

מדינת ישראל
משרד החינוך
מנהל תקשוב טכנולוגיה ומערכות מידע

חוברת לימוד אליפות המייקרים - תחרות רחפנים תשע"ח



כתבו :

אבי חיון

מור בן עזרא

יואל כהן

מעודכן 23.12.2017

תוכן עניינים

| | | |
|---------|--|-----|
| 2..... | מבוא | 1 |
| 3..... | סקירה לכלי טייס זעירים שונים | 2 |
| 3..... | יתרונות הכטב"ם : | 2.1 |
| 4..... | חסרונות הכטב"ם | 2.2 |
| 5..... | מבנה כללי וסכמת בלוקים של הרחפן | 3 |
| 7..... | עקרון פעולה של הרחפן | 4 |
| 7..... | אופן הפעולה | 4.1 |
| 8..... | הקשר בין השלט למצבי התעופה | 4.2 |
| 8..... | מצבי תעופה בתלות במדחפים | 4.3 |
| 10..... | קצת פיסיקה | 5 |
| 11..... | מבנה חשמלי של הרחפן | 6 |
| 11..... | בקר טיסה – Flight Controller | 6.1 |
| 11..... | חיישן גיירו - gyroscope וחיישן תאוצה – accelerometer | 6.2 |
| 12..... | בקר מהירות ESC | 6.3 |
| 12..... | מנוע Brushless | 6.4 |
| 13..... | מדחף - Propellor | 6.5 |
| 13..... | סוללה – Battery | 6.6 |
| 13..... | מקלט – Receiver | 6.7 |
| 14..... | סוג האותות מהמקלט לבקר הטיסה | 7 |
| 14..... | אותות מהמקלט לבקר הטיסה | 7.1 |
| 15..... | אותות מבקר הטיסה לבקר המהירות | 7.2 |
| 16..... | בקרת הרחפן | 8 |
| 16..... | חלקי הבקרה | 8.1 |
| 17..... | פעולת מערכת הבקרה | 8.2 |
| 18..... | חישנים למדידת זווית הרחפן | 8.3 |
| 20..... | בקרת PID | 8.4 |
| 21..... | מקורות | 9 |

1 מבוא

במאה השנים האחרונות מתחוללת מהפכה טכנולוגית דיגיטלית אשר משפיעה על האנושות כולה. אין ספק שהמצאת הטרנזיסטור הייתה נקודת מפנה קריטית, זאת משום שפותחה אפשרות למזער את המעגלים האלקטרוניים. כתוצאה מכך הופיעו המחשבים האישיים ומהפכת המחשוב החלה את דרכה. יחד עם זאת החל להתפתח עולם האינטרנט והחשיפה למידע זמין בכל נושא ובכל העת, המהווה למעשה דלק בעירה למהפכה עצמה, אם כך, כל חיינו משתנים במהרה בחסות הטכנולוגיה.

כל תקופה הביאה עמה את פיתוח טכנולוגי אשר חרט את דגלו בחיינו, מחשבים ניידים, טאבלטים והפלאפונים חכמים. כיום אנו חווים את עיצומה של מהפכת הרכבים האוטונומיים, והאינטרנט של הדברים (IOT) תחום חדש המגלם בתוכו עולם חדשני ומפותח. הטכנולוגיה תופסת מקום מרכזי בחיינו ומצריכה אנשי מקצוע בכל בדרגות.

בתוכנית זאת, סביב תחרות המייקרים, אנו עושים שימוש בעולם הרחפנים המצליח לרתק בני נוער כאשר מטרתנו לחבור אותם לתחום לימודי הטכנולוגיה. בשל כך, נבנתה תכנית לימודים המבוססת תכנים רלוונטיים לעולמנו. תכנית זו מאפשרת לתלמידינו להתנסות בבניית רחפן והפעלתו, לבצע משימות תוכנה וחומרה לתחרות.

עולם הרחפנים מרתק בפני עצמו, המשלב תחומי ידע רבים כמו: פיסיקה, אלקטרוניקה, תוכנה ובקרים חכמים, אי לכך, בניית הרחפן תלווה בידע תאורטי מתחומי הידע הרלוונטיים. בחוברת זו מידע עבור תחומי הדעת השונים וזאת כדי שהתלמיד יוכל להבין כיצד המערכות הטכנולוגיות ברחפן פועלות. כמו כן יכיר, ילמד וייחשף למושגים בסיסיים. זו היא השנה הראשונה שהתוכנית מופעלת, יחד נוביל את תלמידינו לחוויית הצלחה ועשירה בידע, אנו תקווה שהתוכנית תעמוד במטרתה ותגייס תלמידים למגמות הטכנולוגיות. מאחלים לכולם בהצלחה.

2 סקירה לכלי טייס זעירים שונים

מטוס זעיר ללא טיס (מזל"ט), מטוס ללא טיס (מל"ט), כלי טיס בלתי מאויש (כטב"מ) ונכון להיום, כלי טיס מאויש מרחוק, ובראשי תיבות כטמ"ם. השימוש במערכות מוטסות בלתי מאוישות מתרבה באופן מהיר ביישומים מגוונים החל ממערכות מוטסות נושאות נשק קטלני, או אחרות השומרות על שלום הציבור דרך כלי טיס העוקב אחרי שינויים גאולוגיים ועד שילוח חבילות.

מערכת של כל כלי בלתי מאויש (ולכן גם כטב"ם) מורכבת מארבעה מרכיבים עיקריים:

- **פלטפורמה**, או כלי הטיס במקרה של כטב"ם. הפלטפורמה כוללת גוף, מנוע, מערכות בקרה, חיישנים לניטור עצמי ומערכות היגוי והפעלת הגאים.
- **מטען ייעודי (מטע"ד)**, שהוא סט האמצעים בעזרתם מתבצעת המשימה, למשל מצלמה אלקטרו-אופטית. המטען הייעודי נישא בפלטפורמה ומקבל ממנה שירותים של העברת פקודות מהקרקע, אספקת חשמל, תנאי סביבה ועוד.
- **מערכת תקשורת**, המורכבת ממקטע מוטס וממקטע קרקעי. מערכת התקשורת אחראית להעברת פיקוד מהמפעיל הקרקעי לפלטפורמה ולמטע"ד ולהחזרת תוצרי המטע"ד (למשל: תמונת וידאו).
- **תחנת הפעלה**, המכילה מערכות מחשוב ומידע, שמאפשרות למפעיל אנושי לשלוט בפלטפורמה ובמטע"ד ולראות את דיווחי כלי הטיס והמטע"ד ואת תוצרי המטע"ד.

2.1 יתרונות הכטב"ם:

לכטב"ם (לכי טיס בלתי מאויש) כמה יתרונות מובהקים על פני מטוס מאויש המבצע משימה דומה:

- יכולת לפעול במשימות הנמשכות זמן רב.
- יכולת לפעול באזורים בעלי רמת סיכון גבוהה.
- עלות הכטב"ם נמוכה לרוב בהשוואה לכלי טיס מקביל.
- יכולת שרידות גבוהה יותר.
- יכולת פעולה במקומות מורכבים, יערות מבנים וכדומה.
- יכולת תמרון גבוהות.
- יכולת המראה ונחיתה כמעט בכל מקום

2.2 חסרונות הכטב"ם

- תלות בשליטה מרחוק.
- תלות ברשתות תקשורת ומתקני תקשורת.
- יכולת המפעילים לתקן תקלות מרחוק מוגבלת ביותר.

ברוב המשימות המוטלות על פלטפורמות אוויריות, עולים היתרונות על החסרונות. מעבר לכך, פיתוח של מערכות שליטה אוטומטיות מתקדמות הופכות את ההטסה לפשוטה יותר ונגישה, ללא צורך בהכשרה ארוכה ויקרה של טייסים. בנוסף, פיתוח מערכות קטנות ויעילות יותר הופך את הכטב"מים לקטנים ואמינים יותר. עובדות אלה מובילות למגמה הולכת ומתחזקת של העדפת שימוש בכטב"מים על פני מטוסים מאוישים.

3 מבנה כללי וסכמת בלוקים של הרחפן

רחפן הוא כלי טיס בלתי מאויש היוצר עילוי באמצעות סיבוב מדחף בעל להבים, בדומה למסוק. הרחפן הוא בעל מכניקה פשוטה יחסית, וקל לשליטה בטיסה. ברוב המקרים הרחפן הוא בעל זווית פסיעה (הזווית בו הלהבים חותכים את האוויר) קבועה, השליטה בתנועת הטיסה של הרחפן מושגת על ידי שינויי המהירויות היחסיים בין הלהבים השונים, באופן המשפיע על הדחף והכוח של כל להב.

הרחפנים הם בלתי-יציבים מבחינה אווירודינמית בהשוואה לסוגי כטב"מים (כלי טיס בלתי מאוישים) אחרים, ונשלטים על ידי בקר טיסה, או לוח בקרה, כדי לשמור על תנועה יציבה. כדי לשמור על דיוק מצב הטיסה וכיוונה, בקר הטיסה משלב נתונים של גירוסקופים ומדי תאוצה.

רחפן רב להב בעל 4 מנועים (Quadcopter)

לרוב העיסוק ברחפן בעל 4 מנועים (Quadcopter) שני מנועים ממוקמים באלכסון מסתובבים לכיוון אחד, והשניים האחרים בכיוון ההפוך. בתצורה כזו קל לשלוט בציר הגלגול או העלרוד (כלומר – הגברת המהירות של שני מנועים בצד אחד והאטת המהירות של שני המנועים בצד השני). נסיקת הרחפן לגובה מבוצעת על ידי האצה של כל המנועים בו זמנית, והנמכת הרחפן מבוצעת על ידי האטה של כל המנועים בו זמנית.

סוגי רחפנים

ישנם מספר סוגי רחפנים, ושמן על פי מספר המנועים שלהם:

- טריקופטר : 3 מנועים
- קואדקופטר : 4 מנועים (זהו סוג הרחפן השכיח)
- הקסהקופטר : 6 מנועים
- אוקטוקופטר : 8 מנועים (בדרך כלל למטרות עבודה כמו הרמת משקל ועוד)

ככל שיש יותר מנועים כך הרחפן בעל כוח נשיאה גדול יותר והיציבות עולה, אם זאת יכולת התמרון של יורדת.

שיקולים בבחירת רכיבי הרחפן

ברחפן יש מספר גורמים שחייבים להיות מתואמים על מנת להצליח להטיס אותו ולהשיג ביצועים טובים.

המנועים מאופיינים על ידי KV, משמעות היחידות מספר הסיבובים לדקה לכל 1v, משמעות הדבר ככל שמתח הסוללה גדול יותר כך מהירות הרחפן גבוהה יותר. בדרך כלל משתמשים עם סוללה בעלת 3 תאים (11.1v) למשתמש החובב, כאשר נרצה להעמיס משקל על הרחפן נשתמש ב 4 תאים .

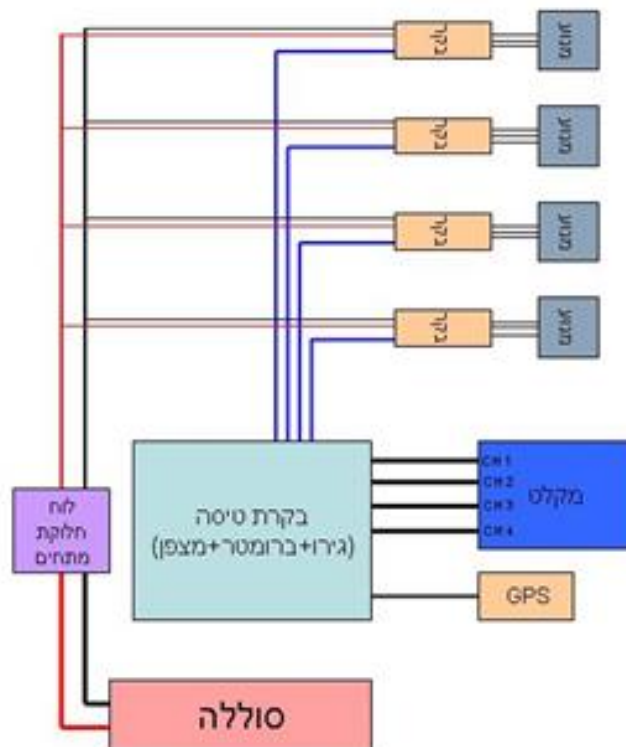
בחירת המנוע וערכי ה kv שלו קובעים את סוג המדחפים (פרופלורים) והגודל של הרחפן, לא ה-kv הגדול יותר הוא הטוב יותר.

המדחפים (פרופלורים) כפי שנאמר צריכים להיות מותאמים למנועים, הם מאופיינים על ידי קוטר וזווית הפסיעה, בדרך כלל שני נתונים אלה מופיעים על הפרופלור. ככל שהמדחף גדול הוא ייצר דחף גדול יותר לרחפן יחסית לאותה מהירות ויצריך יותר זרם מהסוללה, ככל שהפסיעה גדולה יותר הרחפן יהיה מהיר יותר.

הסוללה חייבת להיות מסוגלת לספק מספיק זרם לאורך זמן, הקשר בין המנוע פרופלור והסוללה חייב להתאים, משום שמהירות וכוח באים לרוב על ידי צריכת זרם גבוהה (הסוללה תתפרק מהר) אבל לא רק (הזכרנו שהפסיעה קובעת גם את מהירות הרחפן).

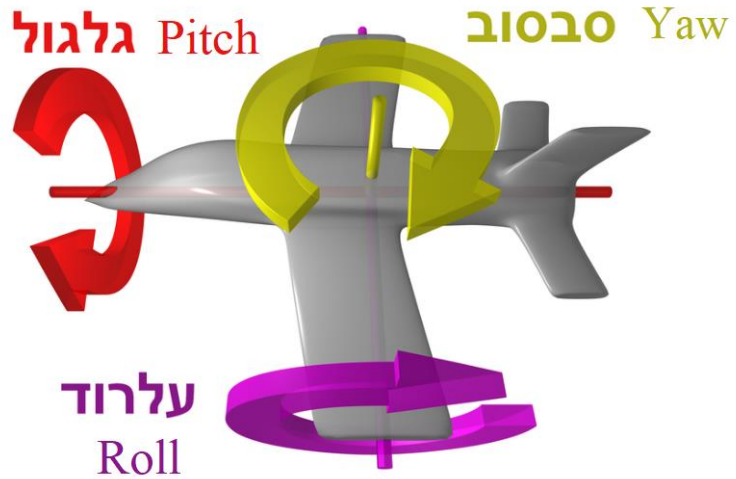
בקרי המנועים נבדלים האחד מהשני בעוצמת הזרם שהם מעבירים למנועים, לכן הם חייבים להיות מסוגלים לעמוד בזרמי מקסימום של המנוע. למנועים יש תפקיד במעגל האלקטרוני עליו נדון בהמשך.

בקר הטיסה זה החלק שמחבר בין חלקי המערכת ודואג להטסת הרחפן. בקר הטיסה לא תלוי בשאר החלקים ואין צורך בהתאמה, בקרים שונים יוכלו לעשות את אותה עבודה על אותו רחפן.



סכמת הרחפן

4 עקרון פעולה של הרחפן

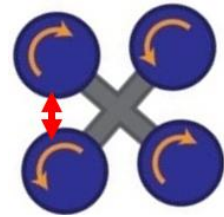


כווני תנועה בסיסיים

4.1 אופן הפעולה

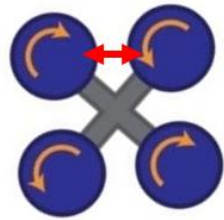
לרחפן ארבעה מדחפים (פרופלורים) עם פסיעה קבועה, הם מקבלים את כוח העילוי (יינתן בהרחבה בפרק הפיסיקה) מסיבוב מהיר של המדחפים, אשר דוחפים אוויר מטה ויוצרים דחף כלפי מעלה. בנוסף יוצרים המדחפים מומנט סבוב כנגד האוויר האמור לשוב את הרחפן כולו בכיוון סיבוב המנועים, על מנת למנוע את סיבובו, המדחפים מופעלים בזוגות כאשר כל זוג ממוקם לאורך אחד מצירי המערכת ומסתובב בכיוון הפוך לכיוון הסיבוב של הזוג השני. מבנה זה מבטל את מומנט הסיבוב ומאזן סטאטית את הכוחות והמערכת יכולה להגיע למצב של ריחוף יציב. שליטה על הרחפן תתבצע על ידי שינוי המהירויות היחסי בין המנועים כפי שיתואר בהמשך.

Pitch - תנועת גלגול, הרחפן בזווית



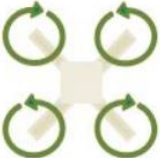







בדוגמה זו הגברת מהירות של הזוג השמאלי תיצור גלגול ימינה והרחפן ינוע ימינה. הגברת מהירותו של הזוג הימני, יצור גלגול שמאלה. והרחפן ינוע שמאלה.



Roll – תנועת עלרוד, תנועה קדימה ואחורה.



מוגברת מהירותם של שני הלהבים הקדמיים עבור הרמת אף, או שני האחוריים להורדת האף.

סיכום המצבים השונים

| | |
|--|---|
| <p style="text-align: center;">מצעות</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>ירידה למטה</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>עליה למעלה</p> </div> </div> | <p style="text-align: center;">עלרוד</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>תזוזה קדימה</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>תזוזה אחורה</p> </div> </div> |
| <p style="text-align: center;">גלגול</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>נטייה שמאלה</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>נטייה ימינה</p> </div> </div> | <p style="text-align: center;">סבסוב</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>סבסוב ימינה</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>סבסוב שמאלה</p> </div> </div> |

 מהירות מנוע רגילה
 מהירות מנוע מוגברת

5 קצת פיסיקה

כוח עילוי ברחפן הוא אותו כוח שמעלה את הרחפן מעלה, כוח זה תלוי במומנט הסיבוב (**אפקט הפיתול**) של המדחף, כאשר הכוח הנוצר על הרחפן הוא בכיוון הפוך לכיוון סיבוב המדחפים. **מומנט הסיבוב** הוא מכפלת הכוח במסה של הזרוע (לעיתים ניתן לראות כמכפלת הכוח באורך), במקרה שלנו הוא תלוי בגודל המדחף ובמהירות הזוויתית של הסיבוב. חישובים מדויקים של כוח העילוי מורכבים מאוד וגם הם לא מצליחים לנבא במדויק את התוצאה, חלק מהתאמת המדחפים מתבצע על ניסוי ותהייה

ככל שהמדחף יותר גדול כך מומנט הסיבוב גדול יותר, אך דרושה יותר אנרגיה להפעילו. כשזווית הפסיעה גדולה יותר נקבל מהירות גבוהה יותר

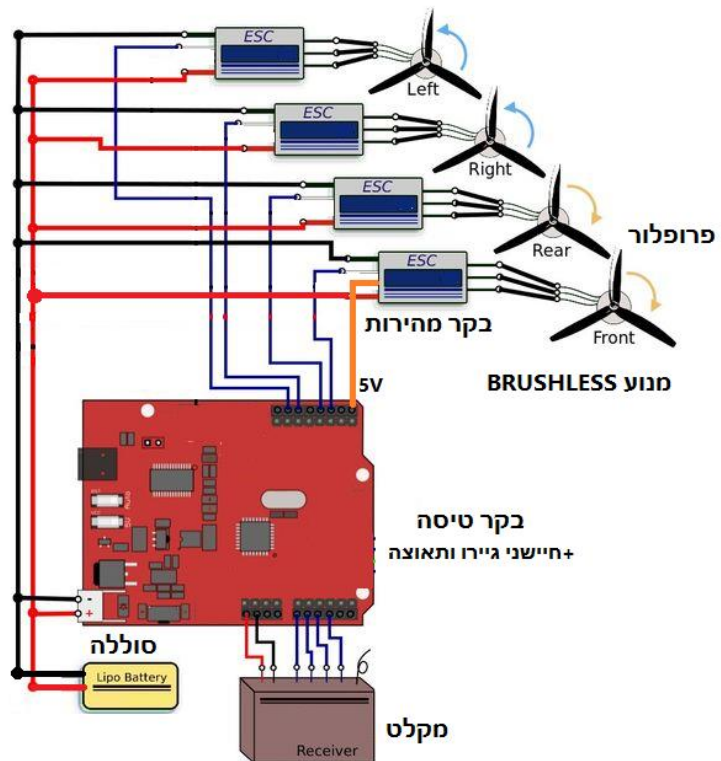
כאשר נסתכל על המדחף נראה שהזווית הפסיעה משתנה לאורכו, בצמוד למנוע זווית הפסיעה גדולה והיא קטנה עד קצה המדחף. הסיבה לכך שמהירות הסיבוב משתנה לאורך המדחף (החלק החיצוני מסתובב מהר יותר מהפנימי) כדי לשמור על מומנט סיבוב אחיד שינו את זווית הפסיעה



כאשר נוסיף כנף נוספת המומנט יגדל אך שוב זה יהיה על חשבון צריכת החשמל .



6 מבנה חשמלי של הרחפן



מערכת בסיסית של רחפן כוללת את החלקים הבאים :

6.1 בקר טיסה – Flight Controller

כרטיס אלקטרוני הכולל מיקרו-בקר (microcontroller) וחיישני תנועה. תפקיד הבקר לקבל מידע מחיישני התנועה (חיישן גירו וחיישן תאוצה) את זווית הרחפן ומידע מהמקלט. מידע זה מעובד לפי תוכנת הבקר ובהתאם מסופקים אותות מתאימים לבקרי המהירות הקובעים את מהירות המנועים לשם איזון וריחוף.

6.2 חיישן גיירו - gyroscope וחיישן תאוצה – accelerometer

חיישנים אלו נמצאים בדרך כלל בכרטיס בקר הטיסה ותפקידם לספק לבקר את זווית הרחפן. שילוב שני החיישנים יחד עם עיבוד מתאים בתוכנה יספק נתונים טובים של זווית הרחפן.

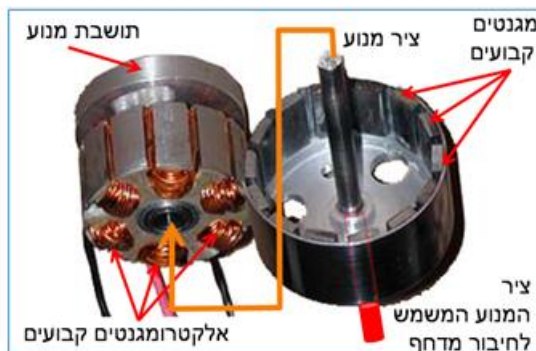
6.3 בקר מהירות ESC



כרטיס אלקטרוני המקבל אותות Pulse Width Modulation (PWM) – אפנון רוחב פולס מבקר הטיסה ובהתאם מספק אותות מתאימים לשלושת סלילי המנוע לקביעת המהירות. מתח העבודה של הבקר הוא 5V, הדק כניסת הבקרה מגיע מבקר הטיסה ושלושת היציאות מתחברות למנוע ומוציאות אותות PWM להפעלת המנועים (יוסבר בהמשך).

6.4 מנוע Brushless

מנוע זה, כן שמו כן הוא, חסר מברשות המצויים במנועי DC הסטנדרטים, בכך מפחיתים את חיכוך המברשות ומשיגים נצילות ומהירות גבוהים יותר. המנוע בנוי ממערכת של 3 סלילים הנמצאת על תושבת המנוע והיא סטטית, החלק הדינאמי מורכב ממגנטים קבועים היוצרים שטף מגנטי והם חלק ממבנה ציר המנוע כפי שמתואר.



כאשר נורים זרם דרך הסלילים בסדר מסוים, ייווצר שדה מגנטי לפי אותו סדר וכך נוכל ליצור שדה מגנטי מסתובב אשר יסובב את המגנטים ולמעשה את הציר במהירות הנמוכה מעט ממהירות השדה. שלושת הסלילים של המנוע מקבלים אותות בסדר המתאים מבקר המנוע.

6.5 מדחף - Propellor

כתוצאה ממבנה המדחף ומהירות סיבובו נוצר דחף ועילוי לכלי עצמו.



6.6 סוללה – Battery



תפקיד הסוללה לספק את המתח והזרם הדרוש לחלקים האלקטרוניים של הרחפן. סוללה עשויה מ-Lithium polymer (Lipo) תרכובת זו מאפשרת הספק גבוה במשקל נמוך יחסית. יתרון נוסף הוא ביכולת לספק זרם רגעי גבוה מאוד הדרוש לפעולת המנועים. קיבולת הסוללה נמדדת ביחידות mAh שהיא כמות הזרם למשך שעה אחת, נתון נוסף הוא ערך C שאומר מהי כמות הזרם המקסימלית הרגעית (על ידי הכפלתו בערך קיבולת הסוללה), נתון שהוא חשוב בהפעלת מנועים.

למשל: בסוללה בצילום הנתון המופיע 2500mAh 8C, הנתון אומר שהסוללה יכולה לספק 2.5A במשך שעה אחת, והערך הרגעי של הזרם יכול להגיע עד $2.5A * 8 = 20A$

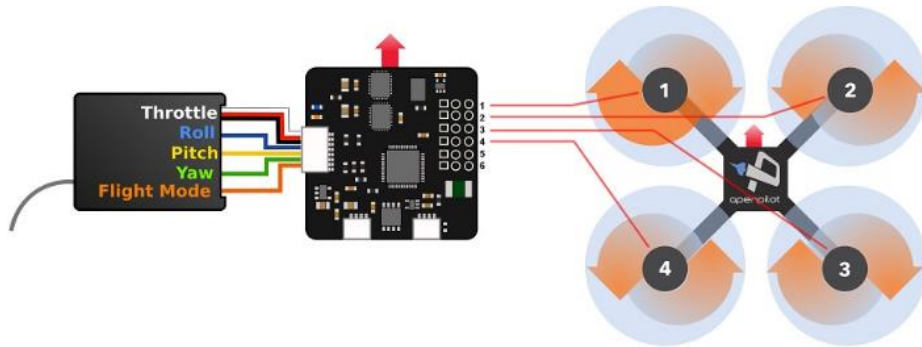
6.7 מקלט – Receiver



המקלט קולט תשדורת RF המשודרים אליו מהשלט הרחוק, וזה מעביר אותן לבקר הטיסה במספר ערוצים.

7 סוג האותות מהמקלט לבקר הטיסה

בקר הטיסה מקבל אותות PWM מארבע ערוצי המקלט (4 ערוצים מינימום), לצורך שליטה על תעופת הרחפן. כל ערוץ אחראי על פונקציה אחת של השלט (למעלה, למטה, קדימה, אחורה).

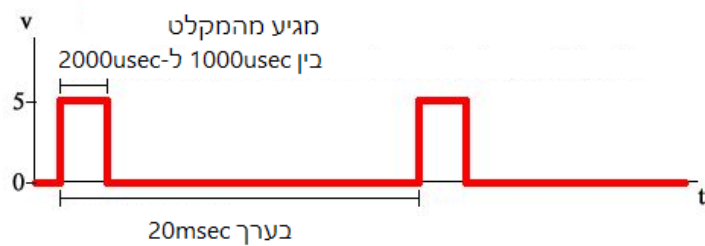


7.1 אותות מהמקלט לבקר הטיסה

אותות ה-PWM המסופקים מהמקלט לבקר הטיסה מתוארים באיור הבא:

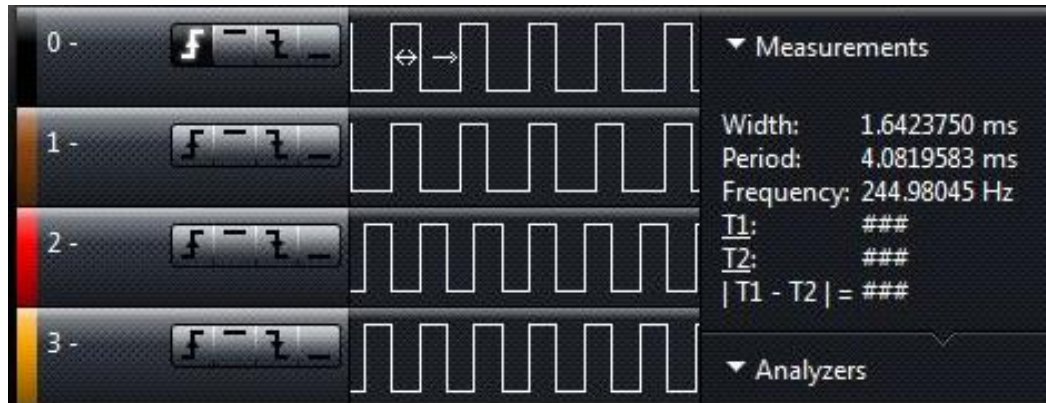


הזמן הקובע לבקרה הוא רוחב פולס הנע בין $1000\mu\text{sec}$ - $2000\mu\text{sec}$, כאשר זמן המחזור לא חייב להיות מדויק והוא בערך 20msec

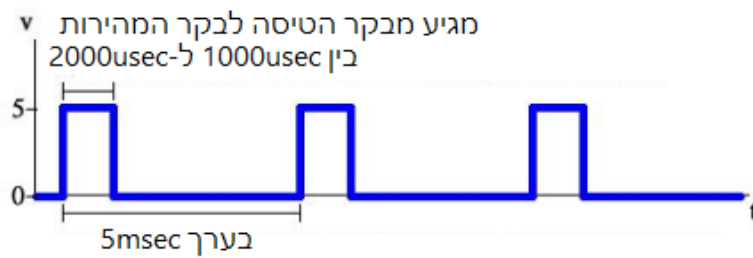


7.2 אותות מבקר הטיסה לבקר המהירות

בקרי המהירות מקבלים אותות PWM מבקר הטיסה לשליטה על מהירות המנועים האותות מתוארים באיור הבא:



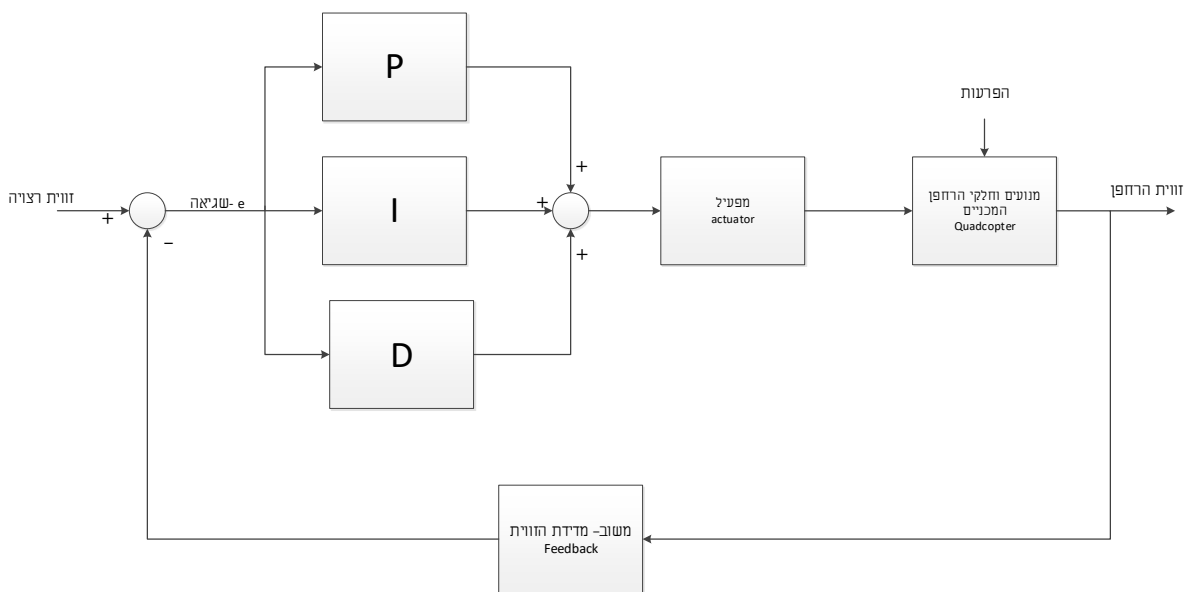
גם באפנון ה-PWM של הבקר, רוחב הפולס נע בין $1000\mu\text{sec}$ - $2000\mu\text{sec}$, אבל זמן המחזור קטן יותר והוא בערך 5msec



8 בקרת הרחפן

בקרת הרחפן נעשית בחוג סגור, משמעות הדבר, היא שיש מדידה אותות מחיישנים ותיקון (משוב). במקרה של הרחפן, המטרה היא להגיע לאיזון, כלומר להביא את זווית הרחפן לערך זווית רצויה, לשם כך יש צורך למדוד באמצעות חיישנים את הזווית, להשוות לערך הזווית הרצויה ובמידה וקיימת שגיאה, הבקר מספק אותות מתאימים למנועים להסתובב במהירויות שונות על מנת לאזן את הרחפן.

ניתן לראות עיקרון של מערכת בקרה בחוג סגור בתרשים הבא:



8.1 חלקי הבקרה

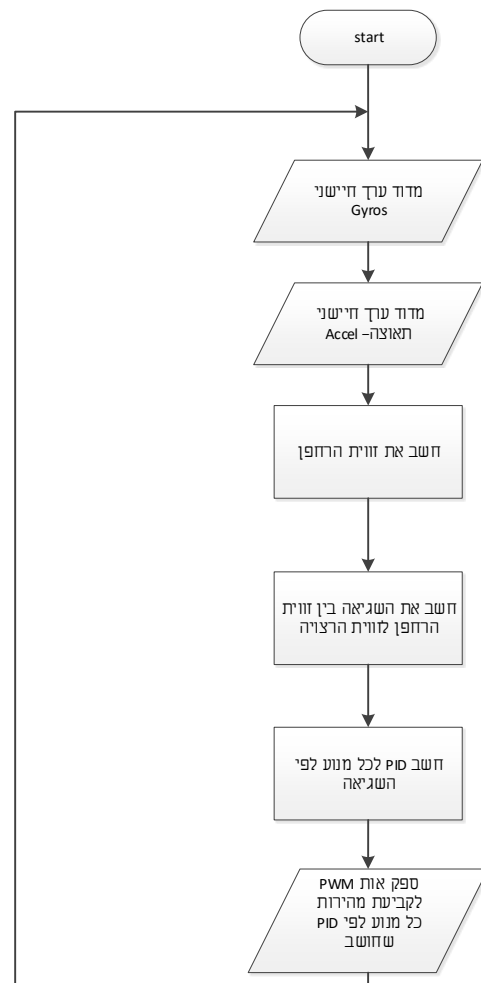
- בקר הטיסה כולל את מנגנון בקרת PID שיוסבר בהמשך והמפעיל המספק אותות מתאימים לבקרי המנועים לקביעת מהירות המנועים.
- חלקי הרחפן – מנועים והחלקים המכניים אחראים לתעופת הרחפן ומושפעים מהאותות המגיעים מבקר הטיסה והפרעות חיצוניות כמו רוח.
- יחידת המשוב, המדידה - אחראית למדוד את זווית הרחפן.

8.2 פעולת מערכת הבקרה

תפקיד מערכת הבקרה היא לאזן את הרחפן לזווית רצויה לפי התהליך הבא:

1. זווית הרחפן נמדדת באמצעות חיישני גיירו וחיישני תאוצה, שילובם יחד מספק את זווית הרחפן.
2. זווית זו משוות לזווית הרצויה המגיעה משלט מפעיל הרחפן והשגיאה מחושבת על ידי הבקר.
3. בהתאם לשגיאה מתבצע חישוב מתמטי בתוכנת הבקר על פי עקרונות בקרה PID.
4. הנתונים המעובדים מסופקים להפעלת מנועי הרחפן.
5. הרחפן משנה את הזווית בהתאם לנתונים אלו.
6. תהליך חוזר כל הזמן על עצמו מ-1 עד 5

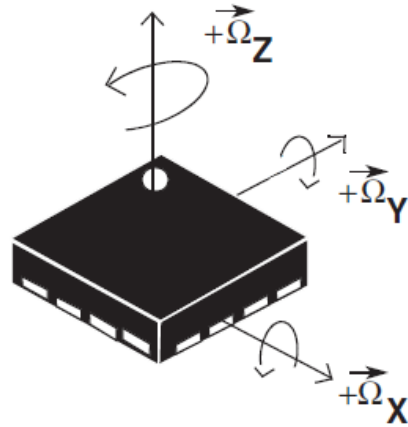
התהליך מתואר בתרשים הבא:



8.3 חיישנים למדידת זווית הרחפן

חיישן הגיירו

זהו חיישן המודד את המהירות הזוויתית (גודל וכיוון).



מכיוון שהוא מודד מהירות זוויתית - ניתן לסכום בתוכנה את הערך המתקבל מהחיישן ולמצוא את הזווית.

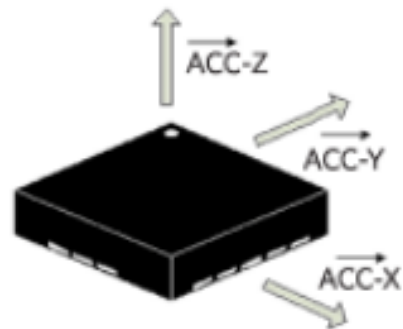
למרות היותו מהיר, אחת הבעיות של החיישן הוא ה-drift, לכל גיירו יש bias באות שלו, ואם נבצע אינטגרציה על האות שלו נקבל שגיאה מתבצרת במשך הזמן של הזווית.

לכן לא נוכל להשתמש בו לבד לחישוב הזווית.

חיישן התאוצה

זהו חיישן היכול למדוד תאוצה דינמית - מדידה של תאוצת גוף.

או תאוצה סטטית- כוח משיכת כדור הארץ שבעזרתו ניתן לחשב זווית הגוף, שימוש המתאים למקרה של הרחפן.

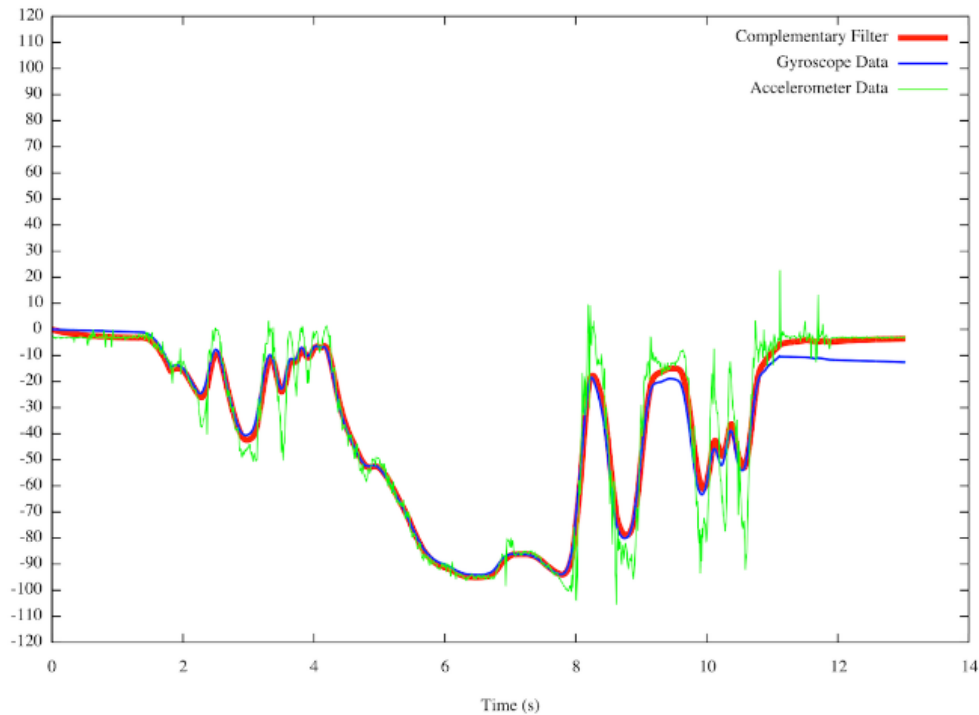


שילוב שני החיישנים

כדי לקבל זווית אמינה של הרחפן יש צורך לשלב בין שני החיישנים ולהשתמש בפילטר דיגיטלי בתוכנה.

חיישן הגיירו מסוגל לספק זווית יחסית ולא זווית מוחלטת ואילו חיישן התאוצה יכול לספק זווית מוחלטת, אבל עם רעש וסטיות. שילובם יחד ופילטר מתאים יספק לנו זווית רצויה.

באיור הבא מתואר גרף המראה שילוב זה.



התוצאה המשוקללת מבטאת את הזווית ללא השינויים של חיישן התאוצה, הרעיון בשקלול הוא לעקוב אחרי הזווית האמתית באמצעות חיישן התאוצה ולעקוב אחרי שנויי הזווית באמצעות חיישן הגיירו.

8.4 בקרת PID

בקרה P - בקרה פרופורציונאלית Proportional

אות מוצא הבקר יחסי לשגיאה הרגעית. תפקיד בקרה זו לתקן את השגיאה קרוב ככל היותר לאפס, העלאת ההגבר של הבקר תקטין את השגיאה, אבל הגבר גדול מדיי עלול לגרום לחוסר יציבות של המערכת, לכן לא ניתן בעזרתו להגיע לשגיאה 0.

בקר I - בקר אינטגרלי Integral

מוצא הבקר תלוי באינטגרל (סיכום) השגיאה בזמן. לכן כל עוד קיימת שגיאה, תפוקת הבקר תשתנה בזמן עד למצב שהשגיאה תתאפס, שינוי פרמטרים של בקרה זו תקבע את הזמן לתיקון השגיאה, אבל קצב גבוה מדי של תיקון יפגע ביציבות הרחפן.

בקרה D - בקרת נגזרת Derivative

בקרה המגיבה לקצב השינוי בזמן- נגזרת, ככל שקצב השינוי בזמן גדול יותר תפוקת הבקר גדולה יותר.

תפקיד בקרה זו להגיב לשינויים מהירים בזווית של הרחפן כתוצאה מהפרעה חיצונית כמו רוח.

שילוב שלושת סוגי הבקרה - PID

בשילוב של כל סוגי הבקרה PID, יש חלוקה של תפקידים לטפל בשגיאת זווית הרחפן.

מקדם של ה-P הוא הדומיננטי ותפקידו לבקר על התגובה הדינמית של הרחפן.

מקדם ה-I דואג לתקן את השגיאה לאפס בתלות בזמן.

מקדם ה-D מגיב לשינויים מהירים בזמן ונכנס לפעולה בזמן הפרעות מהירות הדורשות תגובה חזקה.

9 מקורות

- <https://sites.google.com/site/omniflightschool/home/tech/ktb-m/rbsb-lhb>
- <http://www.efly.co.il/forums/archive/index.php/t-57754.html>
- [/http://www.heara.co.il](http://www.heara.co.il)
- How Airplanes Fly: A Physical Description of Lift David Anderson & Scott Eberhardt Fermi National Accelerator Laboratory Batavia IL 60510