|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| רחפן אוטונומי לחלוטין לזיהוי ומעבר מעל מדרגות | | |
| פרויקט מס' 2735  דו"ח סיכום | | |
| מבצעים: | | |
|  | אלינה לוז'קין | 323884692 |
|  | שלי בנבנישתי | 207253253 |
| מנחה: | | |
|  | פרופ' דן פלדמן | אוניברסיטת ת"א |
| מקום ביצוע הפרויקט: אוניברסיטת תל אביב  המעבדה לרחפנים | | |

תוכן עניינים

[ספר הפרויקט 1](#_Toc117154806)

[תקציר 5](#_Toc117154807)

[1 הקדמה 6](#_Toc117154808)

[2 רקע תיאורטי 6](#_Toc117154809)

[3 סימולציה 6](#_Toc117154810)

[4 מימוש](#_Toc117154811)

[4.1 תיאור חמרה 6](#_Toc117154812)

[4.2 תיאור תוכנה 7](#_Toc117154813)

[5 ניתוח תוצאות 7](#_Toc117154814)

[5.1 השוואות בין תוצאות הסימולציה לעבודה בזמן אמת 7](#_Toc117154815)

[5.2 ביצועי המערכת מבחינת זמן אמת 7](#_Toc117154816)

[6 סיכום, מסקנות והצעות להמשך 7](#_Toc117154817)

[7 תיעוד הפרויקט 8](#_Toc117154818)

**רשימת איורים**

[איור 1 – דיאגראמת בלוקים 5](#_Toc34812748)

[איור 2 – מבנה המערכת 6](#_Toc34812749)

[איור 3 – מעגל הכניסה למגבר 7](#_Toc34812750)

**רשימת טבלאות**

**תקציר**

הפרויקט עוסק בהנדסת מערכת אוטונומית שתאפשר לרחפן לבצע משימה ספציפית של טיפוס 3 מדרגות, ללא התערבות ידנית של המשתמש מלבד הדלקת הרחפן והרצת המשימה.

המערכת תשתמש בשני חיישני מרחק חיצוניים (אחד בחזית הרחפן ואחת בתחתיתו) שתפקידם לזהות מדרגות בזמן אמת, ו-Arduino שישמש כיחידת עיבוד שתעבד את המידע מהחיישנים ותחליט מתי וכיצד לשלוח פקודות לטיפוס. המערכת כולה תעבוד באופן אוטונומי ובלולאת משוב מתמדת, כך שהרחפן יוכל להיערך בצורה נכונה לכל שלב במשימה.

השליטה ברחפן מתבצעת באמצעות קוד Python, והחיישן מחובר ל-Arduino שמאסף את נתוני המרחק באמצעות קוד C++ ומעבירם לרחפן לביצוע פקודות מתאימות. המערכת תקפיד על דיוק בגובה המדרגות ויציבות בטיפוס, כדי למנוע נזקים לרחפן ולשמור על ביצועים גבוהים.

הפרויקט ימומש באמצעות חיבור רחפן לשני חיישני מרחק המחוברים ל- Arduino, אשר מודדים את המרחק למדרגות ולרצפה ומעביר את המידע למחשב דרך חיבור Serial.

הקוד ייכתב בשפת Python ויאפשר שליטה ברחפן באמצעות אפליקצייה MSDKRemote שפותחה על ידי דניאל פנקוב, תוך קריאה לנתוני החיישנים לעיבוד המרחקים בשפת C++. על פי הנתונים, יישלחו פקודות ניווט לרחפן, כגון עלייה או עצירה, כדי לבצע את משימת הטיפוס באופן אוטונומי. כל התהליך יתבצע בסביבה מבוקרת וייבדק בתנאים שונים לשיפור הדיוק והיציבות של המערכת.

בעת הפעלת המערכת ניכנס בדיאגרמת הבלוקים ללולאת משוב בצורה הבאה:

תמונה שמכילה טקסט, צילום מסך, גופן, תרשים

תוכן שנוצר על-ידי בינה מלאכותית עשוי להיות שגוי.

איור 1 – דיאגראמת בלוקים

**הקדמה**

בפרק זה יתוארו:

* מטרות הפרויקט
* המוטיבציה
* הגישה לפתרון הבעיה
* השוואה כנגד עבודות ואלגוריתמים/מימושים קיימים בנושא

מטרות הפרויקט

מטרת הפרויקט היא לפתח מערכת אוטונומית לחלוטין המאפשרת לרחפן לזהות 3 מדרגות ולנווט מעליהן באופן עצמאי, ללא התערבות אנושית. המערכת מבוססת על רחפן מדגם DJI Mini Pro 3 שעליו הותקנה מערכת חיישנים שפותחה באופן ידני. המערכת כוללת שני חיישני אולטרסוניק, לוח פיתוח מסוג Arduino Nano 33 IoT, סוללת ליתיום ונורת ביקורת, כאשר הסוללה מחוברת דרך מטען/מגבר מסוג SparkFun 5V/1A.

הפרויקט מתמקד בשילוב בין חומרה פשוטה, זולה וקלת משקל, לבין לוגיקת מערכת חכמה וקלה לתפעול, על מנת לאפשר לרחפן לפעול בצורה עצמאית בסביבה פנימית עם מכשולים לא סטנדרטיים. באמצעות קריאת מדידות מרחק מהחיישנים, עיבוד הנתונים בזמן אמת ושליחת פקודות טיסה מותאמות- הרחפן מסוגל לזהות מדרגות, "לטפס" עליהן ולהמשיך במסלולו.

המטרה היא להראות שניתן להשיג התנהגות אוטונומית חכמה גם באמצעות מערכות פשוטות וזולות יחסית, ולהניח בסיס לפתרונות עתידיים בתחום החיפוש וההצלה, והרובוטיקה ככלל.

המערכת המפותחת בפרויקט מציעה גישה שמאפשרת להתמודד בצורה טובה עם מכשולים רציפים בגבהים משתנים תוך שמירה על ביצועים גבוהים, ויתרון משמעותי בעלות וקלות היישום. בהשוואה לחלופות הקיימות, הפתרון שלנו מציע פתרון זול ויעיל, המאפשר הפעלת רחפנים בצורה אוטונומית ומדויקת במצבים לא קונבנציונליים.

מוטיבציה

הפרויקט מבוסס על יצירת מערכת אוטונומית שתוכל לזהות ולתפקד מול מכשולים, כמו מדרגות, בצורה חכמה ויעילה. מדובר בפתרון טכנולוגי שיכול להוביל לשיפורים משמעותיים בתחום הרחפנים והאוטומציה, במיוחד במצבים בהם נדרש ניוד או טיפוס במרחבים מוגבלים או קשים להגעה, לדוגמה, במבנים עירוניים, תעשייתיים או צבאים.

**הסיבות ההנדסיות והחשיבות:**

החשיבות של פרויקט זה טמונה ביכולתו לשפר את ביצועי הרחפנים במצבים מורכבים שבהם לא ניתן להסתמך רק על שליטה מרחוק. מערכת אוטונומית שתוכל לזהות מדרגות ולבצע טיפוס מדויק מעליהם, תאפשר לרחפן לתפקד בצורה עצמאית במצבים מסובכים ולא צפויים.

**חלופות למימוש הפרויקט:**

1. **מערכת מבוססת חיישנים אופטיים (LIDAR) או מצלמות תלת-ממדיות:**

בשיטה זו, הרחפן היה מצויד בחיישנים אופטיים כמו LIDAR או מצלמות תלת-ממדיות, המספקים תמונה מדויקת של המרחב ומאפשרים זיהוי של מכשולים במרחב שלם. היתרון הוא יכולת זיהוי מדויקת במצבים מורכבים, אך החיסרון הוא המחיר הגבוה, הצורך בעיבוד נתונים מורכב ודרישה למערכות חישוב יקרות וגדולות יותר.

1. **מערכת מבוססת חיישני אינפרא אדום: (IR)**

חיישני אינפרא אדום יכולים לספק פתרון זול יותר בהשוואה ל-LIDAR אך עם מגבלות בהבחנה בין מכשולים שונים ובזיהוי מדויק של הגבהים. מערכת כזו יכולה להיות יעילה במצבים פשוטים, אך עשויה להיתקל בקשיים בזיהוי מכשולים כמו מדרגות בצורה מדויקת. היתרון המרכזי בשיטה זו הוא המחיר הנמוך וצריכת האנרגיה הנמוכה.

הגישה לפתרון הבעיה

הפתרון שגיבשנו מתבסס על עקרונות של בקרה מבוססת חיישנים, בשילוב בין רכיבי חומרה פשוטים לבין עיבוד נתונים של התוכנה בזמן אמת.

החלק החומרתי של המערכת כולל חיישן אולטרסוניק קדמי לחישת מכשולים בגובה הרחפן, וחיישן תחתון לניטור שינויי גובה. שני החיישנים מחוברים ללוח Arduino Nano 33 IoT, שמעבד את המידע ומעביר אותו בפורמט סדרתי אל קוד Python הפועל על מחשב חיצוני.

בצד התוכנה, המידע שנקלט מהחיישנים עובר ניתוח כדי לקבוע את המצב היחסי של הרחפן ביחס לסביבה- לדוגמה: האם יש מדרגה לפניו, האם יש שינוי גובה, או האם עליו להמשיך ישר. בהתאם לכך נשלחות פקודות תעופה ישירות לרחפן באמצעות ממשק OpenDJI SDK, באופן שמדמה קבלת החלטות בזמן אמת.

המטרה בגישה זו הייתה להוכיח שניתן להגיע להתנהגות אוטונומית על בסיס לוגיקה פשוטה וחיישנים זמינים. בנוסף, עקרון הפעולה מתבסס על לולאת בקרה סגורה.

כלומר, הרחפן מקבל החלטות על סמך מידע עדכני שמגיע מהסביבה באופן רציף, ולא על סמך תכנון מראש של המסלול שיעבור הרחפן. גישה זו הופכת את המערכת לגמישה יותר ומותאמת למצבים משתנים, במיוחד בסביבות פנימיות עם מכשולים לא צפויים.

השוואה כנגד עבודות ואלגוריתמים/מימושים קיימים בנושא

תחום הניווט האוטונומי ברחפנים זכה להתקדמות משמעותית בשנים האחרונות, בעיקר באמצעות שימוש בצילום, חיישנים מתקדמים, AI ועוד. מימושים קיימים בנושא עוסקים בבניית מפות תלת-ממדיות בזמן אמת ושימוש בלמידת מכונה לזיהוי מכשולים ותכנון מסלולים.

עם זאת, פתרונות אלו לרוב דורשים משאבים חישוביים גבוהים, חיישנים יקרים וכבדים, וסביבה ידועה מראש או בעלת תנאים חזותיים טובים לשם זיהוי חזותי (לדוגמה עם מצלמה).

בשונה מהעבודות הללו, הפרויקט שלנו בחר במימוש פשוט וזול יותר באופן מכוון, המתבסס על חיישני אולטרסוניק בלבד. בניגוד לעבודות הקיימות, המערכת שלנו אינה תלויה בזיהוי חזותי של סביבה, ולכן יכולה לפעול גם במצבים של תאורה נמוכה או סביבה הומוגנית מבחינה ויזואלית. היתרון המרכזי בגישה שלנו, לעומת העבודות הקיימות, הוא בפשטות, באמינות, ובעלות נמוכה- מה שמאפשר יישום יעיל גם על פלטפורמות קטנות ומוגבלות משאבים.

לסיכום, המערכת שלנו אינה מחליפה פתרונות מתקדמים מבוססי AI או מיפוי מתקדם, אך מציעה גישה ייחודית המתאימה למשימות מוגדרות היטב, שבהן נדרש מענה מהיר, זול ויציב- כמו בניווט במבנים קיימים בהם יש מדרגות או שינויי גובה ברורים.

1. **רקע תיאורטי**

בפרק זה יתואר הרקע התיאורטי ויפורטו האלגוריתמים הרלבנטיים. וכן בהתייחס לאלגוריתמים אלטרנטיביים למימוש הפרויקט.

במסגרת הפרויקט, למדנו את הבסיס התאורטי של מערכות אוטונומיות ורחפנים. העמקנו בנושאים כמו חיישני מרחק (כגון LIDAR, אולטרסוניק, ו-Time-of-Flight), עיבוד נתונים בזמן אמת, ושימוש במיקרו-בקרים מסוג Arduino. כמו כן, למדנו על שליטה ברחפנים באמצעות ספריות Python, כמו אפליקציית MSDKRemote, ועל פיתוח אלגוריתמים לשליטה מבוססת משוב.

המקורות העיקריים שסקרנו: מאמר " "Home Guard Droneמאת Dan Magazinnik ומאמרים ומקורות מידע על מגוון הרכיבים אשר יהיו בשימוש במסגרת הפרויקט.

בחלק זה יפורטו מספר נקודות עיקריות:

* סקירת סוגי הרחפנים המתאימים לביצוע הפרויקט.
* סקירת סוגי חיישני המרחק המתאימים למשימה.
* בחירת לוחות Arduino המתאימים לצורכי הפרויקט.
* תיאור חיבוריות בין הרחפן ל Arduino-ולחיישנים באמצעות Python

1. **DJI Tello**

רחפן קטן וזול שתוכנן ללמידה והתנסות, והיה הבחירה הראשונית לפרויקט. יתרונו המרכזי הוא בכך שהוא תומך ב-SDK פתוח , המאפשר שליחת פקודות תכנותיות בצורה פשוטה. עם זאת, הרחפן יצא מייצור ונעשה קשה להשיגו, ולכן הוחלט לא להשתמש בו למרות ההתאמה הראשונית.

1. **DJI Neo**

רחפן בסיסי ונגיש לשימוש, אך אינו תומך בתקשורת פתוחה עם ,SDK ולכן אינו מאפשר שליחת פקודות חיצוניות בזמן אמת. בנוסף, הרחפן קטן ואינו מסוגל לשאת משקל חיצוני משמעותי- מה שהופך אותו לבלתי מתאים להרכבת מערכת הכוללת חיישנים, בקרה וסוללה.

1. **DJI Mini Pro 3**

רחפן מקצועי יותר, שתומך בתקשורת דרך OpenDJI SDK ומאפשר שליטה מתקדמת דרך קוד .Python מאחר שהוא גם מ**סוגל לשאת עד כ־60 גרם** (בהתאם ליצרן) – מספיק עבור המערכת שפיתחנו, הכוללת שני חיישנים, לוח בקרה (Arduino Nano 33 IoT) וסוללה. שילוב זה מאפשר תעופה יציבה ובקרה אוטונומית מלאה.

**בקרים (מיקרו־בקרים)**

**1. Arduino Uno**

בקר אמין וחזק אשר נפוץ בפרויקטים אלקטרוניים חינוכיים. היתרונות המרכזיים שלו הם קלות השימוש ויציבות. עם זאת, הוא **כבד מדי** עבור רחפנים קטנים, ולכן **לא מתאים** למשקל המותר להמראה. מסיבה זו, כל משפחת ה־UNO נפסלה.

**2. Arduino Nano 33 IoT**

בקר קטן, קל משקל ומתקדם טכנולוגית. נבחר לפרויקט בשל העובדה שהוא **כולל גם Wi-Fi וגם Bluetooth**, מה שהופך אותו לאידיאלי להעברת נתונים לרמת עיבוד חיצונית. גודלו הקומפקטי ומשקלו הנמוך הפכו אותו לאופציה המעשית ביותר עבור שילוב על גבי רחפן.

**חיישני מרחק**

**1. HC-SR04 Ultrasonic Sensor**

חיישן נפוץ למדידת מרחק, בעל יתרונות של **עלות נמוכה, זמינות גבוהה, ודיוק מספק לטווח קצר**. נבחר כחיישן המרכזי בפרויקט הודות ליכולת לבצע מדידות אמינות של מדרגות במרחקים רלוונטיים. למרות שהוא יחסית גדול פיזית, הצלחנו להתאים את מיקומו על גוף הרחפן תוך שמירה על יציבות ומשקל סביר.

**2. VL53L0X Time-of-Flight Sensor**

חיישן קטן וזול יחסית, שתומך במדידת מרחק על ידי שליחת קרן לייזר. נמצא בשימוש בעבודות קודמות בתחום, ולכן נשקל בתחילת הדרך. עם זאת, **טווח המדידה הקצר שלו (~2 מ') ורגישות גבוהה לתנאי תאורה** הפכו אותו לפחות מתאים לזיהוי מדרגות בגובה משתנה – ולכן לא נבחר בסופו של דבר.

**סוללת ליתיום**

המערכת מקבלת את אספקת המתח שלה מסוללת ליתיום נטענת, מדגם **SparkFun 5V/1A LiPo Charger/Booster** סוללה זו נבחרה בזכות **משקלה הנמוך**, התאמה למתח הנדרש עבור ה־Arduino Nano 33 IoT, ואפשרות טעינה קלה תוך כדי הפעלה. שילוב זה אפשר פעולה יציבה לאורך זמן ללא תלות במקור מתח חיצוני, תוך שמירה על מגבלת המשקל הקריטית של הרחפן.

**חיישני מרחק**  
חיישני מרחק משמשים לפרויקטים שמטרתן היא לזהות מכשולים ולמדוד מרחקים. ישנם מגוון חיישנים פופולריים בשוק, שכל אחד מהם מציע תכונות שונות, כגון דיוק, טווח ויכולת עיבוד נתונים, ומחירם משתנה בהתאם לדרישות.

**ארדואינו**  
 **Arduino**היא פלטפורמת פיתוח אלקטרונית פופולרית, המיועדת לפיתוח מהיר של פרויקטים. הפלטפורמות המתאימות לפרויקטים שונים כוללות את**Arduino Uno**, **Arduino Nano**, **Arduino Mega** . כל גרסה מציעה יתרונות וחסרונות בהתאם לצורכי הפרויקט, כמו גודל, יכולת חיבור או כוח עיבוד.

**רחפני DJI**   
רחפני **Tello** מבית **DJI** מציעים פלטפורמה אידיאלית לפרויקטים לימודיים ואוטונומיים. הרחפן מצויד במצלמות באיכות גבוהה ומציע יכולות שליטה מתקדמות באמצעות שפת Python . יתרונותיהם כוללים קלות תפעול, תמיכה בתכנות, ומחיר נגיש. מצד שני, החיסרון העיקרי הוא תלות בתקשורת WiFi וסוללה עם אורך חיים מוגבל.

רחפן**DJI Mini Pro** הוא רחפן נוסף של DJI שמציע יכולות מתקדמות יותר, במיוחד בתחום הצילום והניווט. הוא מצויד במצלמת K4 ומערכת ניווט משולבת GPS ומספק יציבות גבוהה יותר בהשוואה ל- Tello. יתרונו הגדול הוא היכולת לפעול בתנאים שונים ומגוונים בזכות היציבות המתקדמת והביצועים הגבוהים. לעומת זאת, הוא רחפן גדול ויקר יותר, ודרישותיו לתקשורת ולסוללה עשויות להיות גבוהות יותר. השימוש בו מתאים לפרויקטים שמחייבים יציבות ואיכות תמונה גבוהה יותר.

שני הרחפנים Tello ו-Mini Pro מאפשרים שליטה אוטונומית, אך הבחירה ביניהם תלויה בדרישות הפרויקט – Tello אידיאלי לפרויקטים לימודיים ובסיסיים, בעוד ה-Mini Pro מתאים למשימות יותר מורכבות ועם דרישות ביצועים גבוהות.

**שילוב ארדואינו עם רחפן**   
החיבור בין  **Arduino** לרחפן מתבצע באמצעות אפליקציית MSDKRemote בשפת. Python ארדואינו משמש לקריאת נתוני חיישנים (כמו חיישני מרחק) ועיבוד המידע, בעוד שרחפן מקבל פקודות לפי הנתונים שנמדדו. שילוב זה מאפשר אוטונומיה בביצוע משימות כמו טיפוס מדרגות וזיהוי מכשולים.

**טכנולוגיות קיימות**

חיישני מרחק הם רכיבים מרכזיים במערכות אוטונומיות, המשמשים לזיהוי מכשולים ולמדידת מרחקים בצורה מדויקת. לדוגמה, חיישן VL53L0X מסוג Time-of-Flight מודד מרחק באמצעות חישוב הזמן שלוקח לאור אינפרא אדום להגיע לאובייקט ולחזור, ומציע שילוב של דיוק גבוה ועלות נמוכה.

פלטפורמת Arduino מהווה כלי אידיאלי לפיתוח מערכות כאלה, בזכות היכולת לשלב חיישנים שונים ולבצע עיבוד נתונים במהירות ובגמישות.

רחפנים מדגם DJI Tello מתאימים במיוחד לפרויקטים אוטונומיים, שכן הם כוללים מצלמות איכותיות ותומכים בתכנות בשפת Python ו באמצעות אפליקציית MSDKRemot שמאפשרות שליטה מתקדמת על הרחפן.

**אינטגרציה וחדשנות**

שילוב של פלטפורמת Arduino עם הרחפן מאפשר יצירת מערכת אוטונומית מתקדמת, המסוגלת לאסוף נתוני חיישנים ולעבדם בזמן אמת, תוך שליחת פקודות ישירות לרחפן. במסגרת הפרויקט, יפותח אלגוריתם ייחודי לטיפוס מדרגות אוטונומי, אשר ינצל את נתוני המרחק מחיישנים כדי לזהות את מיקום וגובה המדרגות בזמן אמת. האלגוריתם יחשב את המסלול הנדרש, יפקח על תנועת הרחפן, ויבטיח יציבות וגובה מדויק לאורך כל משימת הטיפוס. שילוב זה מדגים את הפוטנציאל של אינטגרציה בין טכנולוגיות מתקדמות ליצירת פתרונות אוטונומיים חדשניים.

בחינת מגבלות:

* **משקל**: כל הרכיבים צריכים להיות קלים ולא להכביד על הרחפן.
* **צריכת חשמל**: צריכת החשמל של רכיבי החיישן והארדואינו חייבת להיות נמוכה כדי לא להשפיע על זמן הטיסה.
* **תקציב**: יש לקחת בחשבון את המחיר של כל רכיב חומרה ולוודא שהוא מתאים לתקציב.

# **: Home Guard Drone**

המאמר "Home Guard Drone" מציע מערכת לרחפן אוטונומי קטן המתפקד בתוך מבנים, שמטרתה למפות, לנווט ולבצע סיורים באופן אוטומטי. הרחפן המבוסס על דגם DJI Tello מצויד בחיישן TOF (Time of Flight) ומצלמת RGB ומנוהל באמצעות בקר ארדואינו. המערכת כוללת תחנת טעינה ניידת ומטען ייחודי, שמאפשרים לרחפן לבצע סיורים רציפים בחדרים שונים.

המערכת מתמודדת עם אתגרים כמו יצירת מטען בטוח ומערכת מיפוי מדויקת תוך שימוש בחומרה זולה. הרחפן סורק את הסביבה באמצעות חיישן TOF מתכנן את מסלולו ומונע מכשולים, ובסופו של תהליך מתבצע תהליך טעינה אוטומטי בנחיתה. התוכנה מבוססת על ספריית SDK של Tello וכוללת אלגוריתמים לעיבוד תמונה וחשיבה מתקדמת למיקוד וניווט בתוך המבנה.

המאמר מציין כי המערכת מציעה פתרון זול ויעיל, ומספקת פוטנציאל לשדרוג עתידי עם חיישנים משודרגים ויכולת מחשוב גבוהה יותר על הרחפן עצמו, מה שיאפשר ביצועים טובים יותר במשימות אוטונומיות בעתיד.

1. **שלבים ושיטות לביצוע הפרויקט:**

אנו נתכנן ונממש מערכת אוטונומית לשליטה ברחפן, שתשתמש בחיישני מרחק וב-Arduino כדי לזהות ולתכנן את טיפוס המדרגות. המימוש יתחלק למספר שלבים עיקריים:

**איפיון דרישות ולימוד תאורטי:**

בשלב זה בוצע סקר ספרות מעמיק שכלל השוואה בין סוגי רחפנים DJI Mini Pro,) DJI) Tello ועוד) וחיישני מרחק Ultrasonic, ToF) וכו). בהתאם למגבלות משקל, עלות ונגישות חומרה במעבדה, נבחרו הרכיבים המתאימים ביותר

.**הרכבת המערכת ובחירת רכיבים:**

בוצעה בחירה של רחפן מדגם DJI Mini 3 Pro, בשילוב שני חיישני HC-SR04 ולוח Arduino Nano 33 IoT נבדקה התאימות הפיזית והאלקטרונית, ונערכו בדיקות ראשוניות למדידת מרחק במצבים סטטיים.

**תכנון וביצוע המערכת:**

החיישנים חוברו ל-Arduino, ונכתב קוד ב-C++ למדידת מרחק. במקביל, נבנה ממשק שליטה ב-Python, תוך שימוש ב- MSDKRemote לשליטה מרחוק ברחפן. הפקודות נשלחו דרך pyserial בהתאם למידע שהתקבל בזמן אמת מהחיישנים**.**

* **שלב חומרה:** ביצוע חיבור בין החיישנים ל-Arduino ופיתוח ממשק קריאת נתונים.
* **שלב תוכנה:** כתיבת קוד Python לשליטה ברחפן תוך שימוש ב-אפליקציית MSDKRemote וב-pyserial להעברת נתוני חיישנים.
* **ב**האלגוריתם מזהה ירידה פתאומית במרחק מלפנים וממטה (באמצעות שני החיישנים) ומתרגם זאת לזיהוי מדרגה. עם קבלת האות, הרחפן מעלה את גובהו בהתאם למידע שנמדד בעבר.

**ניסוי ובדיקה:**

* בוצעו מספר ניסויים בסביבה מבוקרת. תחילה נבדקה תגובת הרחפן למדרגה בודדת. לאחר תיקוני אלגוריתם ובקרת דיוק, בוצע ניסוי טיפוס על פני שלוש מדרגות רציפות. תועדו מדדי זמן תגובה, יציבות גובה, ושיעור זיהוי מדרגות מוצלח.

**כלים ושפות לביצוע הפרויקט:**

* **חומרה:** רחפן, חיישני מרחק, Arduino.
* **תוכנה:** Python (כולל אפליקציית MSDKRemoteו-pyserial), Arduino IDE.

**פלטפורמות:** PC עם מערכת הפעלה Windows או Linux לבדיקת נתונים וביצוע סימולציות.

באמצעות שילוב של תכנון מוקדם, סימולציה ממוחשבת, ובדיקות מעבדה – התאפשר מימוש מערכת אוטונומית יציבה לביצוע משימה מורכבת של טיפוס מדרגות. השילוב בין תיאוריה, תכנון, ויישום בשטח היווה את הבסיס להצלחת הפרויקט

1. **מימוש**

בפרק זה יוצג תיאור מפורט של המימוש ההנדסי של הפרויקט, הכולל את הרכיבים החומרתיים ואת המערכת התוכנתית שפותחה. המימוש בוצע תוך שיקול מגבלות משקל, ביצועים, עלות, ויכולת שילוב בין רכיבי החומרה והתוכנה, וכן תוך שמירה על יציבות ותגובה מהירה בזמן אמת.

* 1. **תיאור חומרה**

המערכת הפיזית שנבנתה כללה שילוב של מספר רכיבי חומרה, שנבחרו בקפידה בהתאם לדרישות הפרויקט:

* **רחפן:**  
  רחפן מדגם DJI Mini 3 Pro נבחר בזכות יציבותו הגבוהה ויכולת נשיאת משקל של עד כ-60 גרם. הרחפן מהווה את הפלטפורמה העיקרית שעליה הורכבו חיישנים ובקר הבקרה.
* **בקר עיבוד – Arduino Nano 33 IoT:**  
  הלוח נבחר בזכות גודלו הקומפקטי, משקלו הנמוך, והעובדה שהוא כולל ממשקי Wi-Fi ו־Bluetooth. הוא שימש לאיסוף נתונים מהחיישנים ולעיבודם הראשוני.
* **חיישני מרחק:**  
  שני חיישנים מסוג HC-SR04 Ultrasonic Sensor הותקנו – אחד בחזית הרחפן (לזיהוי מדרגות), והשני בתחתית הרחפן (למדידת גובה מהמדרגה). חיישנים אלה מדדו מרחקים בצורה אמינה וזולה בטווחים הרלוונטיים של מדרגות סטנדרטיות.
* **רכיבים נוספים:**
  + נורות RGB לחיווי ויזואלי על זיהוי מכשול (הדלקת צבע לפי המרחק שהתקרב מתחת לסף)
  + נגדים מתאימים לצורך התאמת מתחי פעולה בין הרכיבים
  + סוללת ליתיום נטענת מספקת חשמל לבקר והחיישנים SparkFun 5V/1A Charger/Booster
* **הרכבת החומרה:**  
  כל הרכיבים הותקנו על משטח נפרד תוך שמירה על איזון אווירודינמי ומשקל כולל נמוך. החיישנים כוונו בזוויות מתאימות, והחיבורים האלקטרוניים הודקו כך שלא יפגעו בזמן טיסה. הרכיב הוצמד לרחפן בצורה שאינה חסמה את החיישנים של הרחפן אך עדיין יצגה בצורה אמינה את מיקומנו בזמן אמת.

תמונה שמכילה חשמל, הנדסת חשמל, מעגל חשמלי, טקסט

תוכן שנוצר על-ידי בינה מלאכותית עשוי להיות שגוי.

**איור ? - דיאגרמת בלוקים של המערכת**

תמונה שמכילה חשמל, הנדסת חשמל, מעגל חשמלי, רכיב חשמלי

תוכן שנוצר על-ידי בינה מלאכותית עשוי להיות שגוי.תמונה שמכילה הנדסת חשמל, רכיב חשמלי, רכיב מעגל חשמלי, חשמל

תוכן שנוצר על-ידי בינה מלאכותית עשוי להיות שגוי.

**איור ? – תמונות הרכיב**

* 1. **תיאור תוכנה**

המערכת התוכנתית שנבנתה תומכת בפעולה אוטונומית מלאה. היא כוללת קוד לפלטפורמת Arduino לצורך איסוף מידע מהחיישנים, וקוד Python לצורך ניתוח הנתונים ושליחת פקודות לרחפן.

**קוד בקר (Arduino)**

* נכתב בשפת C++ באמצעות Arduino IDE
* מבצע קריאה רציפה משני חיישני המרחק (קדמי ותחתון).
* מזהה שינויים פתאומיים במרחקים ומעביר את המידע בפורמט סדרתי (Serial) למחשב הראשי.
* הקוד כולל סינון פשוט של נתונים ורמות סף לקביעת האם מזוהה מדרגה.

**קוד Python לשליטה ברחפן**

* כתוב בשפת Python תוך שימוש בספריותpyserial לקריאת מידע מה Arduino ובאפליקציית MSDKRemote (שפותחה על ידי דניאל פנקוב) לשליחת פקודות לרחפן.
* האלגוריתם מקבל מידע על מרחקים מהחיישנים ומקבל החלטה על פעולה נדרשת (עלייה, ירידה, המתנה).
* הקוד נכתב כך שיאפשר תגובה מהירה למצב משתנה תוך כדי טיסה, והותאם לביצוע אמין גם בתנאים של הפרעות קלות במדידה.

**תהליך משוב (Control Loop)**

* המערכת פועלת כלולאת משוב סגורה:
  1. החיישנים מזהים מצב סביבתי, הנתונים נשלחים ל Arduinoהנתונים מנותחים בקוד הPython נשלחת פקודת ניווט לרחפן והמערכת חוזרת לסריקת הסביבה.

1. **תוצאות ובדיקות**

בפרק זה יוצגו תוצאות הניסויים שבוצעו במערכת האוטונומית בפועל, תוך השוואה בין תוצאות הסימולציה לתפקוד בזמן אמת, ובחינת ביצועים מול הדרישות ההנדסיות שהוגדרו בתחילת הדרך. מטרת הבדיקות הייתה לוודא כי הרחפן מסוגל לזהות מדרגות ולבצע טיפוס מדויק ויציב ללא התערבות חיצונית, תוך שמירה על זמן תגובה קצר ורמת דיוק גבוהה.

**לכתוב תוצאות**

**מסקנות מתוך הניסויים:**

* המערכת הצליחה לבצע טיפוס מדויק, רציף וללא מעורבות ידנית, תוך תגובה מהירה לסביבה משתנה.
* הפידבק החזותי של נורת ה-RGB שיפר את ניתוח התקלה בזמן אמת.

עוד מסקנות?

1. **סיכום וכיווני מחקר עתידיים**
   1. **סיכום**

הפרויקט התמקד בפיתוח מערכת אוטונומית פשוטה, יציבה וחסכונית לשליטה ברחפן בביצוע משימת טיפוס מעל מדרגות. המערכת כללה שילוב של שני חיישני מרחק, בקר Arduino ממשק תוכנה בשפת Python ותמיכה בפלטפורמה של רחפן DJI Mini 3 Pro

לאורך תהליך הפיתוח, בוצעו שלבים מסודרים של תכנון, הרכבת חומרה, כתיבת תוכנה, ניסויים בשטח וניתוח ביצועים כמותי. התוצאות מעידות כי ניתן, באמצעים פשוטים וזולים יחסית, להשיג התנהגות אוטונומית מדויקת, ללא תלות במצלמות או מערכות יקרות.

המערכת שהוגדרה כיעד בפרויקט כללה:

* זיהוי מדרגות באמצעות חיישני מרחק
* קבלת החלטות בזמן אמת על בסיס לולאת משוב
* שליחה ושליטה בפקודות טיסה מותאמות
* הצלחה בביצוע מעבר מעל שלוש מדרגות בגבהים משתנים

המערכת עמדה ביעדים המרכזיים של הפרויקט:

* ביצוע טיפוס אוטונומי מלא של 3 מדרגות
* עמידה בזמן טיפוס נמוך
* יציבות ודיוק בשמירה על גובה בזמן תעופה
  1. **מסקנות**
* השימוש בחיישני Ultrasonic בלבד, ללא מערכות חזותיות או ליידר, אפשר תכנון קל, זול ואמין.
* מימוש לולאת בקרה בין Arduino לתוכנת שליטה חיצונית סיפק מענה מהיר למצבים משתנים.
* ניתן לשלב רחפנים קטנים עם רכיבי חומרה פשוטים, מבלי לפגוע ביכולת התמרון והתגובה.
* שילוב של פידבק חזותי (נורת RGB) שיפר את יכולת הניתוח בזמן אמת גם למפעיל אנושי.
  1. **הצעות להמשך**

לפרויקט פוטנציאל משמעותי לפיתוחים נוספים:

1. **שיפור באמינות ואינטליגנציה:**
   * שילוב אלגוריתם הסתגלותי (Adaptive) שיוכל ללמוד את דפוסי הסביבה בזמן אמת.
   * שימוש ברשתות נוירונים קלות לשיפור החלטות טיפוס.
2. **מיפוי תלת־ממדי של סביבה:**
   * הרחבת המערכת כך שתזהה לא רק מדרגות, אלא גם שיפועים, מכשולים משתנים או מעברים צרים.
   * יצירת מפה פנימית המבוססת על רצף מדידות.
3. **שדרוג רכיבים:**
   * שילוב חיישני Time-of-Flightכמו VL53L0X או TFMini לשיפור דיוק בטווחים קצרים.
   * שימוש במצלמה מבוססת זיהוי עומק, לשילוב עיבוד תמונה עם החלטות ניווט.
4. **יישומים עתידיים:**
   * הרחבת הפתרון למשימות חיפוש והצלה באזורים הרריים.
   * ניווט אוטונומי בסביבות סגורות מורכבות: קמפוסים, מחסנים, מבנים חכמים.
   1. **השוואה למערכת "Home Guard Drone"**

בהשראת מאמר "Home Guard Drone", שבו פותחה מערכת סיור פנימית מבוססת DJI Tello עם טעינה אוטומטית ומיפוי מבני, ניתן לראות שהפתרון שלנו בחר בגישה שונה: חיישנים פשוטים ולוגיקה נפרדת ממערכת הניווט.

בעוד שבפתרון של Tello יש הסתמכות על מצלמות ותחנות עגינה, הפרויקט שלנו מוכיח שניתן לבצע משימה מוגדרת היטב גם עם סט כלים בסיסי, תוך שמירה על עלות נמוכה וקלות הטמעה — במיוחד בסביבות ללא תקשורת יציבה או תאורה.

1. **תיעוד הפרויקט**

במהלך ביצוע הפרויקט נבנה מאגר קבצים וידע הכולל את כל שלבי הפיתוח: תכנון, חומרה, תוכנה, ניסויים ותיעוד תומך. כל התוצרים נשמרו בצורה מאורגנת ונגישים להמשך עבודה או שיפור עתידי.

* 1. **רכיבי התיעוד**

התיעוד כולל את החומרים הבאים:

* **קוד תוכנה**
* **מסמכים**.
* **ציוד בשימוש**
  + חיישני HC-SR04 – תיעוד עיוני ודפי נתונים.
  + Arduino Nano 33 IoT תיעוד קונפיגורציה, תרשימי חיבור, תכניות הרכבה.
  + מטען וסוללה SparkFun – מפרטי זרם, משקל וטעינה.
  1. **מיקום התיעוד**

כל החומרים נשמרו בענן Google Drive המשותף לצוות, ויגובו גם ב-GitHub לצורך המשכיות: