקובץ executable script.



איור 9. אינטראקציה עם התוכנה – האינטראקציה של המשתמש והתוכנה עוברת דרך צילום היד של המשתמש

איור 8. קטעי קוד המציגים את הספריות שבהן התוכנה עושה שימוש במהלך הריצה, וכן את הלולאה הראשית של התוכנה

# שלב הפיתוח השני – מינימיזציה של המערכת

בשקפים הקרובים נציג ונאפיין את התהליך שביצענו בשלב הפיתוח השני: שלב זה כולל בעיקר שדרוג לרכיבים המחוברים ל-Raspberry Pi – על מנת להשיג התאמה מיטבית ל-Raspberry Pi, נוחות וקומפקטיות. לשם כך נחליף את הרכיבים הבאים: מקלדת, עכבר, מסך ומצלמה. נשתמש במקלדת ועכבר אלחוטיים, מסך מגע ייעודי ומצלמת Raspberry Pi V2. המתחברת ישירות ללוח. המטרה כאן היא ליצור סביבה אופטימלית עבור הפלטפורמה ובעיקר עבור המשתמש.



# מערכת שליטה בזמן אמת על כף יד רובוטית אנושית באמצעות ומצלמה Raspberry Pi



איור 10. חיבור מצלמת Raspberry Pi V2



איור 11. חיבור המסך



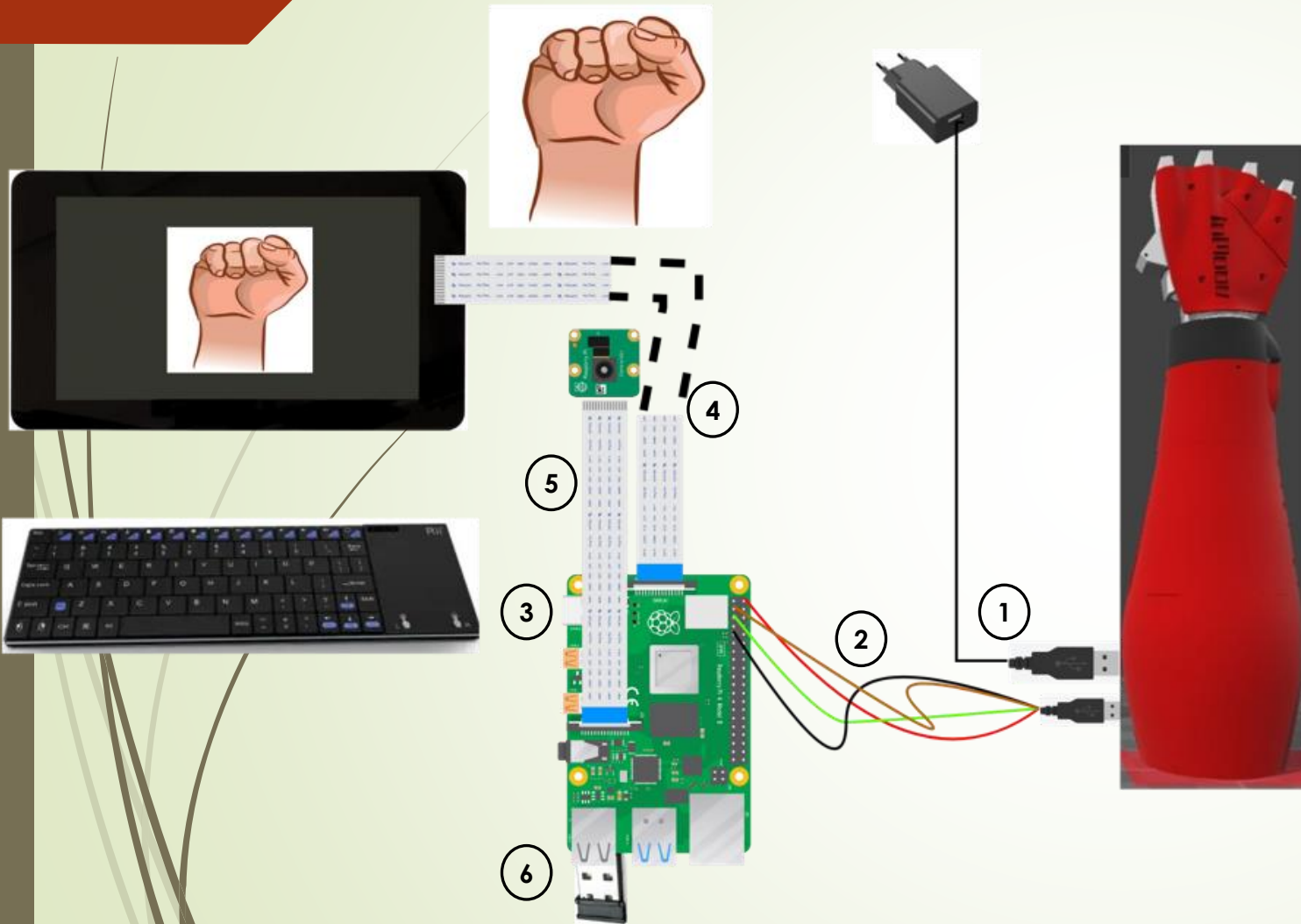
איור 12. המערכת החדשה בשלמותה

כפי שניתן לראות באיורים 10-12, מתבצע שלב 2 בפיתוח המערכת, הכולל חיבור וחיבורים ל-Raspberry Pi:

1. מיני מקלדת + TouchPad אלחוטיים המתחברים עם Nano Wireless USB Adapter.
2. מצלמת Raspberry Pi V2 המתחברת דרך הלוח עצמו בכניסת "MIPI CSI 2-lane" ייעודית עבור מצלמה זו.
3. מסך מגע ייעודי עבור Raspberry Pi בכניסת "2-lane MIPI DSI" ייעודית עבור מסך זה.



# חיבור בין רכיבי המערכת (שלב שני)



איור מס' 13 מציג את השלב הסופי של פיתוח המערכת, כלומר, השימוש במיקרו-מחשב Raspberry Pi במערכת במקום במחשב, שאליו חובר ציוד היקפי תואם.

1. ספק כוח עבוד כף היד הרובוטית
2. כבל data&power המעביר אותות למנועי כף היד
3. ספק כוח עבור Raspberry Pi
4. קישור למסך מגע מותאם ל-Raspberry Pi בחיבור "2-lane MIPI DSI"
5. קישור של מצלמת Raspberry Pi v2 בחיבור "2-lane MIPI CSI"
6. מתאם Nano Wireless USB Adapter למקלדת ומשטח מגע אלחוטיים

איור מס' 13. קישור בין רכיבי המערכת

# שלב הבדיקות (שלב סופי)

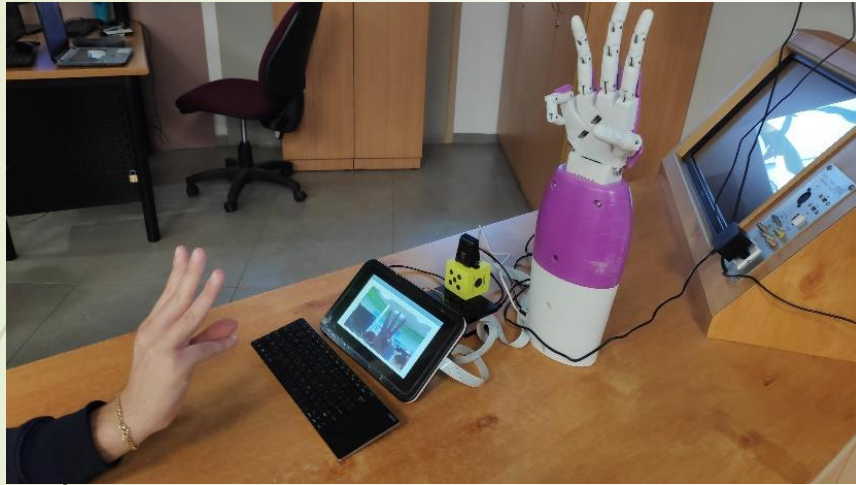
## בדיקות והתאמות בקוד:

לאחר חיבורי החומרה בשלב השני ביצענו בדיקות למערכת שלאחריהן גילנו שנדרשת התאמה של ממשק התוכנה משלב הפיתוח הראשון. נדרשו שינויים בקוד כדי לאפשר שימוש והתממשקות בין ספריות opencv לבין מצלמת Raspberry Pi.

נדרשנו להוסיף לקוד את ספריית Picamera2, ולהפעיל באמצעותה את המצלמה החדשה. ספרייה זו מגיעה עם חבילת הבסיס של מערכת ההפעלה של Raspberry Pi וקיים בינה ובין opencv ממשק עבודה מסונכרן ברגע שמבצעים התאמות מסוימות. כלומר השינוי העיקרי באלגוריתם הוא החלק שבו פנינו למצלמה והפעלנו אותה (התחלת צילום, "לכידת" תמונה). מעבר לכך, לאחר יצירת החיבור עם המצלמה, נדרשות התאמות של תצורת המצלמה כמו התאמת צבעים ורזולוציה כך שיהיה ניתן לבצע פעולות כמו זיהוי יד ואצבעות.

\* ללא התאמות תצורה אלו, לא ניתן להשתמש באלגוריתם כפי שהוא.

# תמונות – התפתחות המערכת



איור 15. תגובת היד למשתמש – 3 אצבעות, גרסה סופית



איור 14. תגובת היד למשתמש – יד פתוחה לגמרי, שלב פיתוח ראשון

באיורים 14-15 ניתן לראות את התפתחות המערכת מהשלב הראשון המשמש כפלטפורמה יציבה המריצה את התוכנה וניתן להשתמש בה כסט מוכן עבור ההרצה – בשלב זה המערכת כללה ציוד כמו מקלדת ועכבר חוטיים, מצלמה חיצונית וחיבור למסך מחשב.

לאחר מכן התבצע מעבר לציוד היקפי של Raspberry Pi – מקלדת + משטח מגע אלחוטיים, מצלמת Raspberry, ומסך מגע המותאמים כולם לעבודה עם Raspberry Pi. ניתן לראות שבשתי המערכות השונות היד מגיבה כנדרש למשתמש.

# סיכום ומסקנות

## סיכום:

העבודה על פרויקט זה עסקה באופן עמוק בהבנה של הקשר שבין חומרה לתוכנה. הצלחנו לפתח פלטפורמה קומפקטית, ונוחה לשימוש המבצעת אינטגרציה בין Raspberry Pi, מצלמה וכף יד רובוטית לשליטה על כך היד הרובוטית. נדרש לימוד של סביבת עבודה חדשה, ביצוע התקנות של ספריות, חיבורים מסוגים שונים, חיווט חדש של רובוט כף היד ופיתוח של אלגוריתם בשפת python. היתרון בעבודה בשלבים שהגדרנו מראש הוא שכעת קיימת גישה ל-2 סוגי פלטפורמות שונות שרצות באותו אופן וניתן להשתמש בשתיהן: אחת עם ציוד חוטי הכוללת עכבר, מקלדת ומסך מחשב יחד עם מצלמת רשת. והשנייה עם ציוד היקפי המותאם ל-Raspberry Pi וכוללת: מקלדת + משטח מגע אלחוטיים, מצלמת Raspberry Pi v2, ומסך מגע.

## מסקנות:

- Raspberry Pi היא פלטפורמה המספקת תנאים אופטימליים לעבודה על פרויקט של חומרה-תוכנה, היכולות שלו מגוונות מאוד והוא מספק יעילות טובה ביחס לפרויקטים מסוג זה.
- ישנה התאמה בין יכולות החומרה שעבדנו איתה לדרישות ריצת התוכנה.
- סביבת עבודה יחידה המריצה את כל המערכת מהווה יתרון פיתוחי ותורמת לשדרוג מבנה המערכת.

הפלטפורמה שנוצרה מהווה בסיס טוב לפרויקטים עתידיים העוסקים בראייה ממוחשבת או בעיבוד תמונה.



# ביבליוגרפיה ופקודות עזר

1. התקנת Raspbian: <https://www.raspberrypi.com/software/>
2. עזרה עם תקלות ובאגים בדרך: StackOverflow, Raspberry Pi Forum, GitHub Forum, ChatGPT
3. הכנת הדיאגרמות: DrawIO
4. התקנת מצלמת Raspberry V2: [https://www.youtube.com/watch?v=kuJpdAf07WQ&ab\\_channel=PaulMcWhorter](https://www.youtube.com/watch?v=kuJpdAf07WQ&ab_channel=PaulMcWhorter)
5. התקנת מסך מגע: [https://www.youtube.com/watch?v=SIUfAliSzJA&ab\\_channel=MakeUseOf](https://www.youtube.com/watch?v=SIUfAliSzJA&ab_channel=MakeUseOf)
6. פקודה שבעזרתה הצלחנו להתקין ספריות: `pip3 install ____ --break-system-packages`
7. פקודת מעקב לחיבורי I2C: `i2cdetect -y 1`