

**פרויקט הנדסי שנה ד':  
"מערכת זיהוי ויירוט בלונים"**

**ספר פרויקט**

שמות המבצעים	מספר ת.ז.	דוא"ל
א) אסף גולדיס	301809711	asaf.goldis90@gmail.com
ב) גיא בנימיני	200454510	gmbinyamini@gmail.com

מהנדס באוניברסיטה : מר מאיר בוסקילה – מהנדס המחלקה.  
אחראי אקדמאי : מר יורם מזור.

תאריך הגשת הספר - 2/7/2018

הערכה לספר פרויקט :  
הספר כתוב בצורה ברורה ומובנת עם כל השרטוטים הנדרשים להבנת המודלים של  
המערכת, הספר כתוב בצורה היררכית מובנת עם כל הדגשים הנחוצים.

 חתימה :

## **תקציר:**

במהלך השנה השלישית ללימודים חשבנו רבות איזה פרויקט גמר נרצה לבצע. הפרויקט שחיפשנו הוא שבילנו הזדמנות (אולי יחידה) לבחור נושא ורעיון ולרוץ איתו משלב התכנון, רכש, בדיקות ועד לשלב הסיום וההצגה, כך שנוכל ללמוד תוך כדי ביצוע על נושאים שמעניינים אותנו ושנראים לנו מאתגרים ומפתחים. חיפשנו רעיון שמשלב חומרה, תוכנה, תקשורת בין רכיבים שונים ואפשרות להתממשק לעולם הממשי, ולבסוף מצאנו את הפרויקט הנ"ל. פרויקט זה משלב את הנושאים בהם רצינו לעסוק, מכיל בתוכו אתגרים רבים ודורש מאתנו למידה עצמית של נושאים שונים שלא הזדמן לנו לעסוק בהם במהלך הלימודים.

במהלך השנים נעשה שימוש בלייזר בטווח רחב של תחומים ושימושים שונים, כאשר השימוש, אולי ה"אקזוטי" והמושך ביותר הוא השימוש שהוצג בשנת 1979 בסרט הראשון של מסע בין כוכבים: אקדחים ורובי לייזר. מאז היו מספר ניסיונות להשתמש בלייזר במערכת יירוט, כאשר מטעמי נצילות אנרגטית ואמנות בינלאומיות לא בוצע שימוש בלייזר בשדה הקרב ככלי נשק נייד נגד מטרות אנושיות. מטרת הפרויקט הייתה לתכנן ולבנות מערכת המבצעת זיהוי ועקיבה אחרי בלון בצבע אדום, הכוונה לייזר אל עבר הבלון וביצוע יירוט לפיצוץ הבלון. מרחב העבודה בו המערכת תוכננה לעבוד הוא חדר סגור (מטעמי בטיחות) כאשר הרקע של החדר בצבע לבן וטווח הפעולה הוא 1.5 עד 5 מטרים. המערכת מורכבת מכמה מכלולים עיקריים: מצלמה, מחשב אישי, כרטיס פיתוח הניתן לתכנות, מנועים בעלי יכולת תנועה בשני צירים ולייזר בהספק המתאים לפיצוץ בלון המטרה. תכנון המערכת התבצע בשני מישורים במקביל: חומרה ותוכנה. כאשר מצד אחד יש לבחור רכיבים שיכולים לעמוד בדרישות המערכת ומצד שני יש להימנע ממורכבות תוכניתית רבה מדי כך שזמן העיבוד יאריך והמערכת לא תהיה אפקטיבית. בגלל שהפרויקט הוא פרויקט המוכוון לתחום הנדסת חשמל ואלקטרוניקה ולא להנדסת מכונות, המנועים שנבחרו הם מנועים שניתן לקנות כערכה מוכנה וניתן להרכיב אותם אחד על גבי השני (משמש לערכות ברובוטיקה), כך שלא יהיה צורך לעסוק בתכנון מערכת תמיכה מכנית למנועים. המערכת החשמלית התומכת של המנועים והמערכות הנלוות תוכננו והורכבו על גבי מטריצה בהתאם לדרישות ולאחר הפעלה ובדיקה של כלל הרכיבים בוצעה הלחמה והרכבה של מערכת החשמל הכוללת עם כלל הרכיבים האלקטרוניים ללוח אחד מסודר. קוד ההפעלה של המערכת נכתב בשתי שפות פיתוח שונות (VHDL ו-C) על גבי פלטפורמות שונות (כרטיס הפיתוח - באמצעות תוכנת Quartus והמחשב האישי - בתוכנת Matlab). לבסוף לאחר גמר תכנון המערכת התבצעה סדרת בדיקות וניסויים עבור כל חלק של המערכת בנפרד על מנת לוודא את פעולתו התקינה. לאחר גמר ביצוע הבדיקות התבצעה בדיקה כוללת של המערכת.

במהלך התכנון בוצעו מעט שינויים - "פשרות" בהגדרת היכולות של המערכת, שינויים אלו בוצעו בעיקר משיקולי עלות הרכיבים, כך שהפרויקט יעמוד ככל הניתן בתקציב הקיים מטעם האוניברסיטה. ניתן לשפר את ביצועי המערכת בעזרת רכישת רכיבים יותר מדויקים ויקרים, אולם הדבר גם ידרוש התאמות קלות בקוד המערכת.

### **הכרת תודה:**

ברצוננו להודות לאנשים הרבים שעזרו לנו בעת ביצוע הפרויקט ובמהלך שנות הלימודים.

בראש ובראשונה לנשותינו היקרות, ליזה ושירלי, שאילולא הגב התומך, העזרה, ההבנה והתמיכה לאורך כל שנות הלימודים, לא היינו מגיעים לאן שהגענו. על כך ועוד מגיעה להם תודה ענקית.

לסגל המרצים והמתרגלים במחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה שאילולא העצה והתמיכה שלהם דברים היו מסובכים הרבה יותר.

תודה מיוחדת למר מאיר בוסקילה מהנדס המחלקה, עוד בתחילת דרכנו בתואר דרשת מאתנו סטנדרטים גבוהים וירידה לפרטים ותרמת רבות לעיצוב דמות המהנדס אליה אנו שואפים. תודה לך על היחס האישי ההקשבה, השאיפה למצוינות והעזרה מול גורמים באוניברסיטה לכל אורך התואר ובפרויקט בפרט.

לפרופ' אראל גרנות, על העצות המועילות בתוכנת Matlab, על העזרה בבחירת הלייזר המתאים ועל אורך הרוח והרצון לעזור לשני סטודנטים עם הרבה שאלות.

למר זיו גלסר, על העזרה הרבה בכל נושא הלייזרים וביצוע המדידות ועל התמיכה וההדרכה במעבדות האופטיקה.

ליפעת עסיס, על העזרה בהכנת ההדמיות של הפרויקט והייעוץ הוויזואלי.

ברצוננו להודות למנחה האקדמאי שלנו, מר יורם מזור. שהביא איתו את הניסיון בתחום התקשורת ושפת VHDL והנחה אותנו בצורה מקצועית לכל אורך הפרויקט.

מר יורם מזור הסביר לנו כבר בתחילת הדרך כי הפרויקט איננו פשוט ומכיל מגוון תחומים בהם עלינו לשלוט וכי נדרשת העמקה בשפת C, שפת VHDL ולמידה של כרטיס פיתוח חדש ותוכנת Quartus של חברת Altera.

כמו כן הפרויקט דרש ידע בתוכנת Matlab ועיבוד תמונה על PC. מכיוון שמר יורם מזור הגיע מהתעשייה שיטת העבודה מולו חפפה לצורת ניהול בתעשייה שבו מנהל הפרויקט מוריד משימות ועוזר בנקודות קריטיות ובהחלטות ובהסברים אך אנו עשינו את העבודה בשטח ובמימוש אמיתי של מוצר ובכתיבת התוכנה לחומרה שבחרנו, מציאה ותיקון באגים, בדיקה ושיפורים תוך כדי הרצה המערכת, ועל כן נתונה תודתנו למר יורם מזור.

תודה רבה לחברים, שעזרו בעידוד ועצה טובה במהלך התכנון והביצוע.

כמובן תודה רבה להורינו שעזרו בנושאים רבים מספור לאורך הדרך. על כל זאת ועוד, תודה.

## תוכן עניינים

2	.....	תקציר :
3	.....	הכרת תודה :
6	.....	1. מבוא :
6	.....	1.1 פתיחה :
7	.....	1.2 התפתחות הלייזרים :
9	.....	2. מטרת הפרויקט :
9	.....	2.1 כללי :
9	.....	2.2 תנאי התכנון :
9	.....	2.3 דרישות המערכת :
9	.....	3. תיאור המערכת :
9	.....	3.1 כללי :
12	.....	3.2 תכנון החומרה :
15	.....	3.3 תכנון התוכנה :
16	.....	4. מימוש המערכת :
16	.....	4.1 מימוש חומרה :
22	.....	4.2 מימוש תוכנה :
25	.....	4.3 הסבר על קוד המערכת Matlab :
29	.....	4.4 הסבר על קוד המערכת Altera :
36	.....	5. ניסויים ובדיקות :
36	.....	5.1 מדידת זמן ומהירות נפילה חופשית של בלון :
36	.....	5.2 מציאת ערכי אמת של תנועת המנועים :
36	.....	5.3 בדיקת תקשורת בין המחשב לכרטיס הפיתוח :
36	.....	5.4 בדיקת מוצא כרטיס הפיתוח, אות ה-PWM :
37	.....	5.5 בדיקת מהירות התנועה של המנועים :
37	.....	5.6 בדיקות עקיבה אחרי בלון :
37	.....	5.7 מכשירי מדידה :
38	.....	6. תוצאות ומסקנות מביצוע המדידות :
38	.....	6.1 תוצאות מדידת זמן ומהירות נפילה חופשית של בלון :
41	.....	6.2 תוצאות ניסוי מדידת ערכי האמת של תנועת המנועים :
46	.....	6.3 תוצאות ניסוי לבדיקת תקשורת בין המחשב לכרטיס הפיתוח :
47	.....	6.4 תוצאות ניסוי בדיקת מוצא כרטיס הפיתוח, אות ה-PWM :
49	.....	6.5 תוצאות ניסוי לבדיקת מהירות תנועה של המנועים :
51	.....	6.6 תוצאות ניסוי עקיבה אחרי בלון בתנועה :
55	.....	7. מסקנות הפרויקט :
55	.....	7.1 עיבוד התמונה :
55	.....	7.2 מערכת הנעה – מנועי סרבו :
55	.....	7.3 מערכת היירוט - לייזר :
56	.....	7.4 שימוש בכרטיס Altera :
57	.....	8. סיכום :
57	.....	8.1 כללי :
57	.....	8.2 אילוצים :

57	דרכים לשיפור המערכת :	8.3
58	השוואה בין מערכות :	8.4
59	<b>רשימות :</b>	<b>9</b>
59	סימונים וקיצורים :	9.1
59	רשימת נוסחאות :	9.2
60	רשימת טבלאות :	9.3
61	רשימת איורים :	9.4
62	<b>נספחים :</b>	<b>10</b>
62	תקציב הפרויקט :	10.1
62	אופציות רכש לרכיבים (בשלב הפיתוח) :	10.2
63	רכיבים נדרשים - דרישות טכניות - שינויים מאפיון ראשוני :	10.3
63	אבני דרך לביצוע פרויקט גמר :	10.4
64	רשימת רכיבים :	10.5
65	חיבור של כבל תקשורת RS-232 לכרטיס Altera :	10.6
66	חיבורים בין כרטיס ה-Altera למעגל המולחם של המערכת :	10.7
68	דף נתונים טכניים – מנועי סרבו :	10.8
69	דף נתונים Shifter CD4504BE :	10.9
70	דף נתונים ספק כח LRS-75-12 :	10.10
71	דף נתונים של רכיב MP1484 :	10.11
72	קוד הפרויקט - Matlab :	10.12
75	קוד הפרויקט - Altera :	10.13
80	<b>מקורות ספרותיים :</b>	<b>11</b>
80	מקורות :	11.1
80	קישורים ברשת :	11.2

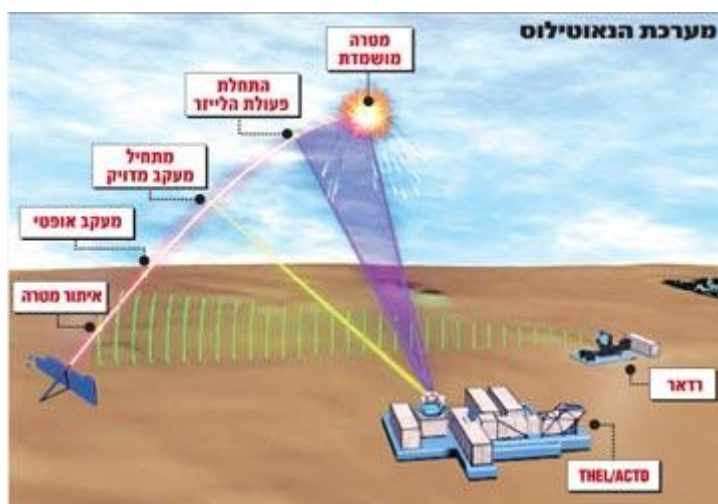
## 1. מבוא:

### 1.1. פתיחה:

מתחילת הלוחמה המודרנית חיפשו צבאות העולם דרך להתגונן מפני התקפות ארטילריות וירי רקטות/ טילים של האויב, כאשר באופן מסורתי דרך ההתגוננות היחידה הייתה באמצעות מיגון ושריון. בשנים האחרונות ניתן לראות מגמת מעבר מהגנה פסיבית להגנה אקטיבית. לאחרונה פותחו מספר מערכות הגנה אקטיביות נגד רקטות אשר בראשם עומדת מערכת "כיפת ברזל". למערכת זו יש 2 חסרונות מרכזיים: עלות גבוהה של טיל היירוט אל מול עלות נמוכה מאוד של רקטות אויב (כ-150,000 דולר לטיל מיירט) וזמן השמדת מטרה ארוך עקב זמן המעוף של טיל היירוט. לצורך מענה על 2 הבעיות הנ"ל ניתן להשתמש במערכת יירוט מבוססת לייזר. יתרונות הלייזר העיקריים הם: עלות נמוכה לביצוע ירי באמצעות לייזר, לא נדרשת טעינה מחדש וזמן הפגיעה במטרה קצר ביותר. בשנים האחרונות נעשו מספר ניסיונות לפיתוח מערכות הגנה אקטיביות מבוססות לייזר כאשר בשנת 1996 הושק פרויקט ה"נאוטילוס" אשר בוצע בשיתוף בין ישראל וארה"ב, בשנת 2007 הפרויקט בוטל.



איור 1 - מערכת "נאוטילוס"<sup>2</sup>



איור 2 - פעולת מערכת "נאוטילוס"<sup>3</sup>

<sup>1</sup> מתוך הערך "כיפת ברזל" בוויקיפדיה.

<sup>2</sup> מתוך [www.makorrishon.co.il](http://www.makorrishon.co.il)

<sup>3</sup> התמונה לקוחה מ-[www.WordPress.com](http://www.WordPress.com)

## 1.2. התפתחות הלייזרים<sup>4</sup>:

בשנת 1859 הוצגה על ידי קירכהוף בעיה: כיצד העוצמה של קרינה אלקטרומגנטית הנפלטת מגוף שחור תלויה בתדירות הקרינה וטמפרטורת הגוף? ניסיון לענות על השאלה הוביל לבסוף להתפתחות הלייזר.

את תחילת דרכו של הלייזר ניתן לייחס למקס קרל ארנסט לודוויג פלאנק (1858-1947), פיזיקאי גרמני שנחשב כאבי המכניקה הקוונטית. בשנת 1894 החל פלאנק לעסוק בקרינת גוף שחור בעזרת מימון מחברת חשמל במטרה לגלות כיצד ניתן לייעל ולצמצם צריכת אנרגיה במנורות.

לאחר 5 שנים, בשנת 1899 פלאנק ניסח את הגרסה הראשונית לחוק (שבעתיד ייקרא על שמו) שמסביר את ספקטרום הקרינה הנפלטת מגוף שחור עבור אורכי גל שונים. בשנת 1900 הציג פלאנק את עבודתו שפתרה את בעיית ה"קטסטרופה של ה-על סגולי" (על פי התיאוריה הקלאסית גוף שחור פולט קרינה שהולכת וגדלה ככל שאורך הגל של הקרינה קטן- תדר הקרינה גדל, כך שעל פי התיאוריה הקלאסית גוף שחור פולט קרינה אינסופית בתדרים גבוהים).

פלאנק הראה שהבעיה נפתרת אם מניחים שהאנרגיה האפשרית היא אנרגיה ברמות בדידות – קוואנטה.

בנוסף פלאנק הסיק שקיים יחס בין אנרגיה ותדר קרינה, משמעות הדבר כי אנרגיה יכולה להיקלט ולהיפלט בחלקיקים מאוד קטנים בשם קוואנטה.

בשנת 1918 זכה פלאנק בפרס נובל לפיזיקה על גילוי של קוונט האנרגיה. עבודתו של פלאנק הייתה נקודת מפנה בפיזיקה וב-1905 פיזיקאי אחר, אלברט איינשטיין, פרסם מאמר על האפקט הפוטואלקטרי שבו הציע כי אור גם מעביר אנרגיה בחלקיקים מאוד קטנים וקרא להם פוטונים.

בשנת 1917 איינשטיין העלה תיאוריה בה אמר כי חוץ מלפלוט ולקלוט אור בצורה ספונטנית, ניתן לעורר אלקטרונים כך שיפלטו פוטון באורך גל מסוים.

בשנת 1954 יצר צ'ארלס האוורד טאונס, בהסתמך על התיאוריה של איינשטיין, את המייזר (Maser – Microwave Amplification by Simulated Emission of Radiation)

המייצר קרינה קוהרנטית בתחום תדרי המיקרוגל ובשנת 1958 הראה בעבודתו כי עיקרון המייזר ניתן להפעלה להגברת קרינה מכוונת גם בתחום הספקטרום הנראה ובתחום התת-אדום.

במאי 1960 המהנדס ופיזיקאי תאודור הרולד מיינמן יצר את הלייזר (Laser – Light Amplification by Simulated Emission of Radiation) הראשון המבוסס על אבן אודם וכסף לצורך רפלקטיביות.

בדצמבר 1960 הוצג לראשונה לייזר הליום ניאון (HeNe Laser), זהו הלייזר הראשון שהציג אלומת אור רציפה.

בדצמבר 1961 כבר נעשה שימוש ראשוני בלייזר לצרכים רפואיים כאשר דר. צ'ארלס קמבל השתמש בלייזר אבן אודם על מנת להרוס גידול רשתי.

בשנת 1962 פותח לייזר הגליום ארסניד (GeAs), זהו לייזר מבוסס מוליך למחצה שהמיר אנרגיה חשמלית ישירות לאור אינפרה אדום – אך מחייב קירור. מאוחר יותר באותה שנה פותח לייזר הגליום-ארסניד-פוספייד – הלייזר דיודה, לייזר קומפקטי, יעיל ומספק אור קוהרנטי. לייזר זה מהווה בסיס ללדים האדומים הנמצאים בשוק כיום.

במשך השנים טכנולוגיות מבוססות לייזר התפתחו לתחומים שונים כגון: רפואה (כלי כירורגי, גלאים), תקשורת (העברת מידע באמצעות לייזרים, סיבים אופטיים), תעשיות (תעשיית הרכב בארה"ב, אקדחי לייזר במרכולים לקריאת ברקודים), אנרגיה (העברת אנרגיה באמצעות לייזר), חקר החלל ושימושים צבאיים (כוונת לייזר, מערכות יירוט טילים).

עוד בזמן שהלייזר היה בגדר תיאוריה צבא ארצות הברית התעניין והשקיע משאבים רבים על מנת לפתח אותו ליישומים צבאיים.

<sup>4</sup> כלל הנתונים בסעיף זה מתוך אתר האינטרנט photonics ואתר האינטרנט scienceclarified כפי שמופיע בסעיף מקורות ספרותיים

עם התובנה כי לייזרים רבי עוצמה דורשים הספקים גדולים ואינם מספיק קומפקטיים על מנת לחמש חיילים או לשאתם על מטוסי קרב, חיפשו דרכים לשימוש בלייזר לצורך יירוט של מטוסים ולוויינים ממערכות יירוט נייחות.

בשנת 1973 צבא ארה"ב ערך ניסוי בו יירטו מטוס ללא טייס, הניסוי הצליח אולם המערכת לא נחשבה מוצלחת מאחר והמטוס לא זז במהירות של מטוסי אויב ועלות המערכת הייתה יקרה (כ-10 מיליון דולר, לשם השוואה, מחיר טנק עלה 1 מיליון דולר). למרות זאת, חקר היישומים הצבאיים של מערכות לייזר נמשך.

ההשקעה בפיתוח אמצעי לחימה מבוססים לייזר בכל זאת הניבה פירות, השימוש בלייזר שיפר משמעותית את דיוקם שם נשקים קונבנציונליים, החל ממערכות מכ"ם, מודדי מרחק ועד לסימון מטרות להפצצה ממרחק.

יישום צבאי נוסף בא לידי ביטוי בסימולציית קרבות, הרכבת לייזרים וחיישנים מתאימים לחיילים, רכבים ואף מטוסים אפשר לבצע סימולציית קרבות, צבא-מול-צבא ולא מול מטרות נייחות.

טרם השימוש בלייזר, צוללות עשו שימוש בגלי רדיו על מנת להעביר תשדורות, השימוש בגלי רדיו מכיל שני חסרונות עיקריים, גלי רדיו אינם עוברים דרך מים בצורה טובה כך שנדרשות אנטנות גדולות על מנת להעביר תשדורת. חיסרון נוסף ובולט – ישנו סיכון כי ספינת אויב תקלוט את השידור ובכך תחשוף את מיקום הצוללת.

תקשורת צוללות באמצעות לייזר עושה שימוש במונוכרומטיות של הלייזר דבר המאפשר לשידור לעבור דרך מים בצורה מיטבית, והשידור עצמו נעשה ישירות ללוויין.



## **2. מטרת הפרויקט:**

### **2.1. כללי:**

תכנון ובניית מערכת המדמה את פעולת מערכת "כיפת ברזל" המבצעת יירוט באמצעות לייזר להשמדת המטרה.  
תכנון ובניית מערכת בעלת יכולת זיהוי של עצם (בלון) במרחב הצפייה של המצלמה.  
תכנון ובניית מערכת הכוונה של לייזר בשני צירי תנועה לעבר בלון המטרה.  
ביצוע ירי לייזר על הבלון והשמדתו טרם יציאתו ממרחב הזיהוי של המצלמה.  
הצלחה בפרויקט היא היכולת לפוצץ בלון אדום הנמצא בתנועה במרחב הפעולה של המערכת.

### **2.2. תנאי התכנון:**

- 2.2.1. עיבוד התמונה יבוצע באמצעות מחשב אישי ותוכנת Matlab.
- 2.2.2. בעת זיהוי מטרה במרחב, יופעל חיווי קולי וויזואלי (סירנה ואור אדום), אלומת הלייזר תכוון למטרה באמצעות מנועי Servo הנשלטים בעזרת לוח פיתוח DE2-115 של חברת Altera הניתן לתכנות בשפת VHDL.
- 2.2.3. ביצוע לזירה יתאפשר רק לאחר לחיצה על כפתור הירי.

### **2.3. דרישות המערכת:**

#### **2.3.1. דרישות טכניות:**

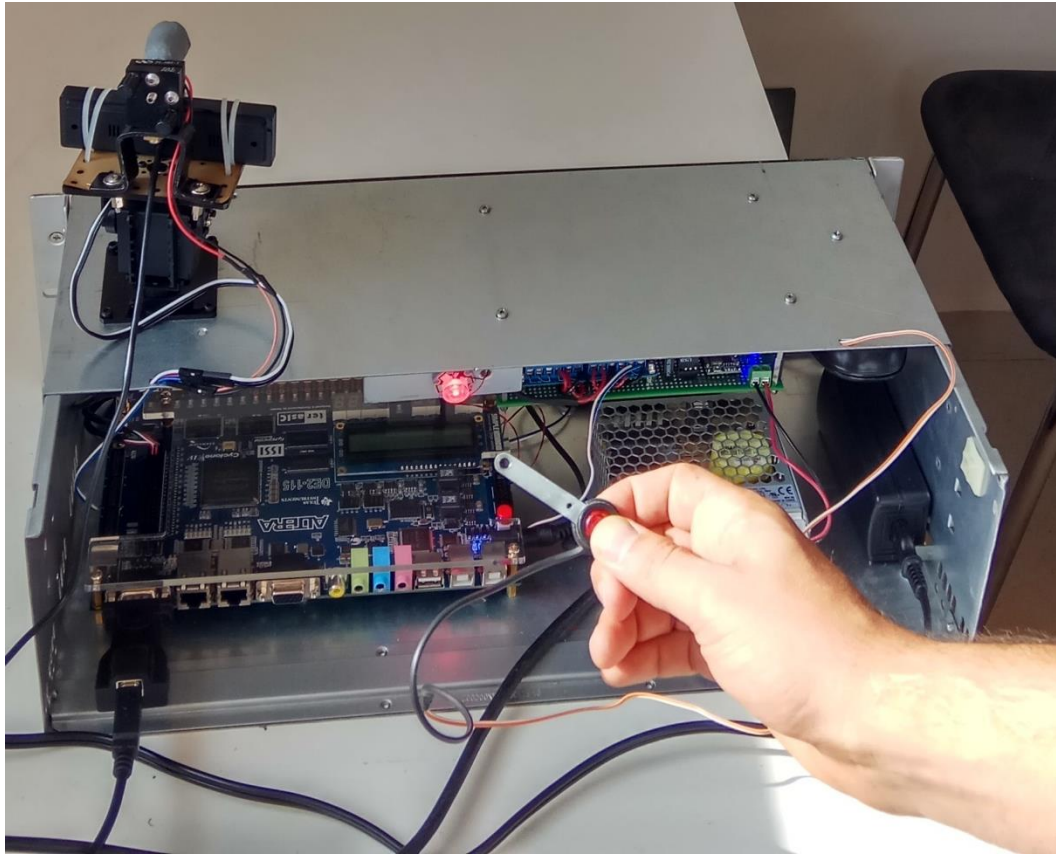
- המערכת צריכה לזהות בלון בטווח של מטר וחצי עד 5 מטרים וברוחב של 2.5 מטרים לכל כיוון, בחדר בעל רקע לבן.
  - המערכת צריכה לבצע הכוונה של לייזר לעבר הבלון.
  - המערכת צריכה לפוצץ את בלון המטרה.
- #### **2.3.2. דרישות בטיחות:**
- חיווי קולי וויזואלי בעת זיהוי מטרה.
  - ירי הלייזר אל עבר המטרה יתאפשר אך ורק לאחר זיהוי המטרה (על ידי המערכת) ולחיצה על כפתור הירי (על ידי המשתמש).

## **3. תיאור המערכת:**

### **3.1. כללי:**

המערכת מכילה 4 תתי מערכות עיקריות:

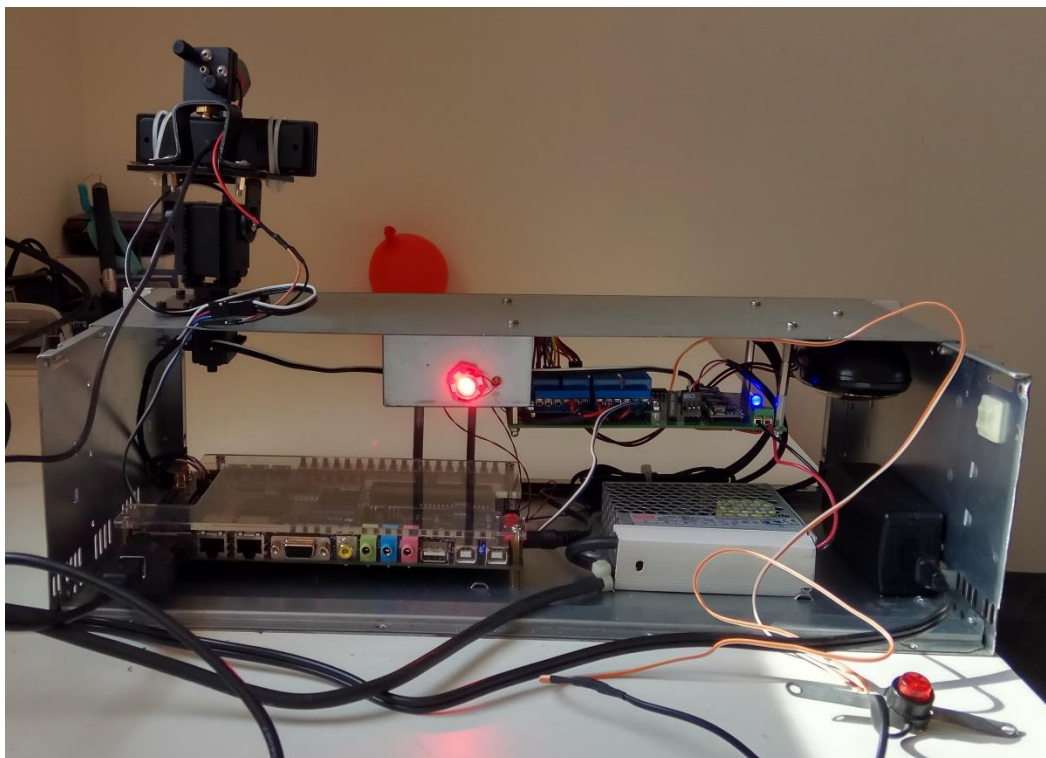
- 3.1.1. מחשב שבו מתבצע עיבוד התמונה בעזרת תוכנת Matlab.
- 3.1.2. כרטיס פיתוח של חברת Altera שמקבל מידע מהמחשב ומספק אות למערכת ההכוונה.
- 3.1.3. מערכת הכוונה הכוללת 2 מנועי סרבו, אשר עליהם מורכבת מצלמה ולייזר.
- 3.1.4. מערכת חיווי והתראה הכוללת חיווי קולי, חיווי וויזואלי וכפתור ירי.



איור 3 - תמונה של גב המערכת - 1



איור 4 - תמונה של חזית המערכת



איור 5 - תמונה של גב המערכת - 2

### 3.2. תכנון החומרה:

בשלב הראשוני נדרש למצוא רכיבי חומרה העומדים בדרישות המערכת.

#### 3.2.1. מצלמה:

לצורך קביעת הרזולוציה הנדרשת, בוצע קירוב של צורת הבלון לצורת כדור. כמו כן בוצעה הנחה לצורך החישובים, שקוטרו של בלון סטנדרטי הוא 20 ס"מ.

$$S_{balloon} = \pi r^2 \cong 315 [cm^2] : \text{כך ששטח ההיטל שלו הוא:}$$

שטחו של כל פיקסל משתנה בהתאם למרחק מהמצלמה ע"פ הנוסחה:

נוסחה 1 - חישוב שטח של פיקסל כתלות ברזולוציה ומרחק

$$x = 2 \cdot L \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad y = 2 \cdot L \cdot \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right)$$

$$S_{pixel} = \frac{x}{n} \cdot \frac{y}{m} = \frac{4L^2}{n \cdot m} \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) [m^2]$$

כאשר  $L$  הוא המרחק מהמצלמה,  $x$  הוא האורך המתקבל בהתאם לזווית הראייה האופקית- $\theta$ ,  $y$  הוא האורך המתקבל בהתאם לזווית הראייה האנכית- $\varphi$ ,  $n$  היא הרזולוציה האופקית, ו- $m$  היא הרזולוציה האנכית.

בהנחה שהמצלמה בעלת זווית ראייה אופקית של 120 מעלות וזווית ראייה אנכית של 70 מעלות, מתקבל:

$$S_{pixel} = \frac{x}{n} \cdot \frac{y}{m} = \frac{4L^2}{n \cdot m} \cdot \tan\left(\frac{120}{2}\right) \cdot \tan\left(\frac{70}{2}\right) = 4.851 \cdot \frac{L^2}{n \cdot m} [m^2] = 48511 \cdot \frac{L^2[m]}{n \cdot m} [cm^2]$$

עבור רזולוציה של  $768 \times 1024$  מתקבל:

$$S_{pixel} = 48511 \cdot \frac{1.5^2}{1024 \cdot 768} = 0.138 [cm^2] : \text{במרחק של 1.5 מטר}$$

$$S_{pixel} = 48511 \cdot \frac{5^2}{1024 \cdot 768} = 1.542 [cm^2] : \text{במרחק של 5 מטר}$$

עבור רזולוציה של  $480 \times 640$  מתקבל:

$$S_{pixel} = 48511 \cdot \frac{1.5^2}{640 \cdot 480} = 0.355 [cm^2] : \text{במרחק של 1.5 מטר}$$

$$S_{pixel} = 48511 \cdot \frac{5^2}{640 \cdot 480} = 3.947 [cm^2] : \text{במרחק של 5 מטר}$$

כעת שטחו של בלון הוא 315 סמ"ר, כך שניתן לחשב את כמות הפיקסלים שמרכיבים את שטחו בעזרת הנוסחה הבאה:

נוסחה 2 - חישוב כמות פיקסלים בתא שטח

$$S_{balloon} = S_{pixel} \cdot N \Rightarrow N = \frac{S_{balloon}}{S_{pixel}}$$

עבור רזולוציה של 768\*1024 מתקבל:

$$N_{1.5m} = \frac{S_{balloon}}{S_{pixel}} = \frac{315 [cm^2]}{0.138 [cm^2]} \cong 2283 [pixels]$$

$$N_{5m} = \frac{S_{balloon}}{S_{pixel}} = \frac{315 [cm^2]}{1.542 [cm^2]} \cong 204 [pixels]$$

ועבור רזולוציה של 480\*640 מתקבל:

$$N_{1.5m} = \frac{S_{balloon}}{S_{pixel}} = \frac{315 [cm^2]}{0.355 [cm^2]} \cong 888 [pixels]$$

$$N_{5m} = \frac{S_{balloon}}{S_{pixel}} = \frac{315 [cm^2]}{3.947 [cm^2]} \cong 80 [pixels]$$

בהתאם לרזולוציית המצלמה נקבעת רגישות ניקוי התמונה.

לטובת יכולת הבחנה במרחב הנדרש לצפייה וברזולוציה בה ניתן לזהות בלון במרחק המקסימלי המוגדר, נדרשת מצלמה בעלת זווית ראייה רחבה של 120 מעלות ואיכות של 768\*1024 פיקסלים. המצלמה שנרכשה לבסוף היא מצלמת וועידה של חברת Genius בעלת איכות צילום של 1080p Full HD וזווית צילום ברוחב 120 Deg.

### 3.2.2. מנועים:

ישנם שני סוגים עיקריים של מנועים המסוגלים לבצע תנועה עדינה, מנועי Servo ומנועי Stepper. במנועי Stepper (מנועי צעדים), המשתמש שולח אות חשמלי חיובי/ שלילי והמנוע זז בהתאם צעד אחד עם או נגד כיוון השעון (גודל הצעד נמדד במעלות ומשתנה ממנוע למנוע), כאשר המנוע יכול לבצע סיבובים מלאים ללא הגבלה. במנועי Servo (אנלוגיים) לעומת זאת, מיקום המנוע נקבע באמצעות אות חשמלי מסוג PWM (Pulse Width Modulation) - בעל אמפליטודה קבועה ותדר קבוע כאשר ה-Duty Cycle קובע את המיקום הרצוי למנוע, מנועים אלו לרוב לא יכולים לבצע סיבובים שלמים אלא רק תנועה בטווח של 90-270 מעלות. היתרון הגדול של מנוע הצעדים (על פני מנוע סרבו) הוא הדיוק. אולם חסרונותיו הם שאין אפשרות (פשוטה מבחינה מכאנית) להרכיב שני מנועים זה על זה על מנת לקבל מערכת בעלת יכולת תנועה בשני צירים - מערכת Pan-Tilt. בנוסף למנוע צעדים אין מערכת משוב פנימית, כך שיש לאפס אותו בכל הפעלה, דבר המחייב לבנות מערכת נוספת כדי לקבל מידע על מיקום המנוע בכל רגע ורגע. מנועי Servo לעומת זאת, בנויים באופן ייעודי לאפשרות של חיבור מנועים זה לזה בכמה צירי תנועה. יתרון משמעותי נוסף של מנועי ה-Servo הוא שהם מכילים רכיב בקרה (Encoder) שתפקידו למשב את תנועת המנוע. בנוסף לכך, כלל מערכות Pan-Tilt הקיימות בשוק ללא יוצא מן הכלל מבוססות מנועי Servo. סוג נוסף של מנועי סרבו הוא מנועי סרבו דיגיטליים, יתרונם הגדול הוא הדיוק הגבוה שניתן להשיג בהשוואה למנועי סרבו אנלוגיים, חסרונם העיקרי (שבגינו לא נעשה בהם שימוש בפרויקט זה) הוא מחירם הגבוה (לפחות כפול ממנוע סרבו אנלוגי).

התקשורת למנועים אלו מתבצעת באופן דיגיטלי, על ידי שליחת הוראה בקוד הקסדצימלי למנוע.

לאחר לקיחת מכלול השיקולים ואילוצי התקציב בחשבון, הוחלט לעבוד עם מנועי סרבו אנלוגיים.

בבחירת מנועי הסרבו התעוררה בעיה, רוב מוחלט של יצרני מנועי ה-Servo האנלוגיים אינם מפרסמים את הדיוק של המנועים, והמנועים הדיגיטליים (אשר היצרן מתחייב לדיוקם), יקרים מדי לרכישה לצורך שימוש בפרויקט. בנוסף נדרשת מערכת בעלת יכולת תנועה בשני צירים כך שיש להרכיב את המנועים זה על זה.

המנועים נדרשים למהירות סיבוב תחת עומס של 30 RPM ודיוק של 0.9 Deg (הסבר מפורט תחת ניסויים ובדיקות).

לאחר לקיחת שיקולי תקציב, מהירות תנועה ודיוק נבחרה מערכת Pan-Tilt של חברת RobotGeek שהפרמטרים המצוינים לגביה קרובים לדרישות המערכת אך עדיין קיים סימן שאלה בנוגע לדיוק המנועים.

### 3.2.3. תיאום מתחים וזרמים בין רכיבי המערכת השונים:

מאחר וכל תת מערכת מופעלת עם מתחים וזרמים שונים יש לספק תשתית מתאימה לכל רכיב ותת מערכת.

כרטיס ה-Altera ממתג ממסר 4 יציאות (Quad Relay) שמפעיל את החיווי הוויזואלי, את החיווי הקולי, את הלייזר ואת שני מנועי ה-Servo. יציאות הכרטיס מספקות מתח של 3.3 וולט, אולם הרכיבים לעיל עובדים במתחים שונים כמפורט להלן:

מנועי Servo - מתח כניסה של 6 וולט, זרם של 1.6 אמפר ואות PWM של 6 וולט וזרם של מיקרו אמפרים.

חיווי קולי – מתח כניסה של 3 וולט עם זרם של 0.2 אמפר.

חיווי וויזואלי - מתח כניסה של 6 וולט עם זרם של 0.1 אמפר.

לייזר - מתח כניסה של 6 וולט וזרם של 20 מילי-אמפר.

ממסר – מיתוג של 6 וולט וזרם של מיקרו אמפרים.

המענה לתיאום בין מתח אותות היציאה של כרטיס הפיתוח לבין מתח ההפעלה של הרכיבים השונים יתבצע בעזרת רכיב CD4504BE Shifter, המשמש לתיאום מתחים דיגיטליים וניתן להעביר דרכו ללא עיוות את PWM. המענה לבעיית מתחי ההזנה יתבצע בעזרת רכיב DC-DC Adjustable Converter, זהו רכיב זול (כ-1 דולר ליחידה) ופשוט להרכבה ושימוש שמטרתו להוריד מתח DC בזרמים של עד 1.8 אמפר.

### 3.3. תכנון התוכנה :

במהלך תכנון העבודה על המערכת הוחלט שכל אחד מבני הזוג יעבוד על מערכת בשפת תכנות אחת (Matlab או VHDL) ובן הזוג השני יבצע את הבדיקה של הקוד. בנוסף נקבע כי התקשורת בין המחשב ללוח הפיתוח תהיה בהתאם לפרוטוקול RS-232.

#### 3.3.1. כתיבת קוד ב-Matlab לעיבוד תמונה - זיהוי "בלון" :

היה צורך להגדיר באופן מדויק מהו בלון כך שהמחשב יוכל לזהות אותו, לאחר בדיקה נמצא כי הפונקציות השונות הקיימות לזיהוי עצמים/ פנים בתוכנת Matlab משתמשים בטכניקות אשר המשותף להם הוא מציאת נקודות עניין (פיצורים) הניתנות להגדרה באופן מתמטי בתמונה וביצוע השוואה אל מול מאגר נתונים קיים, לאחר מכן מתבצעת עקיבה אחרי העצם שזוהה. בשיטה זו היו מספר בעיות :

- לצורך מציאת האובייקט יש צורך בביצוע פעולות מתמטיות מורכבות על התמונה, כאשר גודל התמונה (כמות הפיקסלים) משפיעה באופן מעריכי על זמן העיבוד, כאשר המערכת נדרשת לעבוד ברזולוציה של  $640 \times 480$  פיקסלים בלבד זמן הזיהוי הראשוני היה כ-4 שניות.
- הטכניקות זיהוי השונות לא הצליחו למצוא כמות מספקת של נקודות עניין בבלון עקב האחידות שלו בצבע ובטקסטורה. (נמצאו כ-700 נקודות עניין בכל פריים כאשר פחות מ-10 היו על הבלון), כאשר זיהוי ומעקב אחר גופים אחרים התבצעו ללא בעיות מיוחדות, תוך זיהוי מאות נקודות עניין בכל חפץ. למעשה שיטות אלו נמצאו כלא יעילות לזיהוי בלון.

השיטה שפותחה לבסוף היא טכניקה לזיהוי צבע. השיטה מתבססת על כך שתמונה צבעונית מתקבלת בשלוש מטריצות בצבעי RGB (Red, Green, Blue). כאשר ניתן לבצע על המטריצות פעולות בסיסיות של מיצוע לקבלת תמונה בגווני אפור. לאחר מכן ניתן לבצע חיסור בין מטריצת ה-R לבין מטריצת (תמונת) גווני האפור שהתקבלה. באופן זה מקבלת מטריצה חדשה אשר הערכי הפיקסלים שלה באזורים שהיה בהם צבע אדום גבוהים משמעותית משאר ערכי המטריצה, את המטריצה המתקבלת ניתן להפוך לתמונה בינארית אשר מכילה מיקומי צבע אדום בלבד. כך למעשה ניתן לקבל באופן יעיל וללא שימוש באלגוריתמים מסורבלים ואיטיים את ההפרדה של הצבע האדום מכל שאר הגוונים ואת מיקום מרכז המסה של כל "גוש" פיקסלים אדומים בתמונה המקורית.

לבסוף התקבל זמן עיבוד של 0.03-0.05 שניות. בעיה נוספת שעלתה במהלך התכנון של המערכת היא כיצד לבצע תיאום בין המרחב המצולם, למרחב האמיתי בשטח. ככל שהאובייקט המצולם מרוחק ממרכז הפריים עיוות המרחב שנוצר במצלמה גדל.

בנוסף לכך ההמרה של פיקסלים ליחידת מרחק בעולם הממשי משתנה כתלות בצורת החדר, המרחק מהמצלמה מיקום האובייקט ואלמנטים נוספים. הפתרון לבעיה בוצע באופן חומרתי על ידי הרכבת המצלמה על גבי המנועים, כך שהמצלמה זזה ביחד עם ציין הלייזר. למעשה זוהי מערכת משוב שבה התמונה הנקלטת מעובדת במחשב שבתורו מבצע הזזה של המצלמה כך שהאובייקט יהיה במרכז הפריים. בנוסף הוכנס ערך סף לביצוע תנועה כך שלא ייווצרו "קפיצות" מיותרות במערכת עקב חוסר דיוק של המערכת ההינע יחסית לתוכנה.

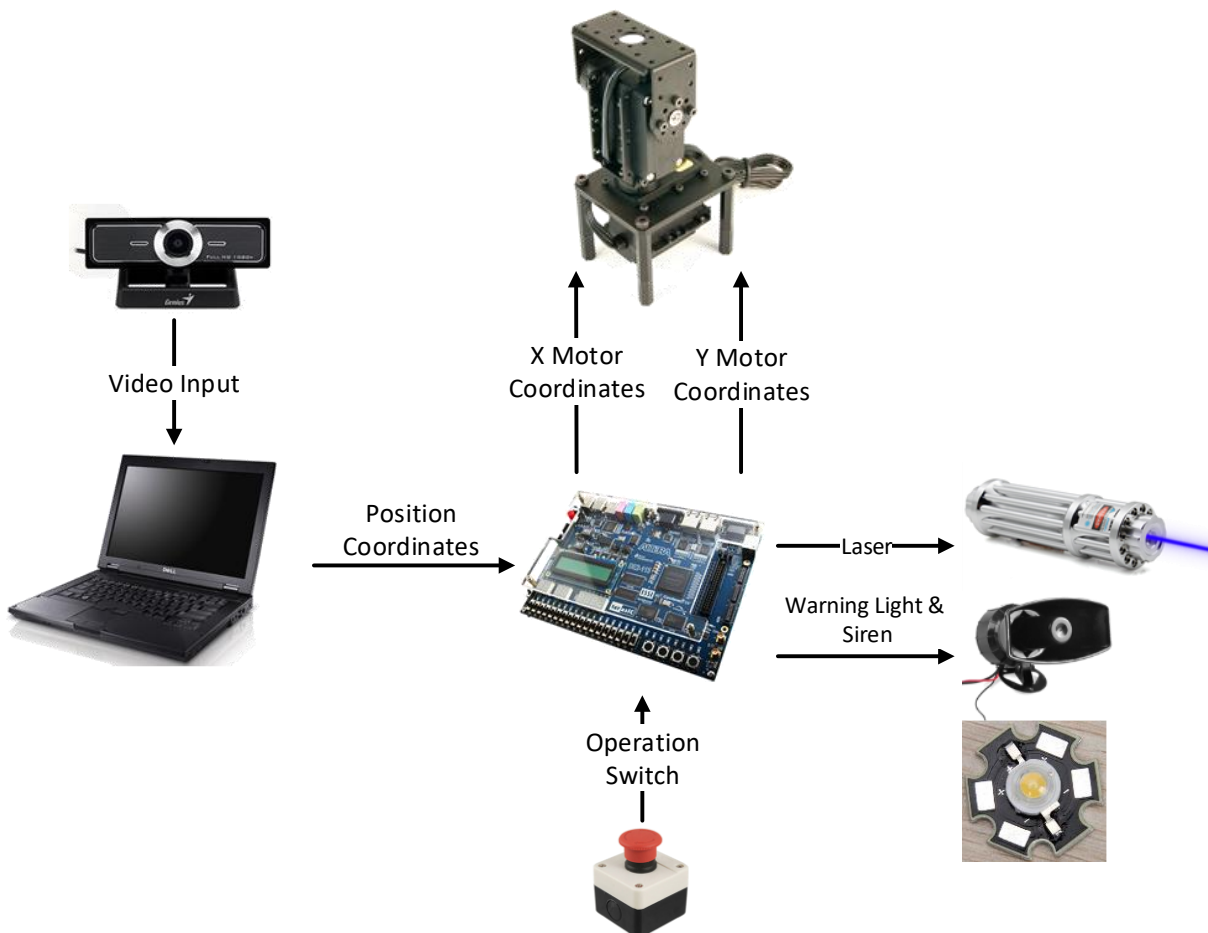
3.3.2. כתיבת קוד ב-VHDL להפעלת מערכת ההינע :  
 נכתב קוד המממש מקלט לקבלת המידע מהמחשב.  
 המידע המתקבל מפוענח (זווית רצויה ומנוע אליו המידע מיועד) ונשלח למחולל  
 אות ה-PWM המתאים.  
 כאשר המידע המתקבל תקין, המערכת מפעילה את המערכות הפריפריאליות  
 ומאפשרת את הלחיצה על כפתור הירי.  
 נכתב קוד הממיר את המידע המתקבל בלוח הפיתוח לערך PWM מתאים כך  
 שהמנוע יזוז לזווית הנדרשת.

3.3.3. פרוטוקול תקשורת בין Matlab וכרטיס Altera :  
 לצורך מימוש פרוטוקול תקשורת נעשה שימוש בפרוטוקול RS-232 בקצב העברת  
 נתונים של 256,000 ביט בשנייה (ראה תרשים חיבור לכרטיס ה-Altera באיור 4.2).  
 החיבור הפיזי מתבצע על ידי כבל USB-TO-UART.  
 נכתבו 2 רכיבים בשפת VHDL מקלט ומשדר, הקולטים ומשדרים נתונים באופן  
 סריאלי ומבצעים "סידור" של המידע במילה בינארית בת 8 ביטים.  
 לאחר בדיקה של הרזולוציה המקסימלית האפשרית למנועים הוחלט להשתמש ב-2  
 הסיביות הנמוכות של המידע הנשלח כדי להבדיל בין מידע המיועד למנוע בציר  
 אופקי או אנכי, וכך לחסוך בתקשורת מיותרת בין המחשב לכרטיס ה-Altera, כך  
 שלא היה צורך ברכיב המשדר לצורך אישור קליטת המידע, ולכן לא נעשה בו  
 שימוש.

#### 4. מימוש המערכת:

##### 4.1. מימוש חומרה:

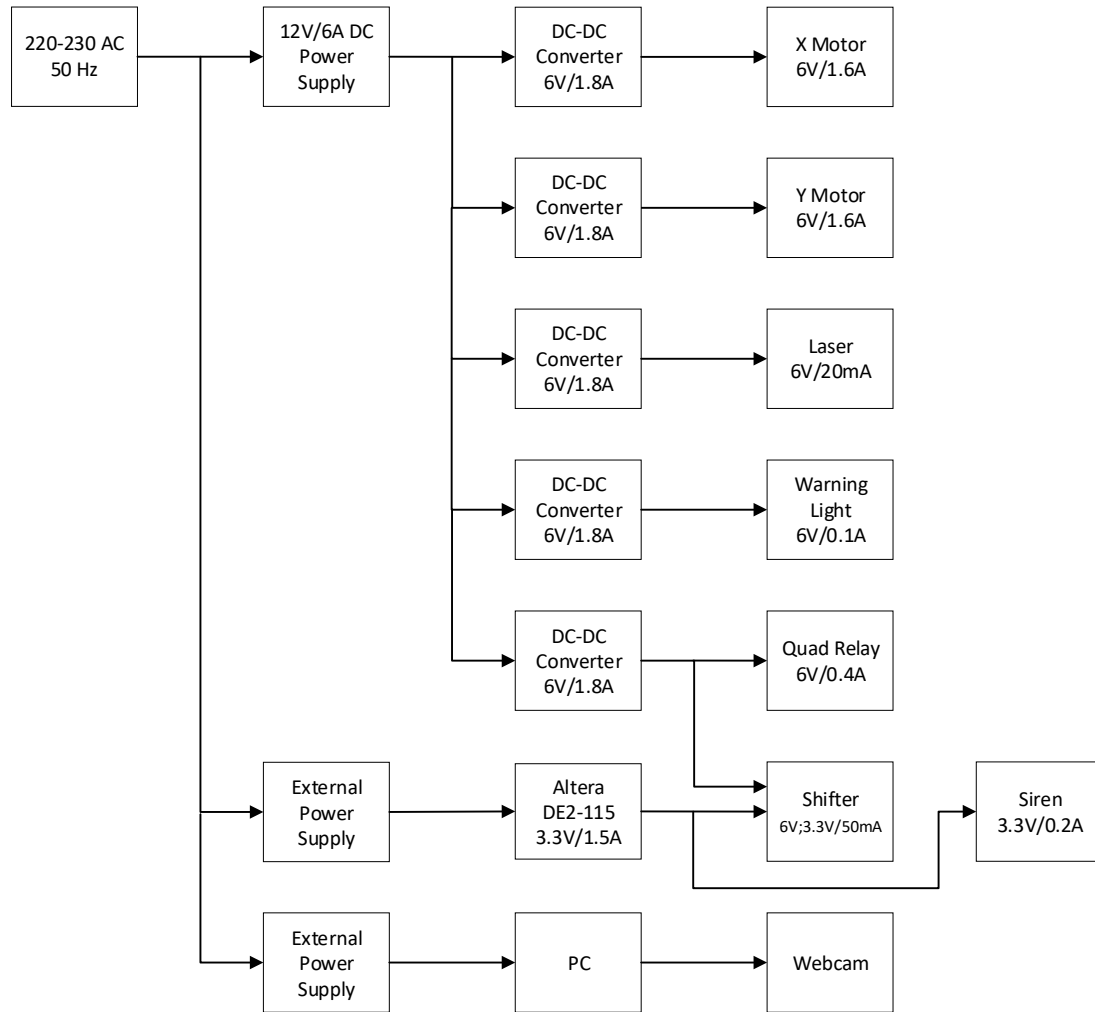
##### 4.1.1. דיאגרמת בלוקים כללית:



איור 6 - דיאגרמת בלוקים של המערכת

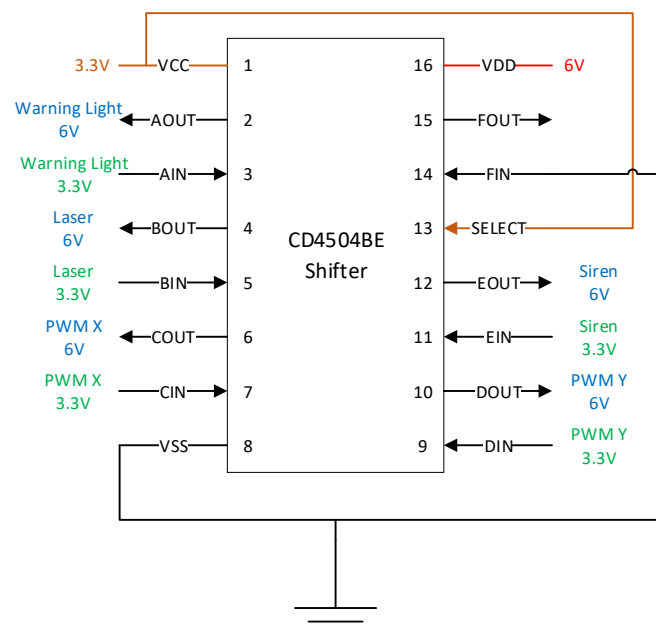


#### 4.1.2. סכמת חיבורים ומתחים חשמלית כללית :



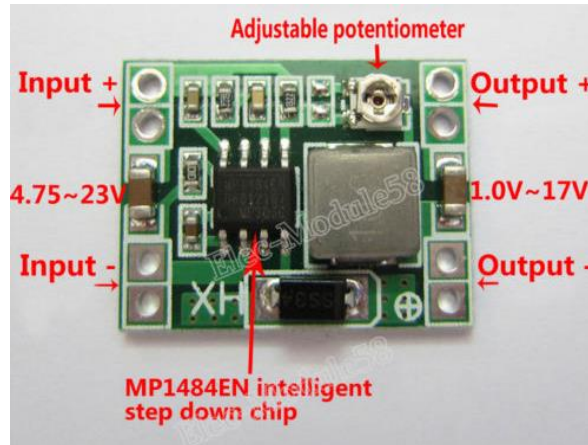
איור 7 - סכמת חיבורים ומתחים כללית

#### 4.1.3. סכמה חשמלית מפורטת – Shifter CD4504BE :



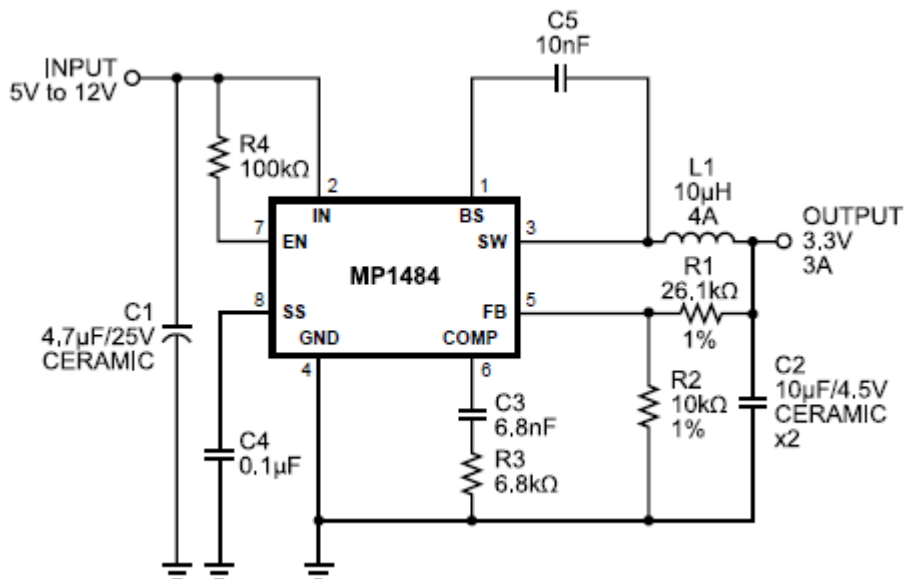
איור 8 - סכמה חשמלית עבור Shifter

#### 4.1.4. סכמה חשמלית כללית - DC-DC Converter :



איור 9 - סכמה חשמלית עבור DC-DC Converter

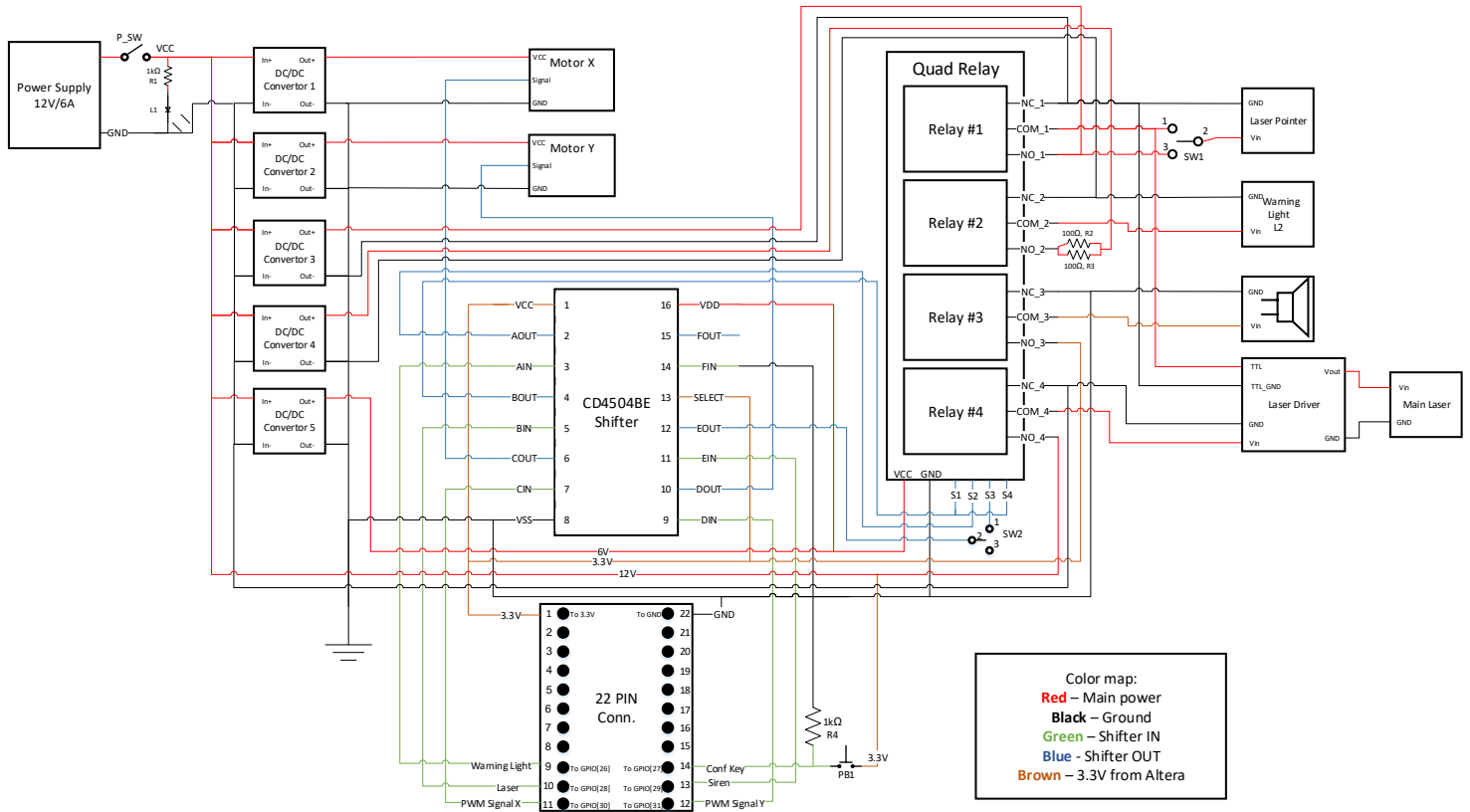
רכיב ה-DC-DC Converter ידוע גם כ-Step Down Converter וייעודו לספק מתח קבוע (הנמוך ממתח המקור) ללא תלות בהתנגדות או בזרם הנצרך על ידי העומס. עיקרון פעולת הרכיב מבוססת על טעינה ופריקה של סליל וקבל על פי מעגל מיתוג (ברכיב הנ"ל המיתוג מתבצע בתדר של  $340[kHz]$ , בעזרת טרנזיסטור MOSFET).



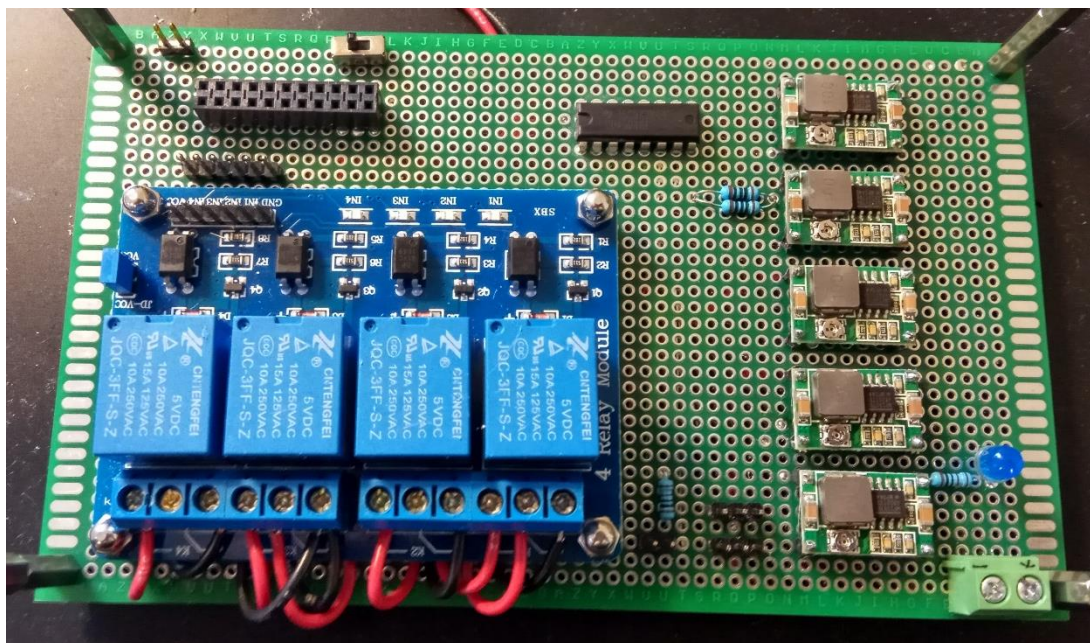
איור 10 - שרטוט חשמלי עקרוני של מעגל המרת מתח DC-DC<sup>5</sup>

<sup>5</sup> מתוך דף הנתונים של הרכיב כפי שמופיע בסעיף קישורים ברשת

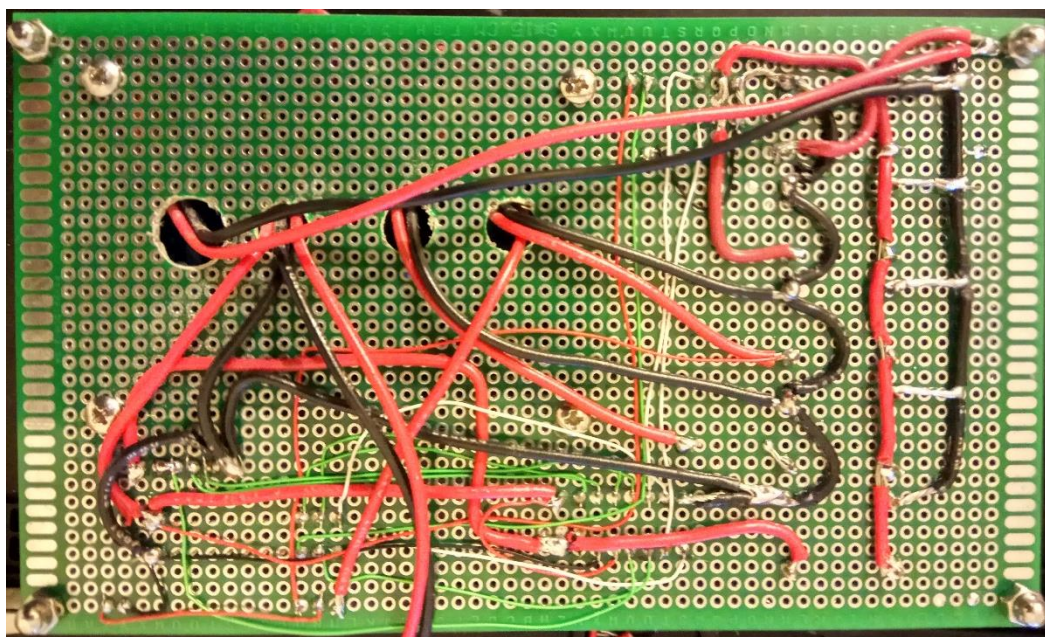
#### 4.1.5. שרטוט חשמלי מפורט של המערכת :



איור 11 - סכמה חשמלית מפורטת של המערכת



איור 12 - לוח מולחם, מבט מלמעלה



איור 13 - לוח מולחם, מבט מלמטה

#### 4.1.6. חישובי רכיבים :

בתכנון המערכת היה צורך לוודא כי ספק הכוח יכול לעמוד בדרישות הרכיבים. על פי החישוב התיאורטי הספק המערכת הכולל המקסימלי הוא :

טבלה 1 - צריכת זרם של המערכת

רכיב	צריכת זרם מקסימלית [A]	כמות	סה"כ [A]
מנוע	1.6	2	3.2
Warning Light (L2)	0.1	1	0.1
Siren	0.2	1	0.2
Laser Pointer	0.02	1	0.02
Main Laser	1.5	1	1.5
Relay	0.1	4	0.4
Shifter	0.01	6	0.06
לד בקרה (L1)	0.01	1	0.01
צריכת זרם כוללת של המערכת [A]			5.49

ספק הכוח שנבחר לפרויקט הוא LRS-75-12 תוצרת MeanWell (ראה סעיף 10.10) בעל הספק של 72 וואט, וזרם של 6A כך שספק הכוח חזק דיו להפעלת המערכת. במדידות שנעשו בפועל (בעזרת מד זרם) הזרם המקסימלי שנצרך על ידי המערכת הכוללת היה 0.75 אמפר (ללא הלייזר העיקרי).

נוסחה 3 - חוק אוהם

$$V = I \cdot R [V]$$

נוסחה 4 - חישוב הספק חשמלי

$$P = V \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{V^2}{R} [W]$$

בהתאם לחוק אוהם, הנגד (R1) ללד הבקרה (L1) על הלוח נקבע לצריכת זרם של  $I = (12 - 1.5) / 1000 = 10.5 [mA]$ , כך שהלד יקבל זרם מתאים לעבודה באור חלש.

הנגדים (R2, R3) המחוברים במקביל של ה-Warning Light (L2) נקבעו לצריכת זרם של  $I = (6 - 1.8) / 50 = 84 [mA]$ , כך שהלד יפעל אך לא יאיר חזק מידי על מנת שלא "ילכלך" את התמונה הנקלטת על ידי המצלמה באמצעות האור אדום (הלד מיועד להספק של עד 3 וואט).

בהתאם לנוסחה 4, ההספק שמתפתח על נגד יחיד של  $50 [\Omega]$  הוא:

$$P = I^2 \cdot R = (84 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 50 = 0.352 [W]$$

בהספק של  $0.25 [W]$  בלבד. לכן בוצע חיבור של שני נגדים של  $100 [\Omega]$  במקביל, כך שהזרם (וההספק) מתחלק, ועל כל נגד נופל הספק של  $P = 0.176 [W]$ .

למפסק אישור הירי (PB1) היה צורך בנגד Pull-Down כך שלא ייווצר מצב בו יש מתח צף שהמערכת יכולה לזהות בטעות כלחיצה.

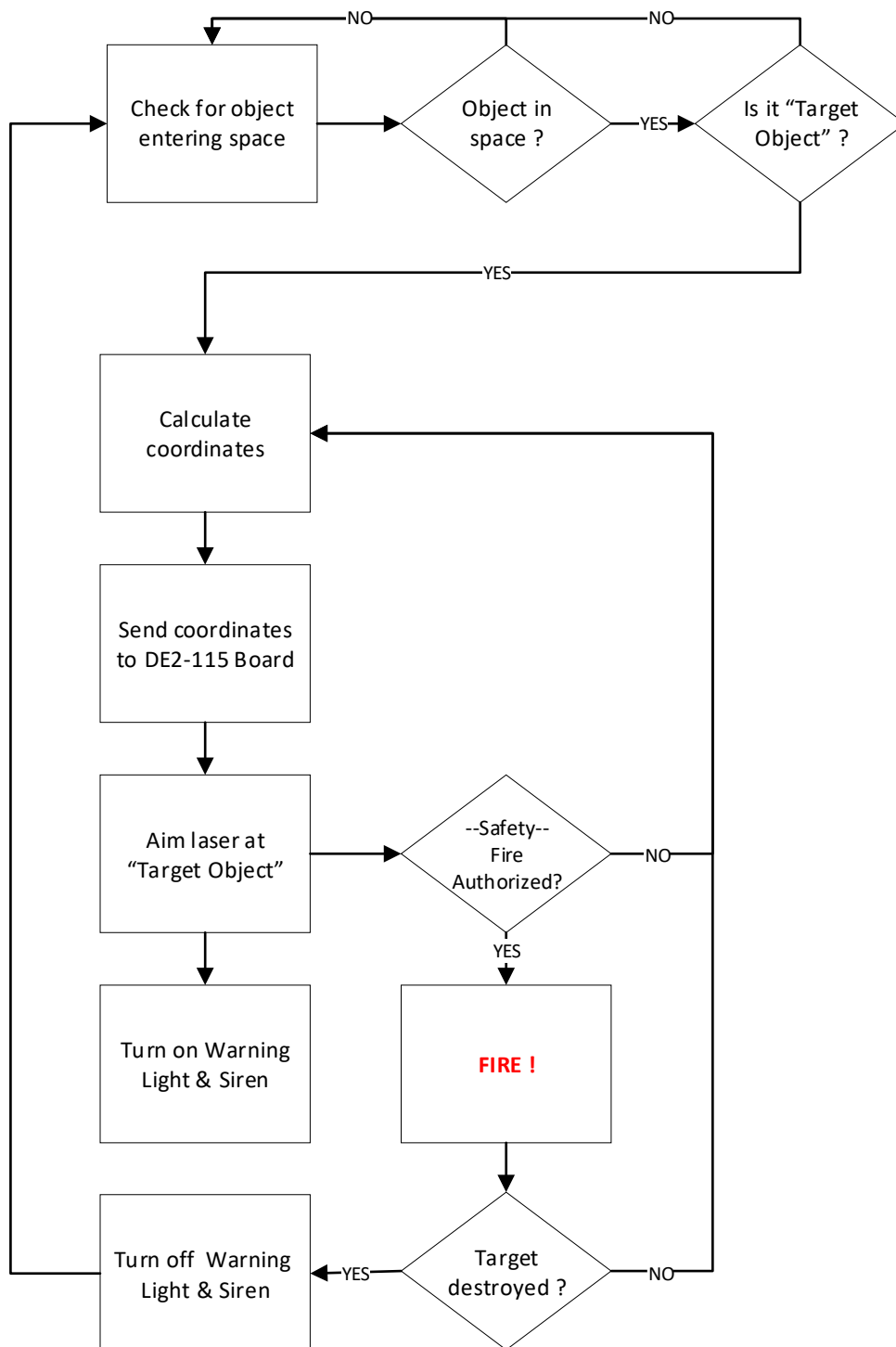
לשם כך חובר נגד (R4) בערך של  $1 [k\Omega]$ , כך שכאשר אין לחיצה על המפסק כרטיס ה-Altera מקבל  $0V$ , וכאשר יש לחיצה הכרטיס מקבל  $3.3V$ , עם צריכת זרם של  $I = 3.3 / 1000 = 3.3 [mA]$ , כך שלא יהיה מצב שעלול להיגרם נזק לכרטיס.

לצורך ביצוע בדיקות כיוול ועקיבה של המערכת הורכב מפסק SW1 שמבצע מעקף להזנת המתח לציין הלייזר, כך שהלייזר יופעל באופן קבוע. כאשר המפסק במצב כבוי ציין הלייזר יידלק רק לאחר זיהוי מטרה ולחיצה על כפתור הירי.

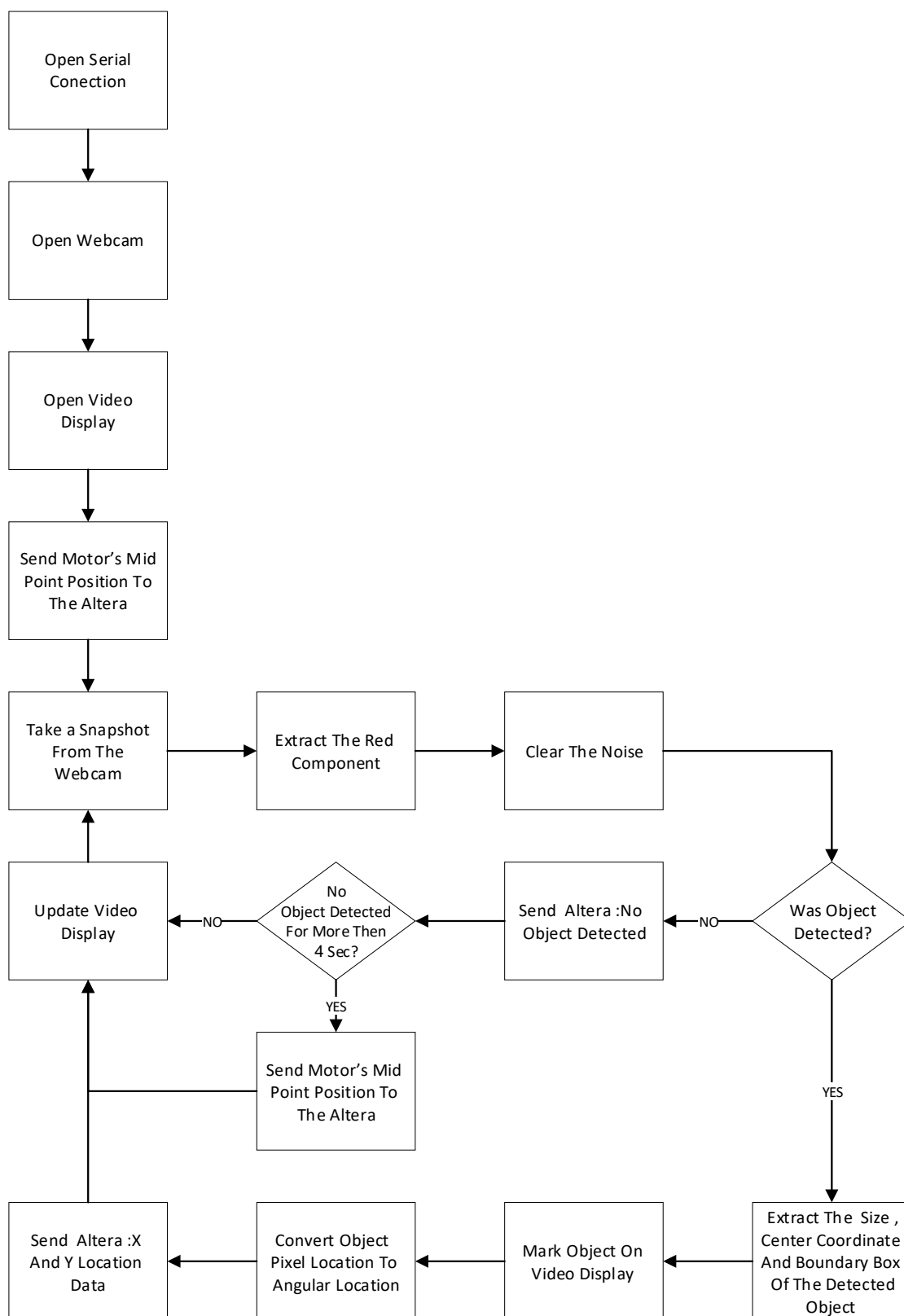
כדי שיהיה ניתן לבצע בדיקות ללא סירנה מחרישת אוזניים בכל פעם שמתבצע זיהוי על ידי המערכת, הורכב מפסק SW2 שמנתק את אות המיתוג של הממסר שמפעיל את הסירנה.

#### 4.2. מימוש תוכנה :

##### 4.2.1. תרשימי זרימה לוגי כולל של המערכת :



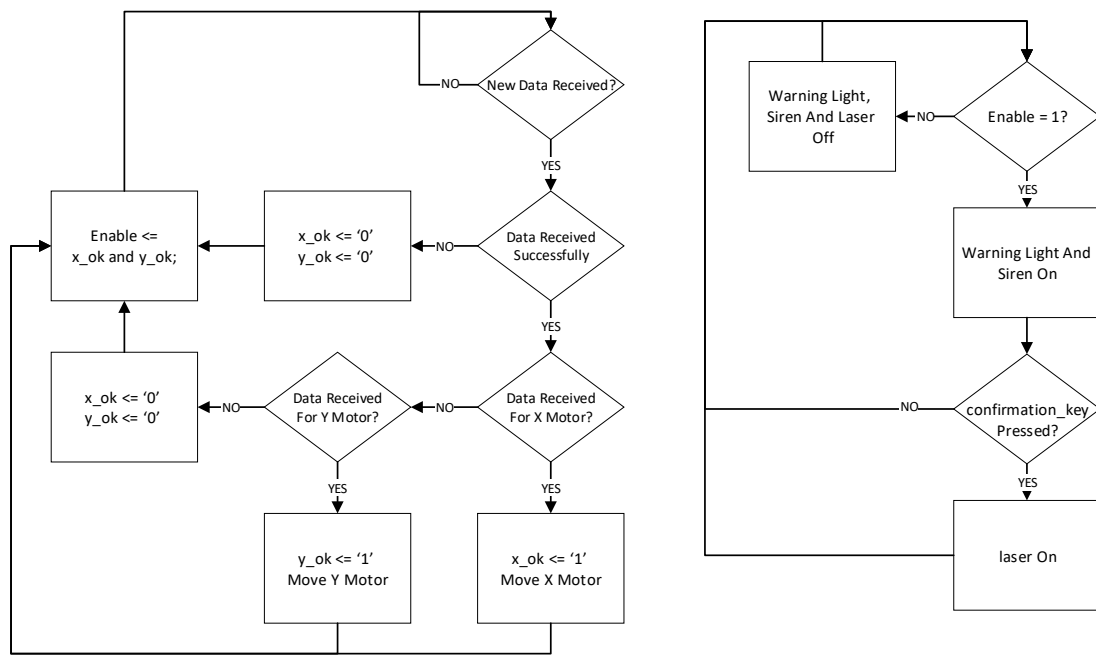
איור 14 - תרשים זרימה לוגי כולל של פעולת המערכת



איור 15 - תרשים זרימה לוגי - Matlab



### 4.2.3. תרשים זרימה לוגי - Altera :



איור 16 - תרשים זרימה לוגי Altera



#### 4.3. הסבר על קוד המערכת Matlab:

קוד ה-Matlab מורכב מהגדרת קבועים ויצירת אובייקטים נדרשים ולאחר מכן לולאה אין-סופית שמבצעת בכל פעם מחדש קליטה של המידע הנקלט מהמצלמה ושליחת נתונים לכרטיס הפיתוח בהתאם. בנוסף קיימת פונקציה שאחראית לארגון הנתונים לשליחה באופן הנדרש.

#### טבלה 2 - קבועים בקוד Matlab:

שם הקבוע	ערך	ייעוד
sensitivity	0.3	ערך סף אשר משמש להפיכת התמונה לתמונה בינארית. כל פיקסל בתמונה בעל ערך שקטן ממנו יהפוך להיות 0, וכל פיקסל בעל ערך גדול ממנו יהפוך להיות 1
numOfPixels	30	קבוע המשמש ל"ניקוי" התמונה, קבוצת פיקסלים הקטנה מערכך זה תימחק
midFrame	חצי גודל התמונה	משמש לחישובים של מיקום האובייקט יחסית למרכז הפריים

#### טבלה 3 - אובייקטים בקוד Matlab:

שם האובייקט	תפקיד
SerialConn	אובייקט סריאלי, משמש לתקשורת בין המחשב לכרטיס הפיתוח
cam	אובייקט מצלמה, ניתן לקרוא מהאובייקט פריים בכל רגע נתון
videoPlayer	אובייקט היוצר חלון תצוגת ווידאו, כאשר החלון נסגר הלולאה נעצרת

את פעולת הלולאה ניתן לחלק לחמישה חלקים עיקריים:

- לכידת תמונה - קבלת פריים מהמצלמה ואיתור גווני אדום.
- איתור אובייקט - מציאת האובייקט האדום הגדול ביותר, חישוב מרכז המסה, סימון האובייקט על הפריים וכתובת הערכים הנדרשים.
- חישוב - חישוב מיקום האובייקט יחסית למרכז הפריים והמרת הערך המתקבל למספר המייצג את המיקום החדש אליו המנוע צריך לזוז.
- שליחת המידע - שליחת נתוני המיקום המתאימים למנועים.
- ריענון - עדכון תצוגת הווידאו.

#### 4.3.1. חלק א' – קבלת פריים מהמצלמה ואיתור גווני אדום:

- קבלת פריים בודד מתוך המצלמה.
- חיסור של הפריים המומר לגווני אפור לבין מטריצת ה-RED של הפריים, הגוון האדום הוא הגוון הדומיננטי ביותר, כך שאותו הכי קל לחלץ מהפריים (ניתן לראות זאת באיור 17).
- המרה לתמונה בינארית - כל הפיקסלים שעוצמתם גבוהה מערך הסף שהוגדר (sensitivity) יהפכו ל-1, כל הפיקסלים שעוצמתם נמוכה יהפכו ל-0.
- "ניקוי" התמונה הבינארית המתקבלת - כל הפיקסלים הצמודים אשר יוצרים מקבץ פיקסלים קטן מהערך שהוגדר (numOfPixels), יימחקו (ניתן לראות זאת באיור 18).

4.3.2. חלק ב' – מציאת האובייקט האדום הגדול ביותר, חישוב מרכז המסה, סימון האובייקט על הפריים וכתובת הערכים הנדרשים :

- מתבצעת בדיקה האם נמצאו אובייקטים בפריים, במידה ולא עוברים ישר לחלק ד' ומבצעים שליחה של הערך 0. במידה ונמצאו אובייקטים מאתרים את האובייקט הגדול ביותר.
- מחלצים מתוך האובייקט את קורדינטות מרכז המסה שלו.
- מחלצים מתוך האובייקט את הפרמטרים הדרושים לציור המסגרת.
- מציירים על גבי הפריים המקורי מסגרת, סימון איקס במרכז המסה וקורדינטות מרכז המסה.

4.3.3. חלק ג' - חישוב מיקום האובייקט יחסית למרכז הפריים והמרת הערך המתקבל למספר המייצג את המיקום החדש אליו המנוע צריך לזוז :  
החישוב מתבצע על פי הנוסחה הבאה (עבור ציר אופקי ואנכי) :

נוסחה 5 - חישוב גודל צעד נדרש Matlab

$$step = 0.06 \cdot \left( \frac{center\_mass}{midFrame} - 1 \right)$$

- כאשר נקודת מרכז המסה בדיוק במרכז הפריים נקבל שאין צורך לבצע צעד. כאשר מרכז המסה לא נמצא במרכז הפריים יתקבל ערך חיובי או שלילי שמציין לאיזה כיוון יש לנוע כדי שמרכז המסה יתקרב למרכז הפריים. מאחר ויש זמן השהייה בין שליחת המידע לבין קבלת הפריים החדש ההזזה מתבצעת בצעדים קטנים ולא הזזה של כל המרחק הנדרש, כך נמנעים "קפיצות" וניתן לבצע עקיבה חלקה. ככל שהמקדם (0.06) יהיה יותר גדול, מהירות התנועה של המנועים תגדל אך גם תזזיתיות המערכת תגבר.
- כעת יש לעדכן את המיקום הנשלח אל המנועים על ידי הוספת הצעד הנדרש (יכול להיות חיובי או שלילי).
  - טרם שליחת המידע אל המנועים יש לוודא כי אין חריגה מהערך המותר (בין 0 ל-1) במידה ויש חריגה יתבצע תיקון של הערך.

4.3.4. חלק ד' - שליחת נתוני המיקום המתאימים למנועים :

- שימוש בפונקציה sendPos(port, pos, xy), המקבלת מספר (pos) שערכו בין 0 ל-1, המציין את המיקום אליו המנוע צריך לזוז (0- אפס מעלות, 1- 180 מעלות) וצמד סיביות המציינות האם המיקום הנ"ל שייך למנוע בציר האופקי או האנכי (11'- ציר X, 10'- ציר Y, 01' – חזרה לנקודת המרכז, 00' - לא זוהה אובייקט - אין צורך לבצע תזוזה).
  - הפונקציה מבצעת הכפלה של ערך המיקום שהתקבל ב-  $63 - 1 = 2^6$  ומבצעת המרה של המספר המתקבל לערך בינארי.
  - הפונקציה "מצמידה" את שתי הסיביות (xy) מימין כך שמתקבל מספר בינארי בן 8 סיביות ולאחר מכן מתבצעת המרה נוספת למספר דצימלי. המספר הסופי שמתקבל נראה בצורה הבאה :
- $[pos(6), pos(5), pos(4), pos(3), pos(2), pos(1), pos(0), xy(1), xy(0)]$
- המספר הדצימלי הסופי שהתקבל נשלח לכרטיס הפיתוח בעזרת הפונקציה המובנית ב-Matlab : fwrite.
- לדוגמה : עבור שליחת מיקום  $pos = 0.17$  ( $30.6[deg] = 180 \cdot 0.17$ ) למנוע בציר X נקבל :

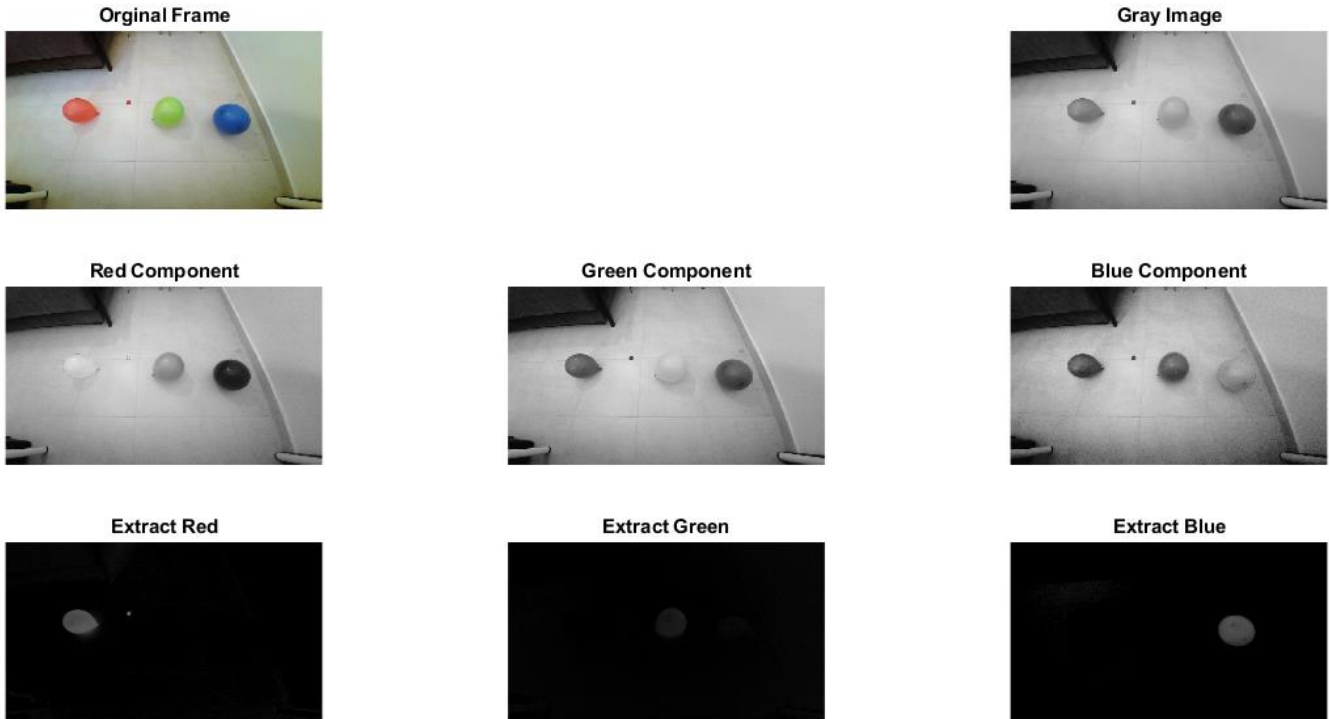
$$pos = 0.17, \quad xy = "11"$$

$$0.17 \cdot 64 = 10.88 \approx 11 = "001011"[bin]$$

$$\underbrace{"00101111"}_{pos}[bin] = 47[dec]$$

4.3.5. חלק ה' - עדכון תצוגת הווידאו :

כעת כל מה שנותר לעשות זה לעדכן את התמונה על גבי חלון הווידאו בעזרת הפריים המעודכן, לאחר שהתווספו לו הסימונים והכיתוב הנדרש.



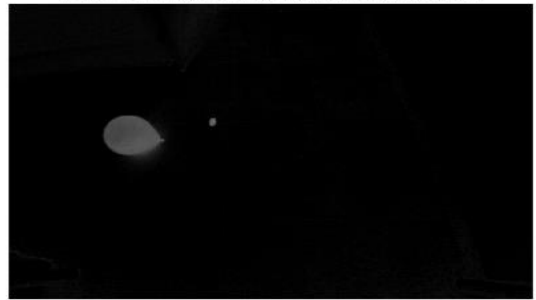
איור 17<sup>6</sup> - חילוץ גווני אדום, ירוק וכחול מהפריים

<sup>6</sup> התמונה נלקחה בעזרת תוכנת Matlab

Step One: Original Frame



Step Two: Extract Red Component (subtract)



Step Three: Binary Image



Step Four : Clean Image



איור 18<sup>7</sup> - חילוץ גווני אדום מהפריים, המרה לתמונה בינארית וניקוי רעשים (מתוך Matlab)

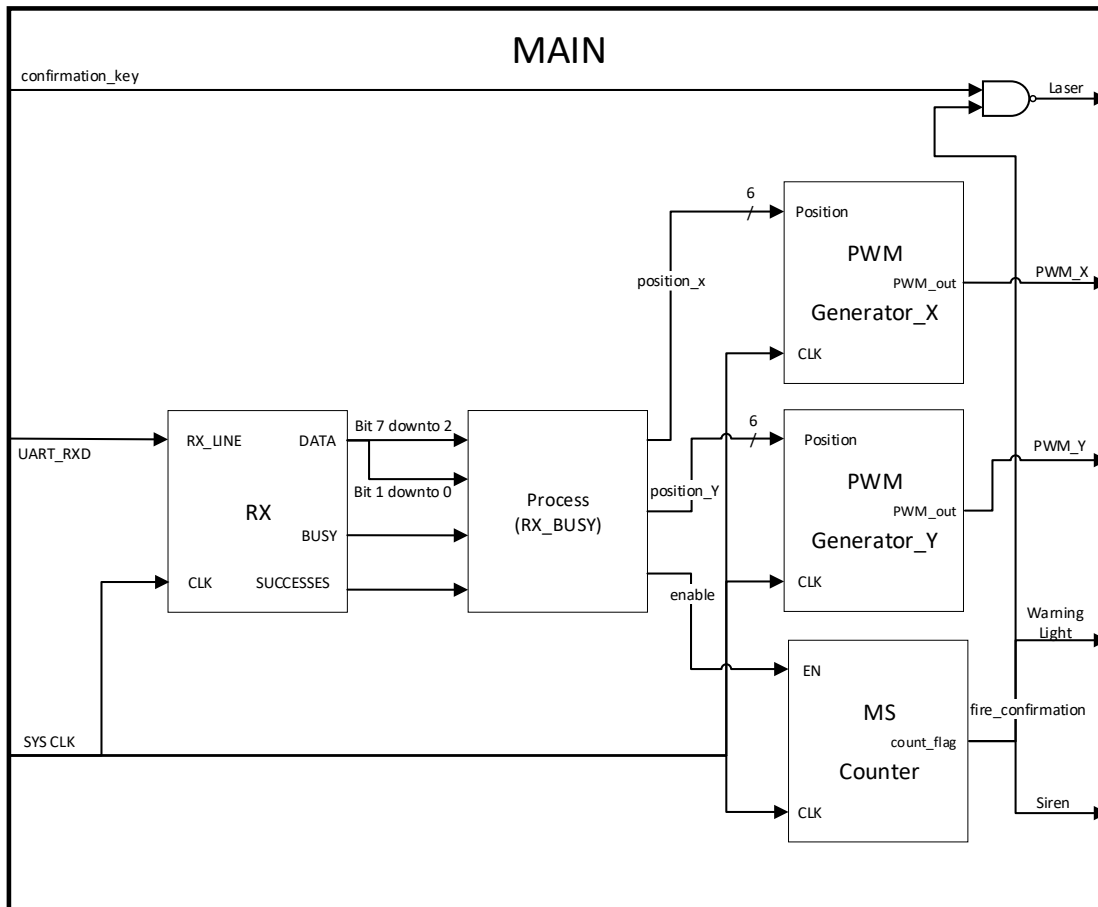
---

<sup>7</sup> התמונה נלקחה בעזרת תוכנת Matlab

#### 4.4. הסבר על קוד המערכת Altera:

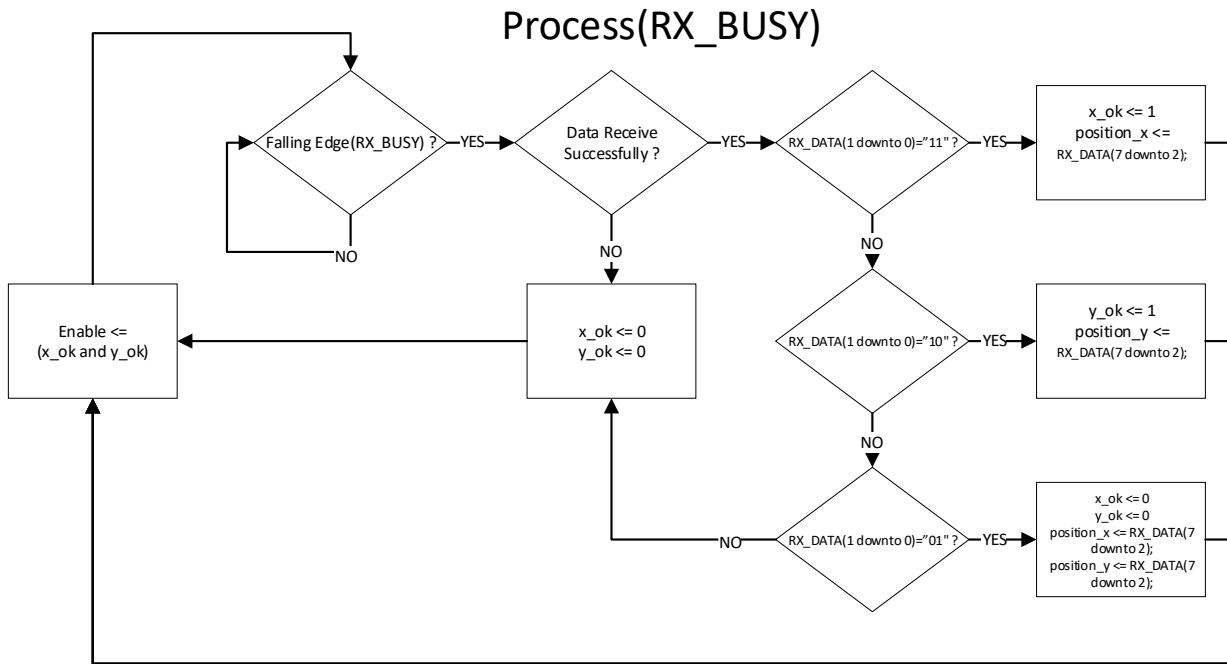
קוד ה-Altera נכתב בשפת VHDL ומכיל את התוכנית הראשית ושלושה רכיבים (קומפוננטות).

4.4.1. בתוכנית הראשית מתבצעת הגדרה של כלל רכיבי המערכת וביצוע תהליך סידרתי (Process) בכל פעם שמתקבל מידע חדש מהמחשב.



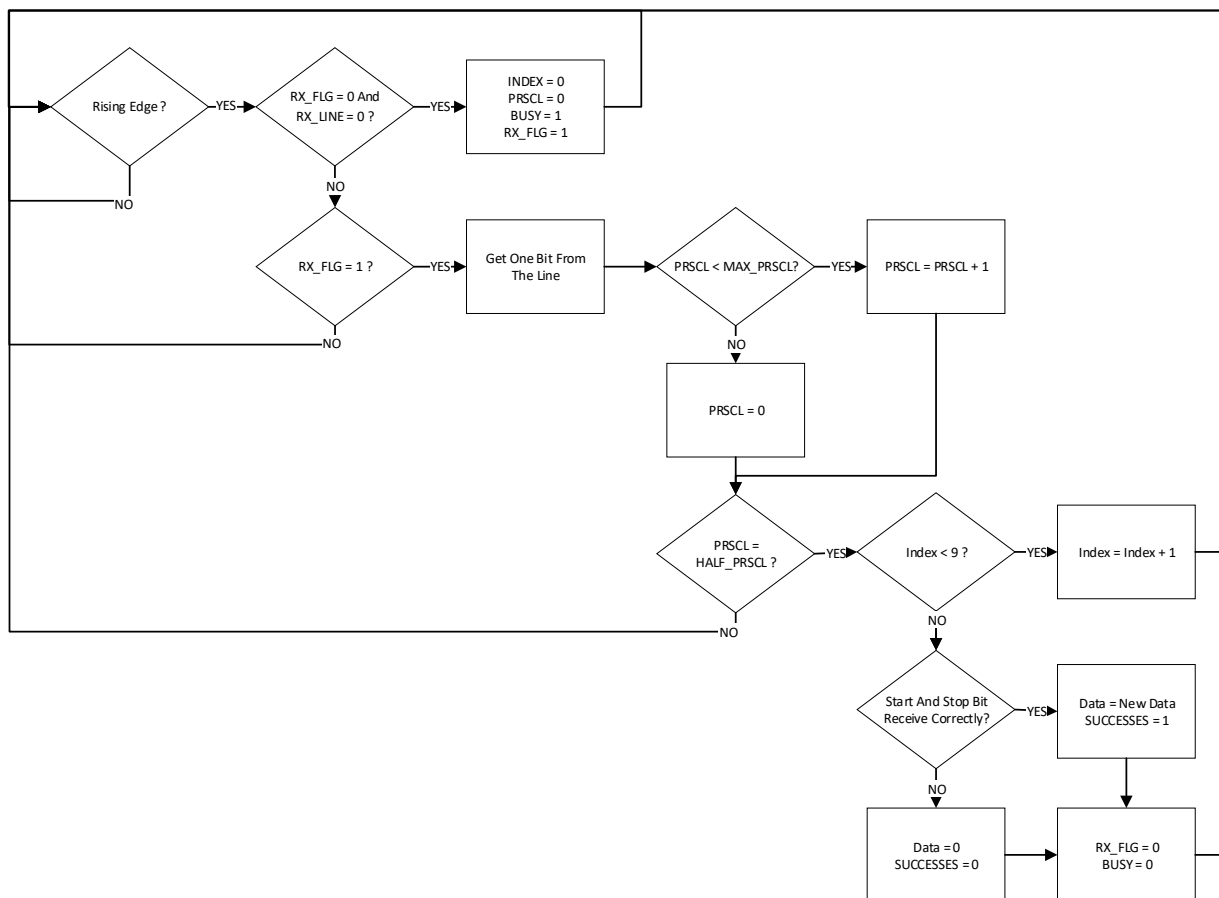
איור 19 - סכמה של התוכנית הראשית

בנוסף לתהליך הסדרתי קיימות עוד השמות לוגיות, הקורות באופן מקבילי. התהליך רגיש לירידת דגלן שמשמעו שמתבצעת קליטת נתונים. ירידת הדגלן מסמלת שיש מידע חדש הממתין בווקטור המידע. כעת מתבצעת בדיקה האם המידע נשלח לציר X, ציר Y או שאין אובייקט במרחב. לאחר קבלת המידע נשלחים הנתונים לדגלן האפשר (מפעיל חיווי קולי וויזואלי, ומאפשר קבלת קלט מכפתור הירי) ולמנוע המתאים. רכיב האפשר מבצע הפעלה של החיווי והלייזר באופן מקבילי מחוץ לתהליך, ניתן לראות את המבנה הלוגי של התהליך באיור 20.

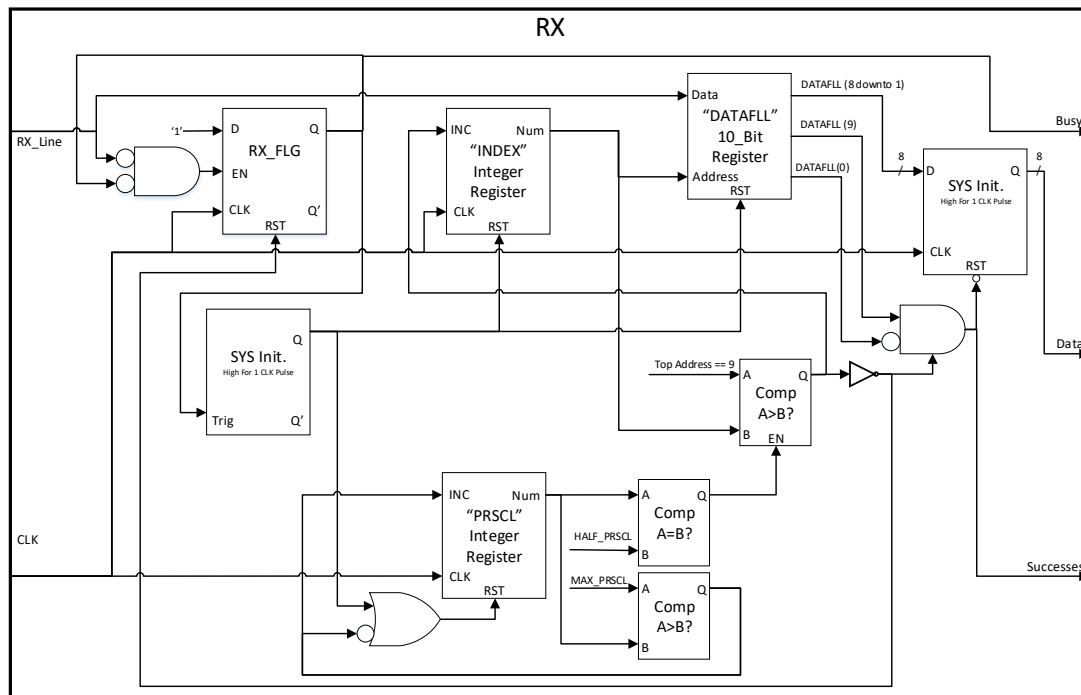


איור 20 - תרשים זרימה לוגי - Process(RX\_BUSY)

4.4.2. הרכיב הראשון, RX מממש מקלט, מטרתו לקבל את מידע הנשלח מהמחשב באופן טורי (בפרוטוקול תקשורת RS-232) והמרתו למילה בינארית בת 8 סיביות.



איור 21 - תרשים זרימה לוגי - קומפוננטה RX



איור 22 - סכמת קומפוננטה RX

המשדר כאמור הינו תוכנית ה-Matlab הפועלת במחשב ומחוברת לכרטיס ה-RS-232. המידע שיוצא מהמחשב מכיל 10 סיביות, מתוכן שתי הסיביות הקיצוניות (סיביות 0 ו-9) משמשות את פרוטוקול התקשורת לצורך הגדרת תחילת וסוף מידע, כלומר, המידע הרלוונטי למערכת מצוי בסיביות 8 עד 1 המידע נשלח מהסיבית הנמוכה לגבוהה, כפי שמופיע בטבלה הנ"ל:

טבלה 4 - פירוט סיביות מידע, פרוטוקול תקשורת RS-232:

RX Receiver Bit Map										
Bit Number	0 (LSB)	1	2	3	4	5	6	7	8	9 (MSB)
Function	RX Start Bib	8 Bit Data								RX Stop Bit
Value	0	X	X	X	X	X	X	X	X	1

ניתן לראות את סיביות המידע הנקלט באופן וויזואלי באיור 34. תצורת קליטת הנתונים ב-RX מתבצעת בצורה טורית באמצעות כניסת הרכיב RX\_LINE כאשר ברכיב עצמו מתבצעת בדיקת תקינות של קליטת הנתונים. במידה והנתונים נקלטו בהצלחה דגלן SUCCESS יעלה ל-1 על מנת להודיע על הצלחה, במידה וקליטת הנתונים לא הייתה תקינה הנתונים שנשמרו עד כה יתאפסו ותתבצע קליטת נתונים מחדשת.

רכיב RX – המקלט מקבל 2 כניסות (שעון ומידע טורי), ומספק 3 יציאות (דגלן SUCCESS, דגלן BUSY וקטור המכיל את המידע שהתקבל בן 8 סיביות). בכל עליית שעון נבדק מה מצב הדגלן הפנימי (RX\_FLG), כאשר גם הדגלן הפנימי וגם סיבית המידע הנכנס בנמוך (Start Bit) מתחילה קליטת מידע חדש מהקו. ראשית מאפסים את המצביע (INDEX) - האחראי על הכנסת המידע לזקטור היוצא) ואת המונה הפנימי של המקלט. בנוסף, יציאת המערכת BUSY (מתחילה להתבצע קליטת נתונים חדשים) והדגלן הפנימי עולים לגבוה.

כעת מתבצעת בדיקה האם הדגלן הפנימי עדיין בגבוה, במידה וכן, הסיבית הממתינה על קו המידע נכנסת למיקום הראשון בזקטור.

לאחר קבלת כל 10 הסיביות מתבצעת בדיקה האם הסיבית הראשונה והאחרונה הן 0 ו-1 בהתאמה, במידה והבדיקה תקינה (המידע התקבל בהצלחה) הסיביות 1-8 מוכנסות לווקטור המוצא של המערכת ודגלן SUCCESS עולה לגבוה, במידה ולא וקטור המוצא מתאפס ודגלן SUCCESS יורד לנמוך.  
לאחר מכן דגלן BUSY והדגלן הפנימי של המקלט יורדים לנמוך, כך שהמקלט פנוי לקבל מידע חדש.

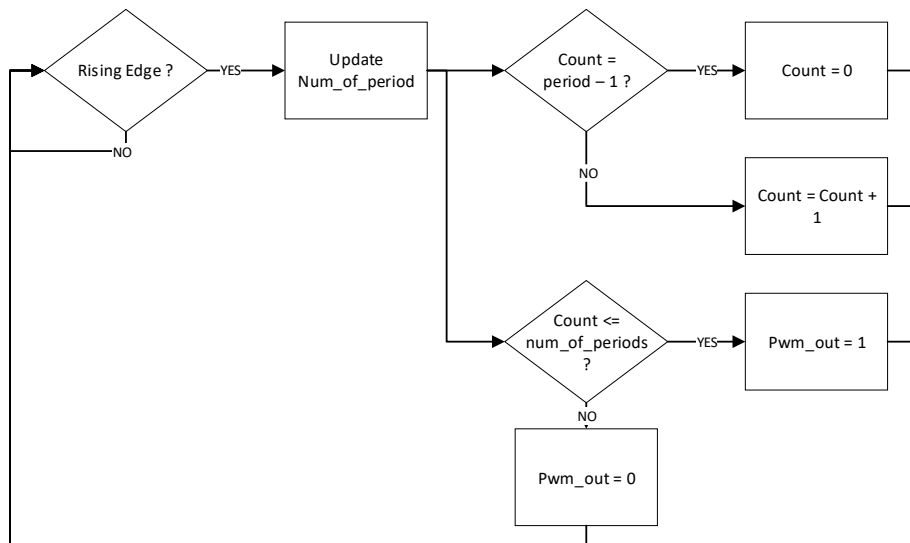
ערך ה-MAX\_PRSCl הוא הפרמטר שקובע את קצב שליחת הנתונים. בכל פעם שהמונה מגיע לערך הנ"ל מתחילה קריאה של סיבית חדשה. כאשר המונה מגיע לחצי מהערך (HALF\_PRSCl - חצי זמן מחזור של שליחת סיבית, כך שהסיבית נמצאת בערך הרצוי כמה שיותר זמן לפני שינוי הערך לסיבית הבאה) מתבצעת שמירה של הסיבית החדשה.

ערך ה-PRSCl נקבע על פי הנוסחה הבאה :

נוסחה 6 - חישוב ערך PRSCl של הרכיב המקלט - RX

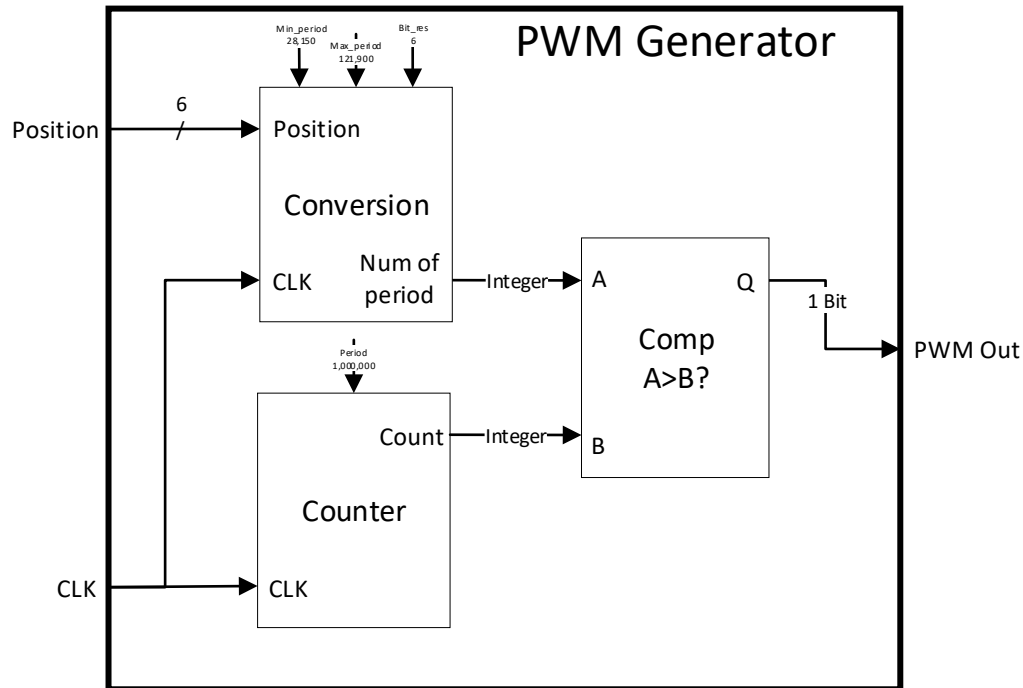
$$MAX\_PRSCl = \frac{f_{clock}}{baudRate} = \frac{50 \cdot 10^6 [Hz]}{256000 [\frac{bit}{sec}]} = 195.31 \approx 195 [\frac{1}{bit}]$$

4.4.3. הרכיב השני, הוא מחולל אות PWM, רכיב זה מוגדר פעמיים, עבור ציר X וציר Y.



איור 23 - תרשים זרימה לוגי - קומפוננטה PWM Generator





איור 24 - סכמת קומפוננטה PWM Generator

הרכיב מקבל אות בין 6 סיביות ואת שעון המערכת ומוצא הרכיב הוא אות PWM מתאים.

הרכיב עובד על פי הגדרה של מספר פעימות שעון הנדרשות לספירה, כאשר על פי מניית פעימות השעון ניתן לדעת מהו משך הזמן שחלף. כדי למצוא את כמות פעימות השעון הנדרשות נשתמש בנוסחה הבאה:

נוסחה 7 - חישוב מספר פעימות שעון נדרשות למנייה

$$N = t_{HIGH} \cdot f_{clock}$$

תדר השעון של המערכת הוא:  $f_{clock} = 50[MHz]$ .

על פי הנוסחה הנ"ל נחשב 2 קבועים:  $N_{min}$  ו-  $N_{max}$ . שמבטאים את כמות המחזורים המינימלית והמקסימלית אותם יש למנות<sup>8</sup>.

$$N_{min} = t_{HIGH, min} \cdot f_{clock} = 0.563 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 10^6 = 28150$$

$$N_{max} = t_{HIGH, max} \cdot f_{clock} = 2.438 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 10^6 = 121900$$

נוסחה 8 - חישוב כמות מחזורים נדרשת למנייה

$$num\_of\_period = N_{min} + position \cdot \frac{N_{max} - N_{min}}{2^n - 1}$$

בנוסף יש מונה שסופר את כמות מחזורי השעון כדי ליצור זמן מחזור מתאים לתדר של 50 הרץ (20ms), כך שהמונה סופר

$$N_{TOTAL} = T \cdot f_{clock} = 20 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 10^6 = 10^6$$

כאשר המונה קטן ממספר  $N_{min}$  שנקבע - אות המוצא יהיה '1', לאחר מכן ועד האיפוס האות במוצא יהיה '0'.

<sup>8</sup> ניתן לראות את מציאת הזמנים בהם האות בגבוה ובנמוך בסעיף ניסויים ובדיקות

בדוגמא הבאה נראה את המספר המתקבל עבור כניסה של מספר המציין מיקום של 0 מעלות ואת זמן המחזור בו האות בגבוה. ההמרה ממעלות לערך של 8 סיביות מתבצעת על ידי הנוסחה הבאה:

נוסחה 9 - המרת זווית לערך של n ביטים

$$position[n \text{ bit}] = \frac{Ang[deg]}{180} \cdot 2^n$$

$$Ang = 0^\circ \Rightarrow position = \frac{0}{180} \cdot 2^8 = 0$$

$$num\_of\_period = 28150 + 0 \cdot \frac{121900 - 28150}{2^8 - 1} = 28150$$

$$\frac{num\_of\_period}{f_{clock}} = t = \frac{28150}{50 \cdot 10^6} = 0.563[ms]$$

באופן דומה עבור זווית של 90 מעלות נקבל:

$$Ang = 90^\circ \Rightarrow position = \frac{90}{180} \cdot 2^8 = 128$$

$$num\_of\_period = 28150 + 128 \cdot \frac{121900 - 28150}{2^8 - 1} = 75025$$

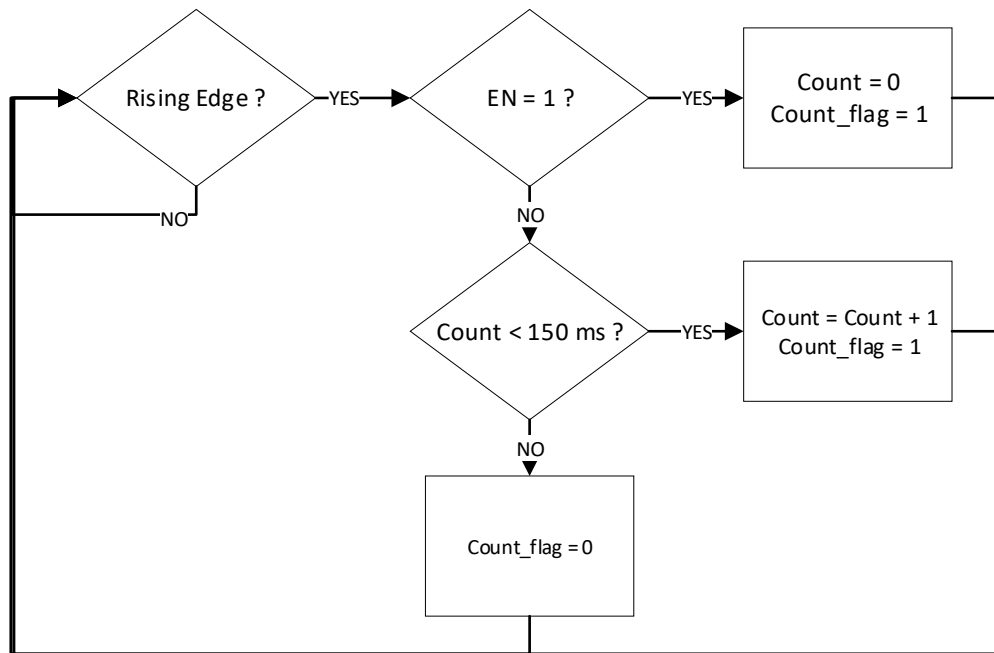
$$\frac{num\_of\_period}{f_{clock}} = t = \frac{75025}{50 \cdot 10^6} = 1.5005[ms]$$

ועבור זווית של 180 מעלות נקבל:

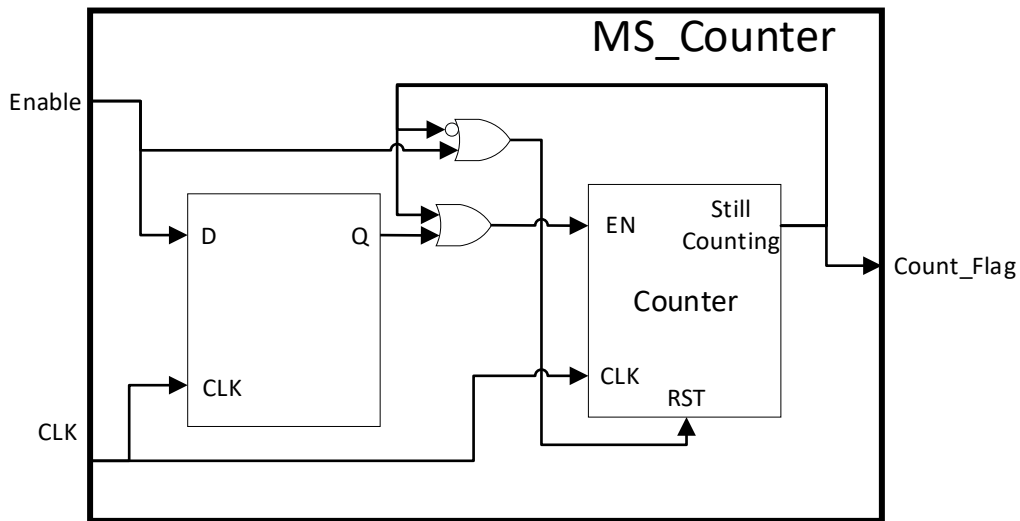
$$Ang = 90^\circ \Rightarrow position = 256$$

$$num\_of\_period = 121900 \Rightarrow t = 2.438[ms]$$

4.4.4. הרכיב הרביעי הוא מונה של מילי-שניות. רכיב זה עובד כמו רכיב חד-יציב בדרכון חוזר, בכל פעם שהוא מקבל דרכון המונה הפנימי שלו מתאפס, במידה ולא התקבל דרכון במשך 150 מילי שניות המונה מרים דגלן.



איור 25 - תרשים זרימה לוגי - קומפוננטה MS\_Counter



איור 26 - סכמת קומפוננטה Ms\_Counter

כאשר הדגלן בנמוך ניתן להפעיל את הלייזר. מטרת הרכיב הוא ליצור רציפות בהפעלת הלייזר. במהלך שליחת המידע מהמחשב לכרטיס הפיתוח מתרחשות שגיאות, שגיאות אלו יכולות ליצור מידע כוזב שמשמעו "אין אובייקט בפריים" כך שהמערכת מנתקת את הלייזר מפעולה. בעזרת המונה המערכת תחכה חצי שניה שבה היא תבדוק האם הגיע מידע חדש ותקין. רק לאחר 0.15 שניות שבהן לא הגיע מידע תקין המערכת תתנתק.

## 5. ניסויים ובדיקות:

לבחינת המערכת נערכה סדרת בדיקות של תתי המערכות כאשר כל ניסוי מוכוון לניתוח פעולה של רכיב/ היבט שונה במערכת הכוללת.

לאחר תהליך ארוך מול המחלקות השונות באוניברסיטה לא התאפשר לקבל בהשאלה לייזר עוצמתי לטובת הפרויקט, שני ניסויים שהיו מתוכננים לא בוצעו – ניסוי פיצוץ בלון נייח וניסוי פיצוץ בלון בתנועה.

### 5.1. מדידת זמן ומהירות נפילה חופשית של בלון:

5.1.1. על מנת לקבל מושג כללי בנוגע למהירות התנועה הנדרשת מהמנועים בוצעה מדידת

זמן התנועה ומהירות של בלון בנפילה חופשית.

5.1.2. ניסוי זה בוצע כחלק מקדים לתהליך בחירת המנועים.

5.1.3. התנועה נבדקה באמצעות מצלמה המצלמת בהילוך איטי וניתוח מספר הפריימים הנדרש.

### 5.2. מציאת ערכי אמת של תנועת המנועים:

5.2.1. נבדקה ההתאמה לנתוני היצרן ומדידת ערכי האמת של המנועים לצורך הכנסת הערכים בקוד ושיפור דיוק המערכת.

5.2.2. לצורך בדיקת המנועים נכתב קוד על גבי כרטיס הפיתוח השולט על רוחב ה-D.C של אות ה-PWM בעזרת מתגים כך שניתן "לשלוח" מיקום ספציפי ולבדוק מהם הערכים שבהם מתקבלת תנועת מנוע מקסימלית ומינימלית.

5.2.3. המדידות בחלק זה של הניסוי זה התבצעו בעזרת הסקופ.

### 5.3. בדיקת תקשורת בין המחשב לכרטיס הפיתוח:

5.3.1. לאחר מימוש רכיב המקלט בלוח ה-Altera היה נדרש לוודא שאכן הרכיב פועל כראוי.

5.3.2. התקשורת בין המחשב (תוכנת Matlab) לבין כרטיס הפיתוח של חברת Altera, התבצעה בעזרת כבל UART-TO-USB על פי פרוטוקול תקשורת RS-232.

5.3.3. לצורך ניסוי זה נכתב קוד ייעודי שהפעיל את נורות הלד המובנות על כרטיס הפיתוח, בהתאם למידע שנשלח מהמחשב לצורך וידוא תקינות קלט.

5.3.4. בנוסף התבצעה בדיקה בסקופ של המידע על קו RX\_LINE המחובר בין המחשב לכרטיס הפיתוח (ראה איור 34) של המידע המתקבל.

### 5.4. בדיקת מוצא כרטיס הפיתוח, אות ה-PWM:

5.4.1. לאחר מימוש הרכיב שמייצר אות PWM להזנת המנועים נדרש לוודא שהרכיב פועל כשורה.

5.4.2. נכתב קוד ייעודי לצורך הזנת הכניסה (מדמה את הערך שנשלח מהמחשב) ובוצעה בדיקה האם ההמרה של הכניסה אכן מספקת את אות ה-PWM המתאים במוצא.

5.4.3. בדיקת מוצא כרטיס ה-Altera, בוצעה על ידי חיבור לסקופ ובדיקה האם המידע מתאים לחישוב הידני (ראה איור 35).

5.5. בדיקת מהירות התנועה של המנועים:

- 5.5.1. למהירות המנועים קיימת חשיבות רבה מאחר והיא מגדירה את הזמן הנדרש למערכת להתכוון על המטרה.
- 5.5.2. מדידת מהירות התנועה של המנועים התבצעה בעזרת צילום התנועה בהילוך איטי וניתוח מספר הפריימים הנדרש.
- 5.5.3. לצורך ניתוח מהירות התנועה נכתב קוד לכרטיס הפיתוח, בו לאחר לחיצה על כפתור המנועים זזים את כל טווח התנועה האפשרי (מזווית 0 לזווית 180), כך שניתן לבצע מדידה של משך הזמן הנדרש לביצוע התנועה.
- 5.5.4. הבדיקה בוצעה עבור כל אחד מהמנועים בנפרד.

5.6. בדיקות עקיבה אחרי בלון:

- 5.6.1. לצורך הבדיקה הורכב על המערכת ציין לייזר פשוט בהספק הקטן מ-  $5[mW]$  הפועל באופן קבוע, כך שניתן לראות לאיזה כיוון המערכת מכוונת.
- 5.6.2. באמצעות זריקת בלון בצבע אדום למרחב הראייה של המצלמה נבדק כיצד המערכת מזהה את הבלון וכיצד היא מגיבה ועוקבת אחרי תנועת הבלון - במרכז הפריים, בקצוות ובמרחקים משתנים בטווח של 1.5 עד 5 מטר מהמצלמה.
- 5.6.3. התנועה נבדקה באמצעות מצלמה המצלמת בהילוך איטי.

5.7. מכשירי מדידה:

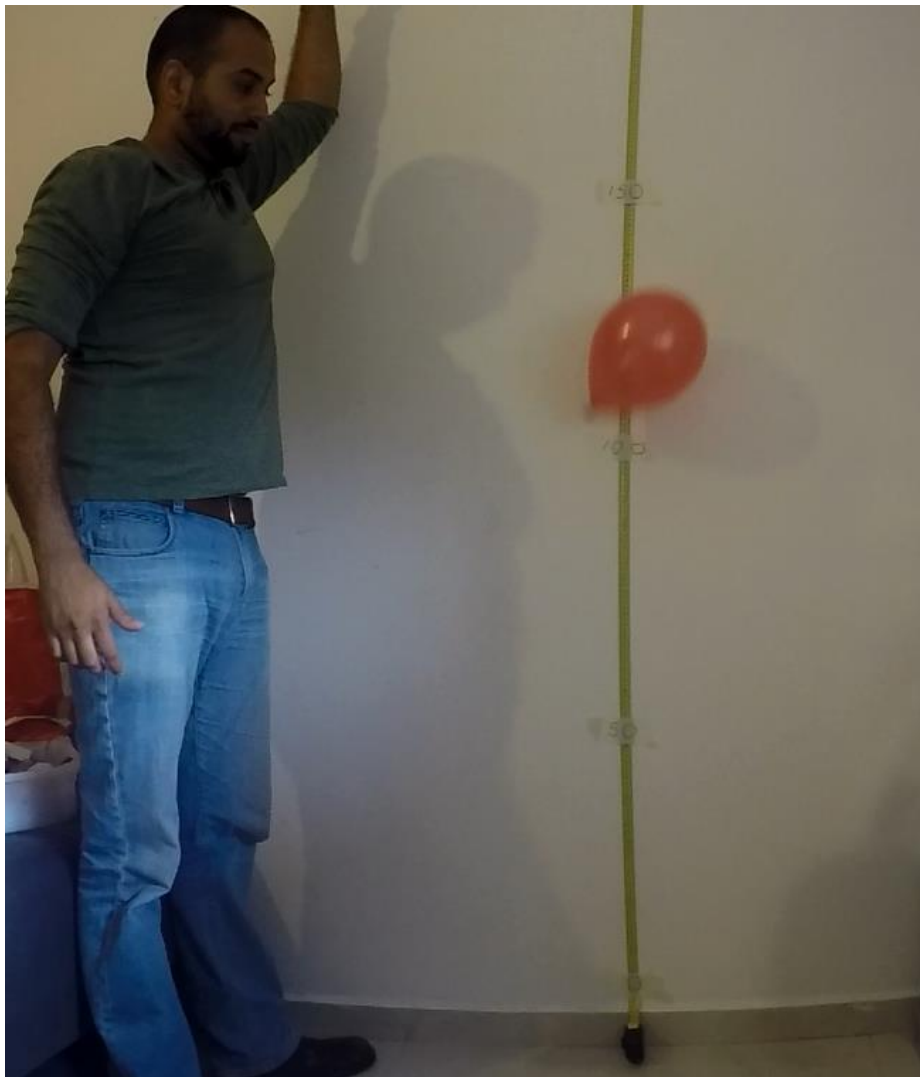
- 5.7.1. סקופ לבדיקה של אותות התקשורת בין המחשב ללוח הפיתוח ובדיקת אות ה-PWM שנועד להזזת המנועים.
- 5.7.2. מצלמת הילוך איטי GoPro, המצלמה תשמש לצפייה בטוחה בבלון ואפשרות לניתוח מהירות התנועה, הצילומים נעשו ברזולוציה של  $1920 \times 1080$  פיקסלים ובקצב של 119.88 פריימים לשנייה.

## 6. תוצאות ומסקנות מביצוע המדידות:

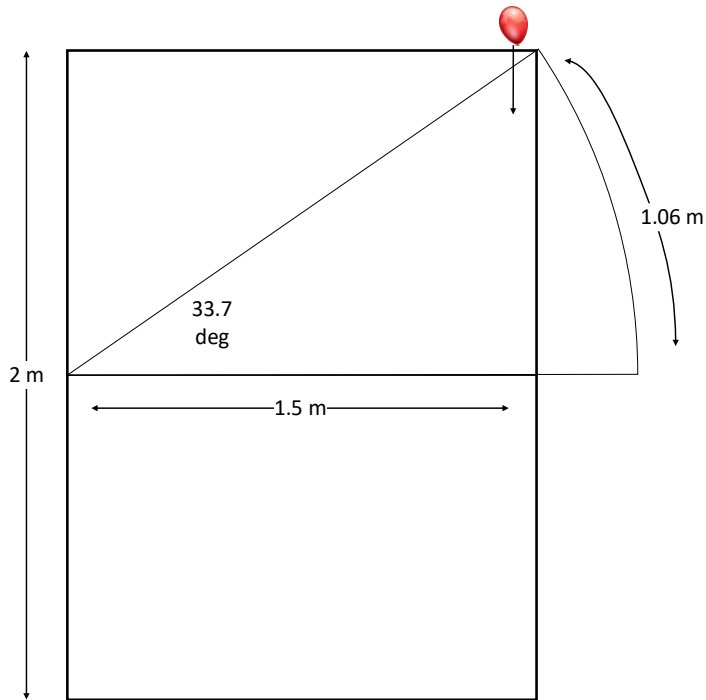
### 6.1. תוצאות מדידת זמן ומהירות נפילה חופשית של בלון:

#### 6.1.1. תוצאות הניסוי:

לצורך מדידת מהירות הנפילה הופלו בלונים בגדלים שונים בזה אחר זה כאשר הנפילה מצולמת במצלמה בהילוך איטי. המדידה התבצעה במרחק של 1.5 מטר מהמצלמה ומרחק הנפילה היה 2 מטרים. הצילום התבצע בקצב של 120 fps. היקף של בלון בגודל סטנדרטי הוא בערך 60 ס"מ, כך שקוטר הבלון (ההיטל הדו-ממדי של הבלון) הוא בערך 20 ס"מ, כך שהמערכת נדרשת לדיוק של  $\pm 10$  ס"מ כדי לפגוע במטרה. בכל החישובים הנ"ל הוזנח ההבדל בין אורך הקשת לאורך הצלע מטעמי נוחות (הבדל של 6 ס"מ).



איור 27 - צילום מערכת הניסוי, נפילת בלון



איור 28 - שרטוט של מערכת הניסוי

מתוצאות המדידה מתקבל זמן נפילה ממוצע של 2.39 שניות עבור בלון בגודל סטנדרטי.

נוסחה 10 - המרה ממעלות לשנייה לסיבובים לדקה

$$1RPM \left[ \frac{\text{round}}{\text{min}} \right] = 6 \left[ \frac{\text{deg}}{\text{sec}} \right]$$

לפי המדידות הנ"ל הזווית אותה המנוע נדרש לעבור היא :

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{1}{1.5} \Rightarrow \theta = 67.38[\text{deg}]$$

כעת, אם המנוע עובר 67 מעלות בזמן של 2.39 שניות אז לאחר חלוקה ל-360 מעלות (סיבובים לשנייה) והכפלה ב-60 (סיבובים לדקה) מתקבל :

$$RPM = \frac{67.38}{2.39 \cdot 6} = 4.498[rpm]$$

כאשר עבור הבלון הקטן (שמהירות הנפילה שלו הכי גדולה) מתקבל :

$$RPM = \frac{67.4}{1.28 \cdot 6} = 8.77[rpm]$$

בנוסף יש לדרוש שזמן התנועה של המערכת למרחק של 2.5 מטר (חצי פריים) בנקודה הקרובה ביותר (1.5 מטר) תהייה לכל היותר חצי מזמן השהייה של הבלון בפריים.

$$1rpm = 6[\text{deg/sec}]$$

$$\frac{60[\text{deg}]}{t/2[\text{sec}]} = 6 \cdot \frac{20}{t} \left[ \frac{\text{deg}}{\text{sec}} \right] = \frac{20}{t} [rpm]$$

כך שעבור הזמן הקצר ביותר יש לדרוש מהירות תנועה של המנועים :

$$RPM_{\text{moror}} = \frac{20}{1.28} = 15.625[rpm]$$

טבלה 5 - תוצאות מדידה זמן נפילת בלון :

Balloon Girth [cm]	Balloon Radius [cm]	Start Frame	End Frame	Num. of Frames	Time in Motion [sec]	Speed [m/sec]	Avg. Time [sec]	Avg. Speed [m/sec]
30	4.77	40	160	120	1.00	2.00	1.28	1.59
		774	935	161	1.34	1.49		
		1449	1610	161	1.34	1.49		
		2695	2868	173	1.44	1.39		
43	6.84	127	355	228	1.90	1.05	1.81	1.11
		785	989	204	1.70	1.18		
		1470	1661	191	1.59	1.26		
		2135	2350	215	1.79	1.12		
		2840	3088	248	2.07	0.97		
52	8.28	65	341	276	2.30	0.87	1.88	1.08
		756	966	210	1.75	1.14		
		1420	1627	207	1.73	1.16		
		2575	2771	196	1.63	1.22		
		3170	3406	236	1.97	1.02		
60	9.55	116	423	307	2.56	0.78	2.39	0.84
		845	1117	272	2.27	0.88		
		1489	1761	272	2.27	0.88		
		2206	2458	252	2.10	0.95		
		2856	3150	294	2.45	0.82		
		3615	3912	297	2.48	0.81		
		242	492	250	2.09	0.96		
		991	1237	246	2.05	0.97		
		1702	2022	320	2.67	0.75		
		2641	2955	314	2.62	0.76		
		3603	3932	329	2.74	0.73		
66	10.50	205	523	318	2.65	0.75	2.65	0.77
		1190	1505	315	2.63	0.76		
		1960	2282	322	2.69	0.74		
		2960	3191	231	1.93	1.04		
		3805	4183	378	3.15	0.63		
		4638	4978	340	2.84	0.71		

6.1.2. מסקנות הניסוי :

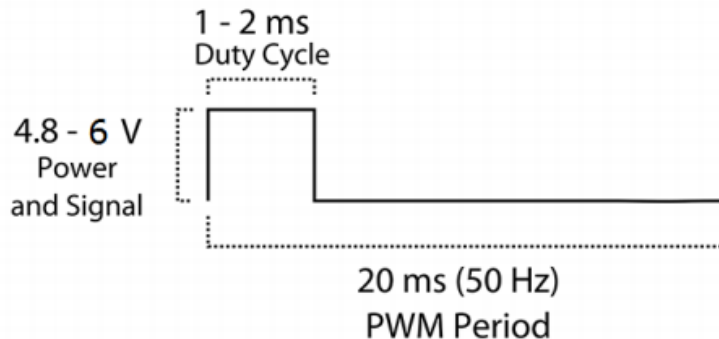
נמצא כי מהירות התנועה הנדרשת היא  $15.6[rpm]$  אולם, לזמן הכולל הנדרש ליירוט יש להוסיף את זמן העיבוד, את זמן ההשהיה בתגובת המנועים, את העובדה שהבלון בתנועה, שקצב התנועה של המנועים איננו באמת אחיד וכי המנועים עובדים תחת עומס. כמו כן תמיד קיימת אפשרות לסטיות מדידה קלות בעקבות אופי המדידה. לאחר שקלול כל הנתונים ולקיחת מקדם ביטחון, נדרשים מנועים בעלי יכולת תנועה של  $30[rpm]$  לפחות.



## 6.2. תוצאות ניסוי מדידת ערכי האמת של תנועת המנועים :

### 6.2.1. תוצאות הניסוי :

באופן תיאורטי ועל פי נתוני היצרן המנוע צריך לקבל פולס בתדר של 50 הרץ (20ms) כאשר החלק החיובי של הפולס נע בין 1ms (המנוע נמצא בווית 0) לבין 2ms (המנוע נמצא בזווית 180).



איור 29 - דיאגרמת זמנים לשליטה במנוע סרבו<sup>9</sup>

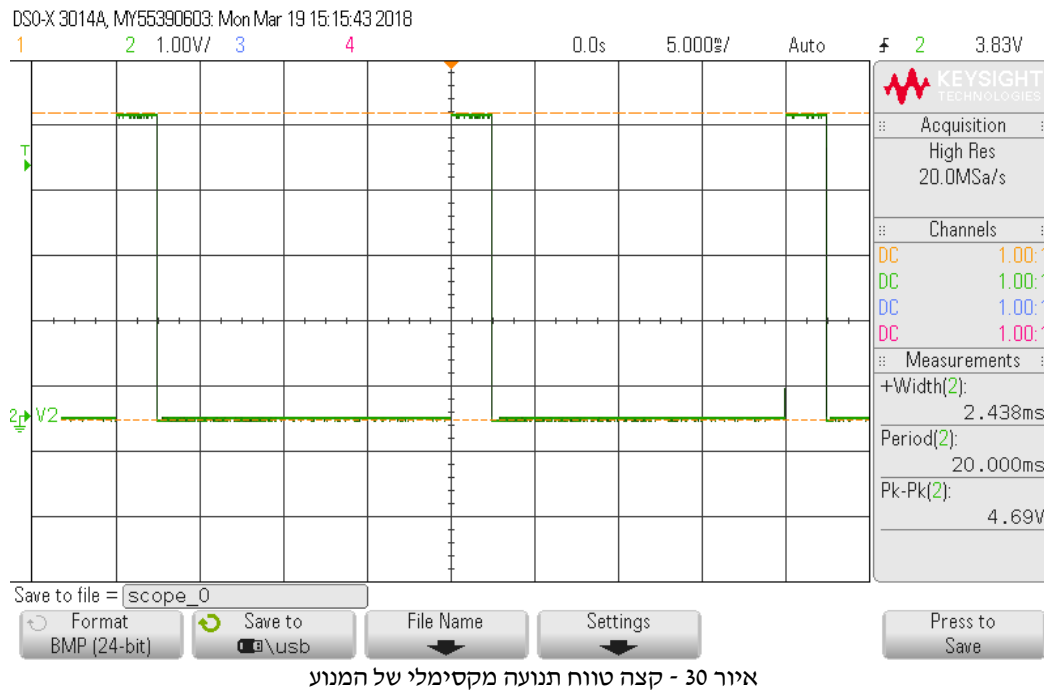
את ה-Duty Cycle הנדרש למנוע ניתן לחשב על פי הנוסחה הבאה :

נוסחה 11 - חישוב Duty Cycle

$$D.C[\%] = \frac{t_{HIGH}}{T} \cdot 100$$

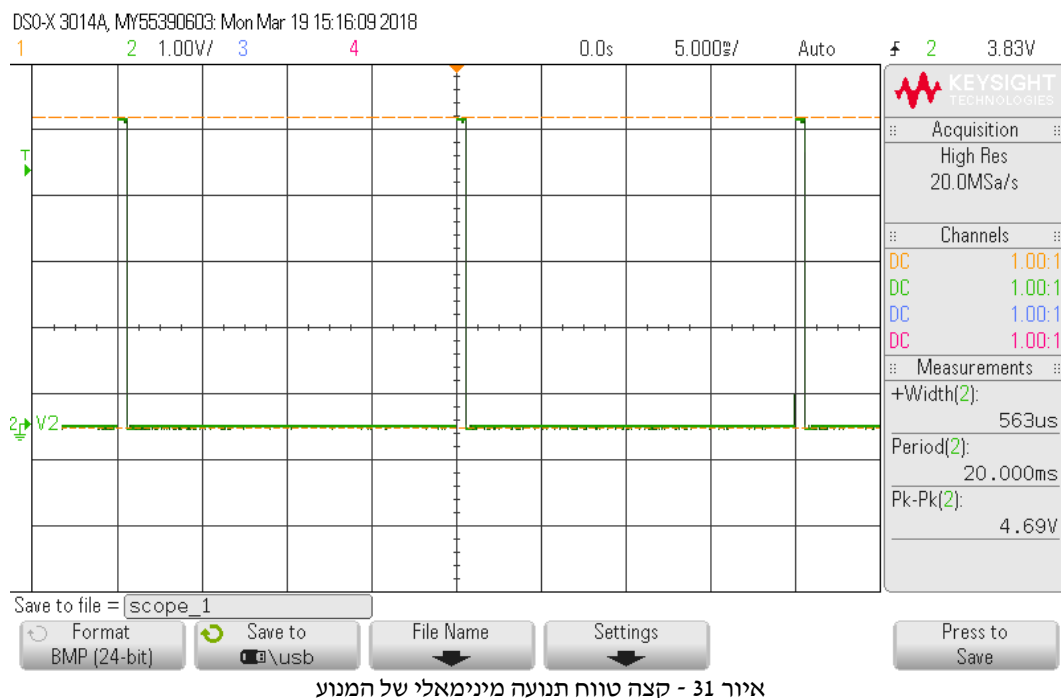
כך שעל פי נתוני היצרן נדרש Duty Cycle של 5% – 10%. המטרה הראשונית הייתה לספק באמצעות מחולל האותות במעבדה את האות המתאים, אולם, המחולל לא יכול לספק Duty Cycle מתאים (המינימום הוא 5%). לכן האות המתאים סופק בעזרת קוד ייעודי שנכתב על גבי כרטיס הפיתוח ומוצא הכרטיס נמדד בעזרת הסקופ. בשלב הראשון היה צורך למצוא מה הוא ה-Duty Cycle המינימלי והמקסימלי שבו המנועים מגיעים לקצה טווח התנועה שלהם. הבדיקה התבצעה באופן הבא : נקודת הפתיחה הייתה על פי נתוני היצרן, לאחר מכן רוחב הפולס הוגדל באופן הדרגתי עד שהמנוע הגיע לקצה טווח התנועה ולא היה שינוי נוסף במיקום המנוע. לאחר מכן רוחב הפולס הוקטן באופן הדרגתי עד שלא היה שינוי במיקום המנוע בכיוון השני.

<sup>9</sup> מתוך דף נתונים של מנוע סרבו MG90S



באיור 30 ניתן לראות את רוחב הפולס המקסימלי (זווית של 180 מעלות) מתוך כך ניתן לחשב את ה-Duty Cycle המקסימלי על פי נוסחה 11:

$$D.C = \frac{2.438[ms]}{20[ms]} \cdot 100 = 12.19\%$$



באיור 31 ניתן לראות את רוחב הפולס המינימלי (זווית של 0 מעלות) מתוך כך ניתן לחשב את ה-Duty Cycle המינימלי על פי נוסחה 11:

$$D.C = \frac{0.563[ms]}{20[ms]} \cdot 100 = 2.815\%$$

באתר הספק ובאתר היצרן לא צוינה מהי הרזולוציה (הדיוק) של המנוע, אולם מבדיקה שנעשתה התברר שהספריות הקיימות ברשת שעוסקות במנועי סרבו אנלוגיים עובדות ברזולוציה של 8 סיביות.

מכאן היה ניתן להסיק שלמנעים יש רזולוציה של 8 סיביות, כאשר הדיוק אותו ניתן להשיג מחושב על פי הנוסחה הבאה:

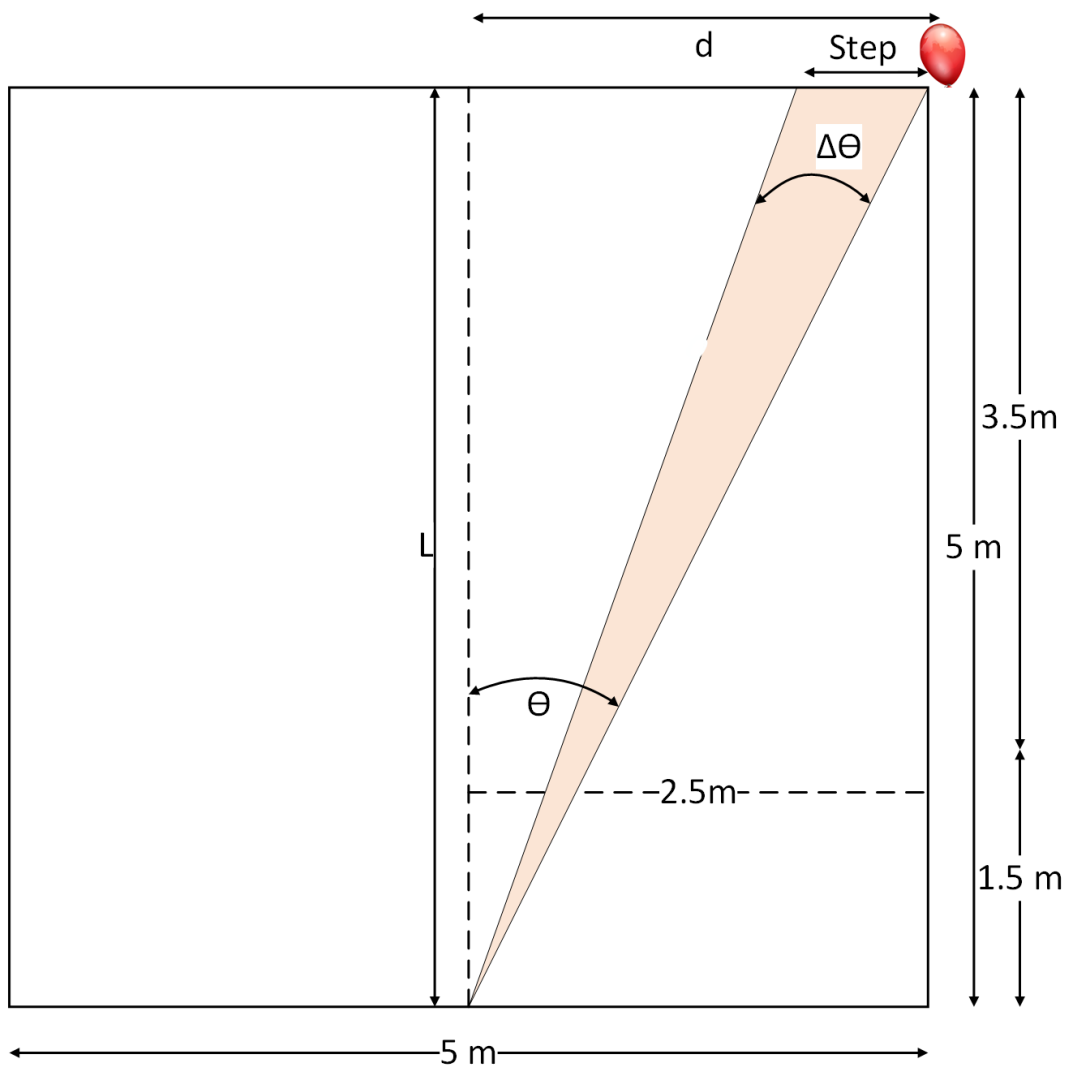
נוסחה 12 – חישוב רזולוציית מנוע

$$\text{Resolution} = \frac{180[\text{deg}]}{2^{8\text{bit}}} = 0.703[\text{deg}]$$

כדי לבדוק האם זוהי רזולוציה מספקת לגודל הצעד הנדרש ניתן להיעזר בנוסחה 13, כאשר הפרמטרים על פי איור 32.

נוסחה 13 - מציאת גודל צעד כתלות במרחק

$$\tan(\theta - \Delta\theta) = \frac{d - \text{Step}}{L} \Rightarrow \text{Step} = d - L \tan(\theta - \Delta\theta) [m]$$



איור 32 - שרטוט עזר למציאת גודל הצעד

כאשר השגיאה היא חצי מגודל הצעד הגדול ביותר (הגרוע ביותר) שיכול להיות במערכת.

לאחר הצבת מספרים נקבל :

$$d = 2.5[m], \quad L = 5[m], \quad \theta = \tan^{-1}\left(\frac{d}{L}\right), \quad \Delta\theta = \frac{180}{2^8}$$

$$Step = d - L \tan(\theta - \Delta\theta) = 2.5 - 5 \tan(26.56 - 0.703) = 0.076[m]$$

$$Step = 7.623[cm]$$

כך שזהו גודל צעד הקטן מרדיוס בלון (10 ס"מ).  
לאחר מציאת ערכי הרזולוציה הצפויה, ניתן לבצע בדיקה למציאת כושר ההבחנה האמיתי של המנועים (הרזולוציה שלהם).  
בעזרת המפסקים נשלח מיקום (ברזולוציה של 8 סיביות) כאשר מתבצעת בדיקה מהו ערך המספרי המינימלי שניתן להוסיף או להחסיר ממצב נתון, בו עדיין מתבצעת תנועה של המנועים.  
בבדיקה זו התקבל שהתנועה המינימלית של המנוע מתקבלת לאחר העלאה או הורדה של 4 צעדים. המשמעות היא שבמקום שתתקבל תזוזה של המנוע ברזולוציה

$$\text{של: } 2^{8bit}, \text{ מתקבלת תנועה רק ברזולוציה של: } 2^{6bit} \cdot \frac{2^{8bit}}{4}.$$

#### 6.2.2. מסקנות הניסוי :

במידת רוחב הפולס הדרוש להזזת המנועים התקבל כי מרווח הדיוק לשליטה ברוחב הפולס גדול מהצפוי, כך שניתן לשלוט על תנועת המנועים ביתר קלות. עבור שינוי של מעלה אחת נדרש שינוי ברוחב הפולס של :

$$\frac{2.438[ms] - 0.563[ms]}{180} = 10.41[\mu s] \text{ ולא } \frac{2[ms] - 1[ms]}{180} = 5.55[\mu s] \text{ כפי,}$$

שהיה צפוי טרם ביצוע הניסוי.

רזולוציית המנועים שהתקבלה נמוכה מהצפוי פי 4, כך שיש פגיעה בדיוק שניתן לקבל. המשמעות היא שתנועת המנועים תהיה פחות חלקה והיכולת לפגוע במטרה ולבצע עקיבה באופן רציף תקטן.

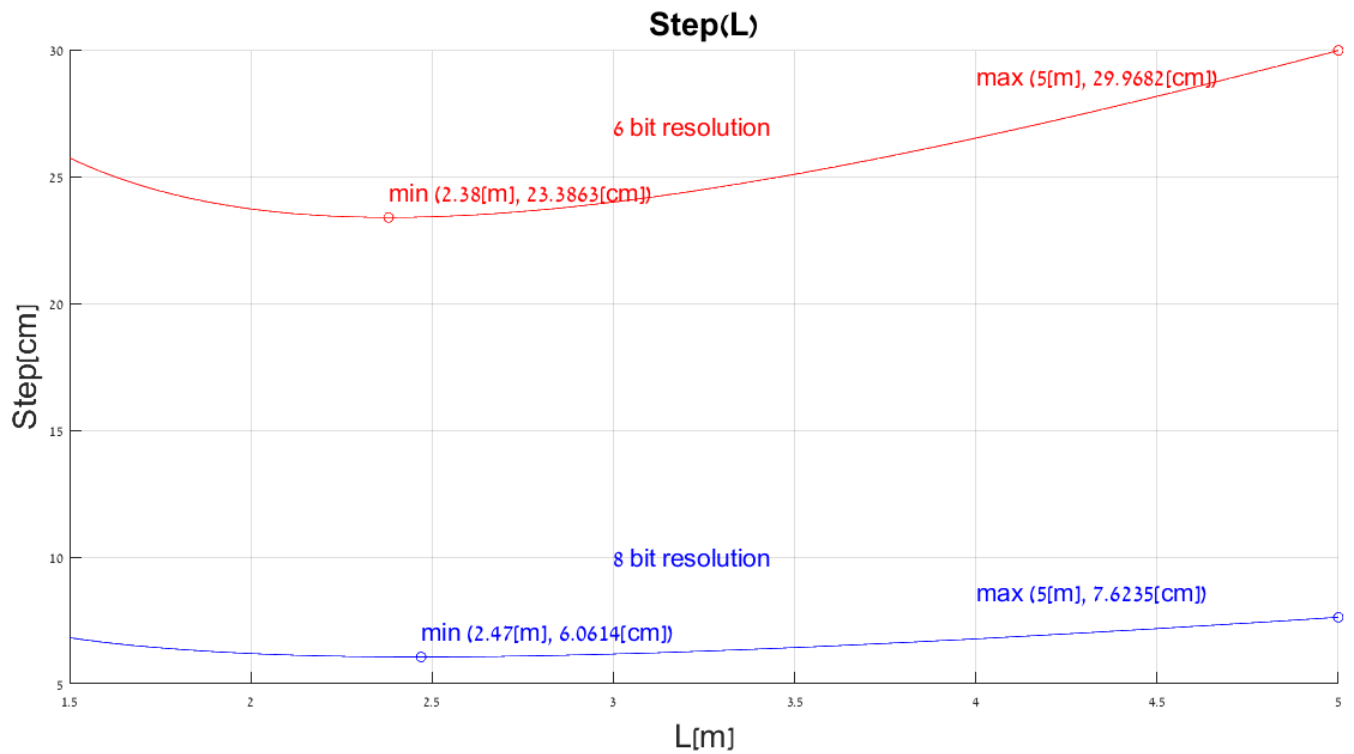
עבור רזולוציה של 6 סיביות הצפי לסטייה מקסימלית במרחק של 5 מטרים על פי נוסחה 13 המפורטת למעלה :

$$d = 2.5[m], \quad L = 5[m], \quad \theta = \tan^{-1}\left(\frac{d}{L}\right), \quad \Delta\theta = \frac{180}{2^6}$$

$$Step = 2.5 - 5 \tan(26.56 - 2.8125) = 0.299[m]$$

$$Step = 29.9[cm]$$

השינוי בגודל הצעד (המרחק בין הנקודה אליה המערכת רוצה להגיע לנקודה אליה המערכת מגיעה בפועל) גדל ככל שהמרחק מהמטרה גדל, ניתן לראות זאת בגרף הבא.



איור 33 - גרף גודל צעד כתלות במרחק ורזולוציית המנוע<sup>10</sup>

הקו האדום מראה את גודל הצעד ברזולוציית מנוע של 6 סיביות (מה שקיים בפועל).  
הקו הכחול מראה את גודל הצעד ברזולוציית מנוע של 8 סיביות (התכנון המקורי).  
כדי לפצות על חוסר הדיוק נדרש לייצר עוצמתי דיו שיכול לפוצץ את הבלון גם כאשר זמן הפגיעה קצר.

<sup>10</sup> הגרף נוצר בעזרת תוכנת Matlab ניתן לראות את הקוד בנספחים

### 6.3. תוצאות ניסוי לבדיקת תקשורת בין המחשב לכרטיס הפיתוח:

#### 6.3.1. תוצאות הניסוי:

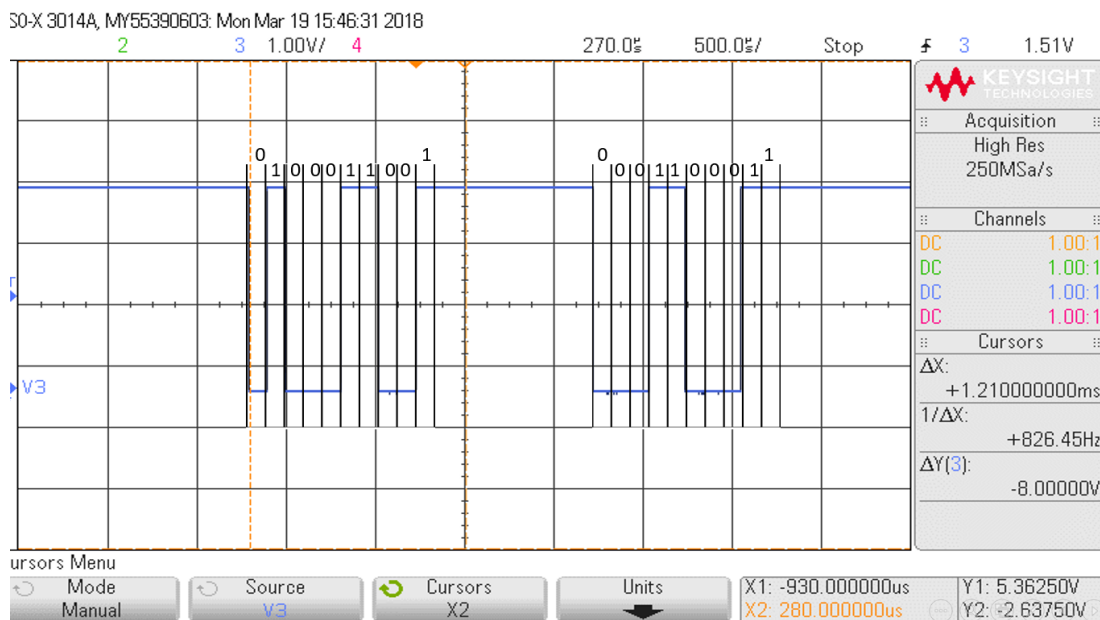
באיור 34 ניתן לראות את שידור המידע מהמחשב (באמצעות תוכנת Matlab) לכרטיס הפיתוח, באמצעות פרוטוקול תקשורת RS-232. בכדי שיהיה ניתן להבחין בסקופ באופן ברור באותות השידור, בוצעה הורדה של קצב השידור מקצב של 256000 ביט בשנייה, לקצב שידור של 9600 ביט בשנייה. באיור הנ"ל ניתן לראות שידור של 2 "מילים" אחת אחרי השנייה. המידע ששודר הוא המספר הדצימלי 49 ואחריו את המספר הדצימלי 140. לפני כל מילה יש סיבית התחלה "0" ובסוף המילה יש סיבית סיום "1". המידע נשלח החל מהסיבית הנמוכה וכלה בסיבית הגבוהה, כך שבעת הפיענוח של המידע המתקבל נדרש לבצע היפוך של סדר הסיביות.

ה"מילה" הראשונה: "0100011001" כאשר לאחר היפוך הסדר נקבל:

$49 \leftarrow 00110001$

ה"מילה" השנייה: "0001100011" כאשר לאחר היפוך הסדר נקבל:

$140 \leftarrow 10001100$



איור 34 - תקשורת בין המחשב לכרטיס הפיתוח

בנוסף לכך, נורות הLED על גבי הכרטיס נדלקו על פי המספרים שהתקבלו באופן מתאים.

#### 6.3.2. מסקנות הניסוי:

לפי תוצאות הניסוי המידע נשלח באופן תקין. לפי הדלקת נורות הLED על גבי הכרטיס המידע פוענח בכרטיס והתקבל באופן תקין. רכיב המקלט RX על גבי הכרטיס הפיתוח נכתב כנדרש.

#### 6.4. תוצאות ניסוי בדיקת מוצא כרטיס הפיתוח, אות ה-PWM:

##### 6.4.1. תוצאות הניסוי:

ניסוי זה התבצע ברזולוציה של 8 סיביות.

באיור 35 ניתן לראות את מוצא לוח הפיתוח (אות ה-PWM) כאשר האות העליון מייצג את אות הכניסה למנוע בציר X והאות התחתון מייצג את אות הכניסה למנוע בציר Y.

למנוע בציר X נשלח מיקום של  $\text{deg} = 18$  כך שהמנוע צריך לקבל אות שמשך הזמן שבו אות ה-PWM בגובה מתקבל על ידי הצבה של נוסחה 7 בתוך נוסחה 8 כך שמתקבל:

$$\text{num\_of\_period} = f_{\text{clock}} \cdot \left( t_{\text{HIGH},\text{min}} + \text{position} \cdot \frac{t_{\text{HIGH},\text{max}} - t_{\text{HIGH},\text{min}}}{2^8} \right)$$

כעת לאחר חלוקה בתדר השעון מתקבל:

$$\frac{\text{num\_of\_period}}{f_{\text{clock}}} = t = t_{\text{HIGH},\text{min}} + \text{position} \cdot \frac{t_{\text{HIGH},\text{max}} - t_{\text{HIGH},\text{min}}}{2^8}$$

בנוסף לכך, צריך להמיר מערך של 8 ביטים למעלות על פי נוסחה 9:

$$\text{position}[n \text{ bit}] = \frac{\text{pos}[\text{deg}]}{180} \cdot 2^n \Rightarrow \frac{\text{pos}[\text{deg}]}{180} = \frac{\text{position}[n \text{ bit}]}{2^n}$$

לאחר הצבה נקבל:

$$t = t_{\text{min}} + \frac{\text{pos}[\text{deg}]}{180} (t_{\text{max}} - t_{\text{min}}) [\text{ms}]$$

או לסיכום:

$$t_{\text{min}} = 0.563[\text{ms}], \quad t_{\text{max}} = 2.438[\text{ms}], \quad T = 20[\text{ms}]$$

$$t = t_{\text{min}} + \frac{\text{pos}[\text{deg}]}{180} (t_{\text{max}} - t_{\text{min}}) [\text{ms}]$$

$$D.C = \frac{t}{T} \cdot 100[\%]$$

כך שמתקבל:

$$t_{\text{min}} = 0.563[\text{ms}], \quad t_{\text{max}} = 2.438[\text{ms}], \quad T = 20[\text{ms}], \quad \text{pos} = 18[\text{deg}]$$

$$t = t_{\text{min}} + \frac{\text{pos}[\text{deg}]}{180} (t_{\text{max}} - t_{\text{min}}) [\text{ms}] = 0.563 + \frac{18}{180} (2.438 - 0.563) [\text{ms}] = 0.750[\text{ms}]$$

$$D.C = \frac{t}{T} \cdot 100 = \frac{0.750[\text{ms}]}{20[\text{ms}]} \cdot 100 = 3.752\%$$

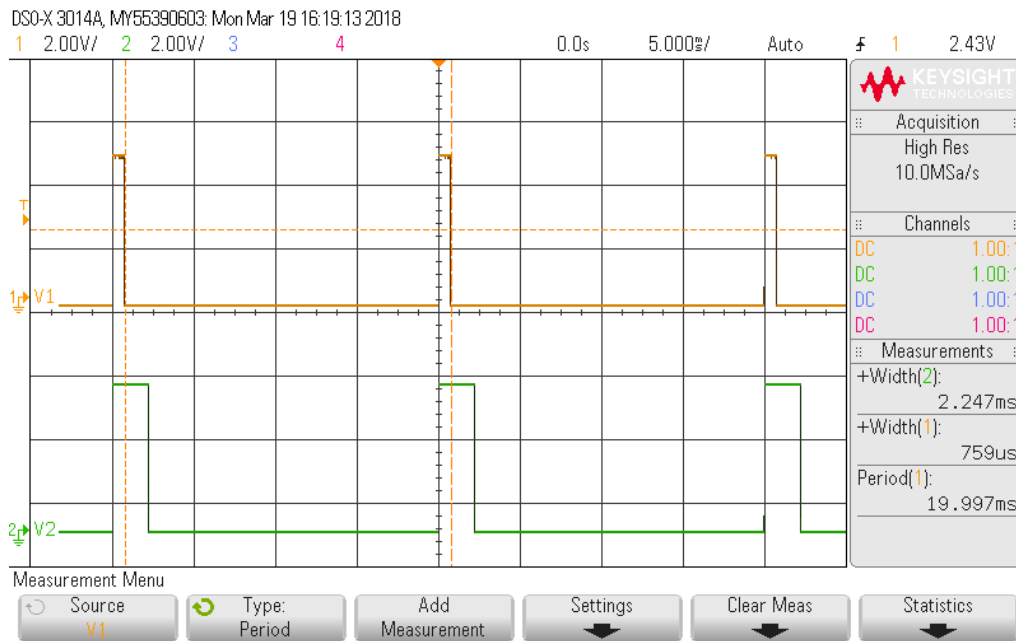
למנוע בציר Y נשלח מיקום של  $\text{deg} = 162$ , כך שלבסוף מתקבל:

$$t_{\text{min}} = 0.563[\text{ms}], \quad t_{\text{max}} = 2.438[\text{ms}], \quad T = 20[\text{ms}], \quad \text{pos} = 162[\text{deg}]$$

$$t = 0.563 + \frac{162}{180} (2.438 - 0.563) [\text{ms}] = 2.250[\text{ms}]$$

$$D.C = \frac{t}{T} \cdot 100 = \frac{2.2505[\text{ms}]}{20[\text{ms}]} \cdot 100 = 11.252\%$$

ניתן לראות את ההתאמה בין תוצאות המדידה לחישוב התיאורטי באיור 35.



איור 35 - מוצא כרטיס הפיתוח PWM

#### 6.4.2. מסקנות הניסוי :

על פי תוצאות הניסוי ניתן לראות שהקוד שמממש את המרת המידע המתקבל לאות PWM פועל באופן תקין.  
כרטיס הפיתוח יכול לספק אות PWM ברזולוציה של 8 סיביות.



## 6.5. תוצאות ניסוי לבדיקת מהירות תנועה של המנועים :

### 6.5.1. תוצאות הניסוי :

לצורך ביצוע הבדיקה נכתב קוד על גבי כרטיס הפיתוח כך שלכל מנוע הוזן ערך (בעזרת המפסקים המובנים על גבי הכרטיס) כך שהוא יזוז לזווית 0 ולאחר לחיצת כפתור, המנוע יזוז בתנועה אחת רציפה לזווית 180, בלחיצת הכפתור הבאה המנוע זז בחזרה לזווית 0.

לצורך בדיקת מהירות המנועים האפקטיבית (כאשר יש עומס) 2 המנועים צולמו בוידאו (כל מנוע בנפרד) ונספרו מספר הפריימים החולפים במהלך תנועה של המנוע על פני כל טווח התנועה שלו (180 מעלות).

את תוצאות המדידה של המנוע בציר X ניתן לראות בטבלה 6, ואת תוצאות המדידה של המנוע בציר Y ניתן לראות בטבלה 7.

חישוב מהירות התנועה התבצעה על ידי הנוסחה :

נוסחה 14 - חישוב מהירות סיבוב של מנוע

$$avg\_time(180deg) = \frac{\sum_{n=1}^N frame_{stop,n} - frame_{start,n} [frame]}{N \cdot fps \left[ \frac{frame}{sec} \right]} [sec]$$

$$RPM = \frac{1}{2 \cdot avg\_time(180deg)} \cdot \frac{60}{60} \left[ \frac{round}{sec} \right] = \frac{60}{2 \cdot avg\_time(180deg)} [rpm]$$

כך שהתקבלו עבור שני המנועים (מתוך הטבלאות מטה) :

$$avg\_time(180deg)_x = 0.855 [sec]$$

$$avg\_time(180deg)_y = 0.891 [sec]$$

$$RPM_x = \frac{60}{2 \cdot avg\_time(180deg)} = \frac{60}{2 \cdot 0.855} = 35.08 [rpm]$$

$$RPM_y = \frac{60}{2 \cdot avg\_time(180deg)} = \frac{60}{2 \cdot 0.891} = 33.67 [rpm]$$

טבלה 6 - מדידת מהירות סיבוב מנוע בציר X :

ציר X					
מדידה	פריים התחלה	פריים סוף	כמות פריימים	קצב פריימים $[sec^{-1}]$	זמן תנועה $[sec]$
1	122	146	24	29.84	0.804
2	248	276	28	29.84	0.938
3	351	380	29	29.84	0.972
4	455	478	23	29.84	0.771
5	554	581	27	29.84	0.905
6	657	684	27	29.84	0.905
7	772	795	23	29.84	0.771
8	859	883	24	29.84	0.804
9	960	983	23	29.84	0.771
10	1056	1083	27	29.84	0.905
זמן תנועה ממוצע					0.855
מהירות סיבוב (rpm)					35.106

טבלה 7 - מדידת מהירות סיבוב מנוע בציר Y :

ציר Y					
מדידה	פריים התחלה	פריים סוף	כמות פריימים	קצב פריימים $[\text{sec}^{-1}]$	זמן תנועה $[\text{sec}]$
1	183	210	27	29.84	0.905
2	301	329	28	29.84	0.938
3	407	434	27	29.84	0.905
4	529	556	27	29.84	0.905
5	641	667	26	29.84	0.871
6	749	775	26	29.84	0.871
7	838	866	28	29.84	0.938
8	941	972	31	29.84	1.039
9	1046	1067	21	29.84	0.704
10	1158	1183	25	29.84	0.838
		זמן תנועה ממוצע			
		מהירות סיבוב (rpm)			
		33.654			

#### 6.5.2. מסקנות הניסוי :

במקרה ה"גרוע" ביותר מבחינת המערכת המטרה תהיה בקצה טווח הראיה של המצלמה ובמרחק הקרוב ביותר, במקרה זה המערכת נדרשת לביצוע סיבוב של 60 מעלות.

כך שזמן התנועה הנדרש יהיה :

$$33.67[\text{rpm}] \Rightarrow \frac{33.67}{60} \left[ \frac{\text{round}}{\text{sec}} \right] \Rightarrow \frac{60}{33.67} \left[ \frac{\text{sec}}{\text{round}} \right]$$

$$\Rightarrow \frac{60}{33.67 \cdot 360} \left[ \frac{\text{sec}}{\text{deg}} \right] \Rightarrow t = \frac{\text{deg}}{6 \cdot 33.67} [\text{sec}]$$

$$t = \frac{60}{6 \cdot 33.67} = 0.297 [\text{sec}]$$

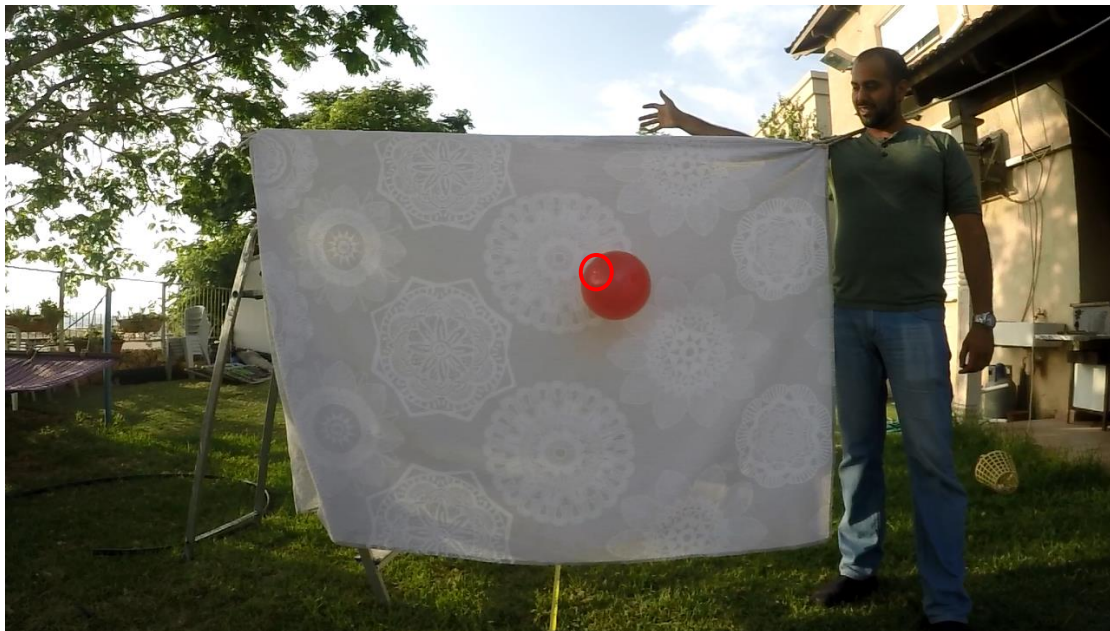
זמן הנפילה של בלון בגודל ממוצע (60 סנטימטר) למרחק של 1 מטר הוא כ-1.2 שניות, כך שתנועת המנועים מהירה דיה.

על פי נתוני היצרן (ראה סעיף 10.8 בנספחים) מהירות התנועה של המנועים (ללא עומס) היא  $43[\text{rpm}]$ .

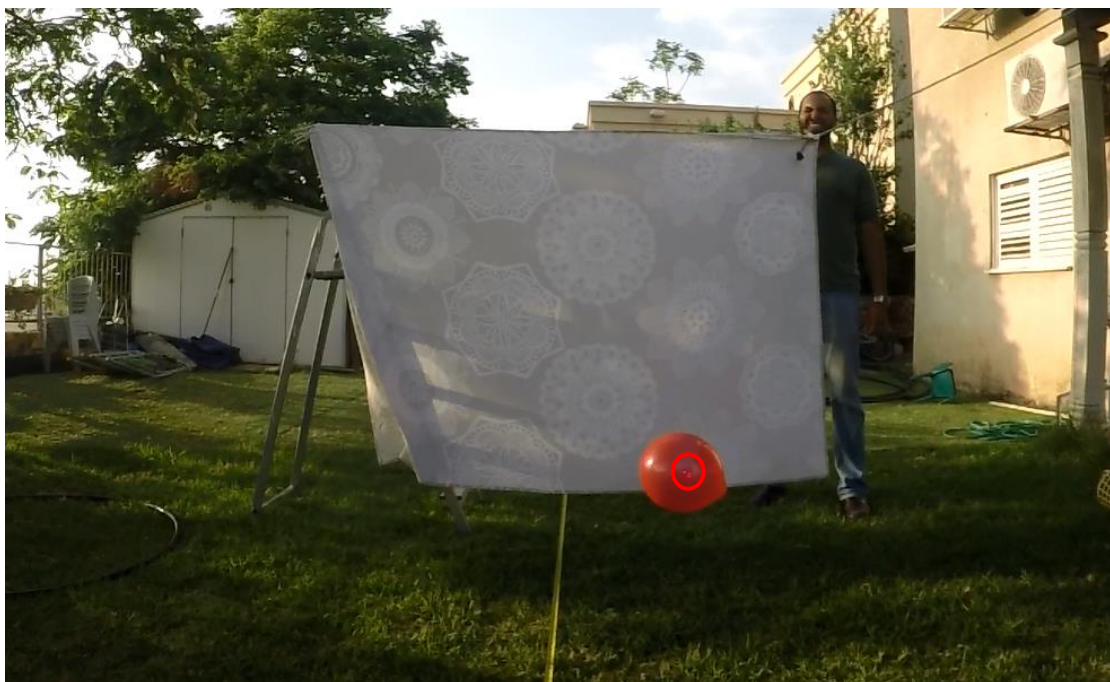
## 6.6. תוצאות ניסוי עקיבה אחרי בלון בתנועה:

### 6.6.1. תוצאות הניסוי:

לצורך ביצוע ניסוי העקיבה נעשה שימוש בבלונים שנופחו לגודל סטנדרטי - היקף של 60 ס"מ בקירוב. ביצוע המדידות נעשה במרחק 1.5, 2.5 ו-5 מטר מהמערכת במטרה לבדוק דיוק לאורך כלל המרחב המוגדר לעבודה. מאחר והמרחב בגודל המתאים היחיד היה מחוץ לבית נעשה שימוש בסדין לבן על מנת שיהיה ניתן לזהות את מיקום ציין הלייזר על הרקע. בנוסף, בוצעה הגבלה של טווח התנועה של המנועים כך שלא ייווצר מצב שהמערכת תוכל ללזור אל עבר אדם.



איור 36 - פגיעה במרחק 1.5 מטר



איור 37 - פגיעה במרחק 2.5 מטר

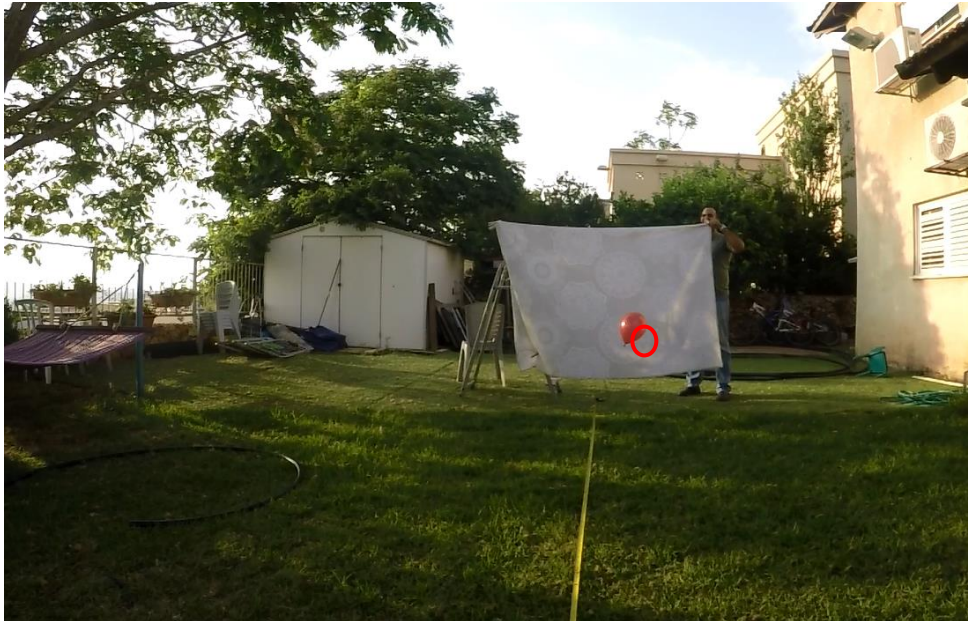


איור 38 - פגיעה של המערכת, מרחק של 5 מטר



איור 39 - תמונת תקריב של הפגיעה, מרחק 5 מטר





איור 40 - החטאה במרחק 5 מטר

באיור איור 40 ניתן לראות החטאה של המערכת במרחק 5 מטר, בהמשך הנפילה המערכת הצליחה להתמקד על הבלון.  
מרחק הסטייה המשוער במקרה זה הוא של 20 ס"מ ממרכז המטרה, כך שזוהי סטייה של 10 ס"מ יותר מהמרחק שתוכנן מלכתחילה.



איור 41 - תמונת תקריב של החטאה, מרחק 5 מטר

באיור זה ניתן לראות תקריב של החטאה, ניתן להבחין בבירור בפגיעת קרן הלייזר לצד בלון המטרה.

בגלל אופן ההרכבה של המצלמה על גבי המנועים כך שהמצלמה מבצעת תנועה ביחד עם הלייזר יש צורך לבצע "איפוס כוונות", כלומר, הלייזר צריך להיות מכוון למרכז הפריים של המצלמה. התוכנה מניעה את המנועים כך שהם תמיד יכוונו את המצלמה למרכז הפריים, ומתוך כך גם הלייזר יזוז בהתאם.

#### 6.6.2. מסקנות הניסוי :

ניתן לראות כי המערכת מבצעת עקיבה באופן תקין.  
עקב חוסר הדיוק של המנועים, המערכת לא מצליחה לעקוב אחר הבלון בכל משך תנועתו, אך גם לאחר פספוס של המטרה המערכת מכוונת את עצמה חזרה על הבלון.  
בכל ניסיון של זריקת בלון המערכת הצליחה לפגוע לפחות פעם אחת (ולרוב גם יותר) בבלון.

טרם מציאת הפתרון של הרכבת המצלמה על גבי המנועים (מצלמה נייחת) סטיית הלייזר גדלה ככל שהאובייקט היה רחוק ממרכז הפריים.  
על פי תוצאות הניסוי נמצא כי הרכבת המצלמה על גבי המנועים אכן עזרה לצמצם את הסטיות בין המרחב הממשי התלת-ממדי למרחב הווירטואלי הדו-ממדי.

## 7. מסקנות הפרויקט:

### 7.1. עיבוד התמונה:

עיבוד התמונה מתבצע במחשב נייד סטנדרטי. שימוש במחשב ותוכנה ייעודית לעיבוד תמונה יכולים לקצר את זמן העיבוד הכולל של המערכת כך שיהיה ניתן לעבוד ברזולוציות יותר גבוהות ולשפר את היכולת להבחין ולפגוע במטרות שנמצאות בטווחים יותר גדולים.

### 7.2. מערכת הנעה – מנועי סרבו:

מתוצאת ניסוי "מדידת ערכי אמת של המנועים" נמצא כי רגישות המנועים לסף תנועה

מצוי ב-6 סיביות (ולא 8 סיביות)  $(\Delta D.C = \frac{2.438 - 0.563}{20 \cdot 2^6} \cdot 100 = 0.146\%)$ , כך שדיוק

המנועים נמוך פי 4 מהצפוי (במקום  $\Delta D.C = 0.036\%$ ).

הפגיעה העיקרית עקב חוסר הדיוק היא יכולת הנעילה והמעקב אחר המטרה כאשר כל סטייה קטנה בדיוק המנוע יוצרת סטייה של הלייזר מהמטרה וקפיצות בתנועת המערכת, ככל שהטווח מהמטרה גדל גם הסטייה גדלה. כדי לפצות על כך יש להשתמש בלייזר בעל הספק יותר גדול, כך שלמרות שמשך הפגיעה של הלייזר במטרה יורד, המערכת עדיין תוכל לבצע את תפקידה.

מאחר ושתי הסיביות הנמוכות אינן משפיעות על תנועת המנועים, הוחלט להשתמש בסיביות אלו לצורך הגדרת כתובת של המנוע אליו נשלח המידע כך שניתן לשלוח "מילה" אחת שמכילה בתוכה גם את הכתובת (המנוע) המתאימה וגם את המידע. (ראה טבלה 4 - Servo Data Bit Map).

הצורך לבצע הפרדה בין המידע שמיועד למנוע בציר X למידע שמיועד למנוע בציר Y הוא חלק קריטי בפעולה תקינה של המערכת, השימוש בשני הסיביות הנמוכות (כתוצאה מחוסר הרגישות של המנועים) לצורך הגדרת המנוע אליו נשלח המידע מקטין את כמות המידע שיש לשלוח ועקב כך גם זמן השליחה קטן ב-50% לפחות. לולא השימוש בסיביות הללו, היה צורך לשלוח מידע למערכת בשני חלקים – בחלק אחד את הכתובת של המנוע הרלוונטי ובחלק השני את הקורדינטות המתאימות לאותו מנוע, כאשר נדרש לתת מענה לתקלות תקשורת כך שיש לבנות גם מערכת בקרה שהמידע נשלח באופן תקין.

### 7.3. מערכת היירוט - לייזר:

קיימת חשיבות רבה ללייזר הנבחר – לאחר ביצוע החישובים המקדימים על מנת לנתח מהו הלייזר הנדרש לפרויקט נמצא כי עוצמת הלייזר מהווה פקטור לא פחות חשוב מדיוק המערכת. ישנם שני אלמנטים מרכזיים שיש לשים לב אליהם בשלב בחירת הלייזר.

7.3.1. אורכי גל – מאחר והמטרה מוגדרת כבלון אדום ומטעמי בטיחות ונוחות כיוול, עדיף להשתמש בלייזר הפועל בטווח האור הנראה, יש עדיפות ללייזר בתחום אורך הגל הכחול (450-495 nm) או הירוק (495-570 nm) כך שמירב ההספק יעבור לבלון ויגרום לפיצוץ (הבלון נראה אדום כי הוא בולע את אורכי הגל האחרים בטווח הנראה, לכן אורך גל אדום מוחזר בשיעור הגבוה ביותר, ויהיה פחות אפקטיבי לחימום הבלון מאורכי גל קצרים יותר).

7.3.2. עוצמת הלייזר – לאחר שלב התכנון התיאורטי הוסק כי ישנו צורך בלייזר בעל הספק של כ-  $500[mW]$  לפחות, כאשר לצורך פיצוץ בלון בתנועה ככל הנראה יהיה צורך בהספק גבוה מכך, אולם בגלל שלבסוף לא היה ניתן להשגיל לייזר מהאוניברסיטה לא נעשו בדיקות כדי לבסס השערה זו.

#### 7.4. שימוש בכרטיס Altera :

- 7.4.1. כרטיס הפיתוח שנעשה בו שימוש במהלך ביצוע הפרויקט מכיל יכולות רבות מעבר לנדרש (קבלת מידע מהמחשב, הזזת מנועים, מיתוג וקבלת קלט מהמשתמש), וניתן להוזיל עלויות בעזרת שימוש בכרטיסים/ בקרים אחרים וזולים יותר.
- 7.4.2. יתרונו הגדול של הכרטיס הוא היכולת לבצע הזזה מקבילית של שני המנועים ללא תלות אחד בשני (למרות שהמידע מתקבל באופן טורי).
- 7.4.3. לצורך למידה והעמקה בשפת VHDL ומימוש המערכת, השימוש בכרטיס הפיתוח היה בחירה טובה.



## 8. סיכום:

### 8.1. כללי:

הצלחה בפרויקט הוגדרה כהצלחה לפוצץ בלון בתנועה באמצעות הלייזר. בגלל שלבסוף לא היה ניתן להשאיל לייזר לא היה ניתן לבצע פיצוץ של בלון בפועל. אולם כלל תתי המערכות והקודים שנכתבו עובדים כנדרש. יכולת העקיבה אחרי מטרה נעה הוגדרה כהצלחה. כל הרכיבים שנרכשו היו תקינים וטרם למועד קבלתם נכתב קוד ראשוני לבדיקה ותוכנה/ הורכבה מערכת ניסוי לבדיקה של הרכיבים, כך שלא יתבזבזו זמן מיותר ויהיה ניתן לבצע בדיקות בהקדם האפשרי. ניהול הזמן וחלוקת העבודה במהלך ביצוע הפרויקט בוצע בצורה טובה.

- 8.1.1. ביצוע עיבוד תמונה בזמן מינימאלי - שלב זיהוי המטרה הינו אבן הדרך הראשונה בביצוע הפרויקט כאשר הדגש העיקרי הוא על זמן עיבוד התמונה. טווח הזמן שהוגדר על מנת לזהות מטרה היה כ-0.1 שניות ואילו זמן עיבוד התמונה הסופי של המערכת הוא בין 0.03-0.05 שניות.
- 8.1.2. ביצוע מעקב רציף אחרי אובייקט המטרה - אבן דרך שנייה בפרויקט הינה ביצוע מעקב רציף אחרי אובייקט המטרה בצורה מדויקת. טווח הסטייה שהוגדר לצורך מעקב הוא 0.7 מעלות ואילו בעקבות חוסר הדיוק של המנועים טווח הסטייה של המערכת הוא 2.8 מעלות. הסטייה אומנם גדולה מהצפוי אך למרות זאת בכל הבדיקות הייתה לפחות פעם אחת (לרוב יותר) שבה הלייזר פגע בבלון המטרה.
- 8.1.3. יירוט מוצלח של מטרה בתנועה - אבן הדרך האחרונה בפרויקט היא היכולת לבצע יירוט מוצלח של המטרה, בגלל שלבסוף לא היה ניתן להשאיל לייזר לא בוצע חלק זה של הניסוי ולא בוצע יירוט בפועל.

### 8.2. אילוצים:

- מאחר ומדובר בפרויקט גמר המתקרב על ידי האוניברסיטה וישנם מגבלות תקציב משמעותיות, בוצעו מספר פשרות בתחום הרכש כאשר הרכיבים העיקריים שנפגעו היו המנועים:
- 8.2.1. המנועים שהוזמנו כללו ערכה להרכבת מערכת Pan-Tilt בעלות כוללת של כ-50\$ אל מול המנועים הדיגיטליים שנשקלו בחיוב אך עלו כ-45\$ למנוע – ללא ערכת הרכבה Pan-Tilt (תוספת תשלום של כ-20\$, כך שהעלות הנדרשת היא כ-110\$ לפני עלויות משלוח).
  - המנועים היקרים שלא נבחרו לבסוף, הם מנועים דיגיטליים כך שבנוסף היה צורך לבנות עבורם פרוטוקול תקשורת מהיסוד (קיים לשפת C אך לא לשפת VHDL).

### 8.3. דרכים לשיפור המערכת:

- כדי לייעל את פעולת המערכת ניתן לבצע מספר שינויים קלים, כך שהמערכת תוכל לבצע את פעולתה בדיוק גבוה ואף יהיה ניתן לבצע בה שימוש בשטח לביצוע יירוט של מטרות שונות.
- 8.3.1. מצלמה - מבחינת רזולוציה מדובר ברזולוציה של Full HD, כלומר רזולוציה של 1080/50i/60i/50p/60p, איכות תמונה זו היא האיכות הנתמכת כרגע בשוק ויהיה סביר למצוא מערכת המסוגלת לעמוד בדרישה של דחיסה מידע ברזולוציה זו בזמן אמת, ככל שרזולוציית המערכת עולה גם זמן העיבוד הנדרש עולה בהתאם. שימוש במצלמה בעלת יכולת ביצוע הגדלה (זום) אופטית תאפשר שימוש בטווחים יותר גדולים, אך הדבר ידרוש ביצוע התאמות בקוד כדי לקחת בחשבון את השינוי בפריימים (תזוזת המנועים צריכה להיות עדינה ככל שמתבצע שימוש בזום יותר חזק).
  - בנוסף הגדלת זווית הראייה של המצלמה תשפר את טווח הזיהוי של המערכת.
  - 8.3.2. עיבוד תמונה – בפרויקט זה, המטרה שהוגדרה הייתה בלון, עצם שקשה לזהות בשיטות עיבוד תמונה בסיסיות (מאחר ובלון הוא בעל מרקם אחיד ופני השטח שלו

מייצרים השתקפות של האור הפוגע בו), כך ששיטות זיהוי מבוססות פיצ'רים מתקשות למצוא נקודות למעקב, בנוסף, עיבוד תמונה מבוסס פיצ'רים לוקח זמן יחסית ארוך (מספר שניות בודדות), כך שלא ניתן לעשות בו שימוש בטווחים קצרים או לצורך מעקב אחר מטרות מהירות, אולם ניתן לבצע באמצעותו מעקב אחרי מגוון גדול של מטרות אחרות ברמת דיוק גבוהה. אלמנט נוסף בעיבוד התמונה הוא החומרה – בפרויקט בוצע עיבוד תמונה על בסיס מחשב נייד סטנדרטי ותוכנת Matlab, שהיא תוכנה וורסטילית מאוד ונוחה לשימוש, אך קיימות שיטות אחרות לביצוע עיבוד תמונה באופן יעיל ומהיר יותר (שימוש ביחידות Graphic Processing Unit – GPU כדי לאפשר עיבוד מקבילי, או שימוש בתוכנות עיבוד תמונה ייעודיות כך שאופן פעולתן יהיה יותר מהיר).

8.3.3. מנועים – החלפת המנועים למנועי סרבו דיגיטליים בעלי דיוק משופר תגדיל את יכולת המערכת לבצע עקיבה מדויקת אחרי מטרות. במידה ונרצה לבצע עקיבה אחרי מטרות במרחק גדול (מעל 30 מטר) יהיה צורך לתכנן מחדש את מערכת ההנעה של הלייזר באופן אחר שיבטיח דיוק גם במרחקים גדולים (מנועי צעדים), אולם יש לקחת בחשבון שכאשר אנו משפרים את הדיוק הפרמטר הראשון שנפגע הוא מהירות התנועה של המערכת.

8.4. השוואה בין מערכות:  
פרויקט זה כלל תכנון וביצוע של מערכת יירוט בלייזר הדומה למערכת "נאוטילוס" הצבאית שפותחה בעבר ונועדה לבצע יירוט של טילי אויב באמצעות לייזר רב עוצמה. בטבלה הנ"ל ניתן לראות השוואה בין המערכות.

טבלה 8 - השוואה בין מערכת ה"נאוטילוס" לבין "מערכת יירוט בלונים":

פרמטר	מערכת "נאוטילוס" <sup>11</sup>	מערכת יירוט בלונים
סוג לייזר	כימי	חשמלי
אורך גל	4 מיקרון	405 nm
הספק	2 מגה-וואט	0.5 וואט לפחות
טווח אפקטיביות	קילומטרים בודדים עד כ-10 קילומטרים. עד כ-15 קילומטרים בהינתן אופטיקה אדפטיבית	1.5 מטר עד 5 מטרים
מרווח בין הפעלה להפעלה	שנייה	רציף
"גודל מחסנית"	50	לא מוגבל
ניידות	מערכת ניידת	מערכת ניידת

<sup>11</sup> מתוך וויקיפדיה

## 9. רשימות:

### 9.1. סימונים וקיצורים:

טבלה 9 - רשימת סימונים וקיצורים:

מס"ד	סימן	הגדרה	יחידות
1	Baud Rate	קצב שידור מידע דיגיטלי	$\left[ \frac{bits}{sec} \right]$
2	D.C Duty Cycle	מחזור פעילות	$[\%]$
3	fps	קצב פריימים לשנייה	$\left[ \frac{frame}{sec} \right]$
4	V	מתח	$[V]$
5	I	זרם	$[A]$
6	R	התנגדות	$[\Omega]$
7	P	הספק	$[W]$
8	f	תדר	$\left[ \frac{1}{sec} \right] = [Hz]$
9	RPM	סיבובי מנוע לדקה	$\left[ \frac{rotation}{min} \right]$
10	t	זמן	$[sec]$
11	T	זמן מחזור	$[sec]$

### 9.2. רשימת נוסחאות:

- 12 ..... נוסחה 1 - חישוב שטח של פיקסל כתלות ברזולוציה ומרחק  
 12 ..... נוסחה 2 - חישוב כמות פיקסלים בתא שטח  
 20 ..... נוסחה 3 - חוק אוהם  
 20 ..... נוסחה 4 - חישוב הספק חשמלי  
 26 ..... נוסחה 5 - חישוב גודל צעד נדרש Matlab  
 32 ..... נוסחה 6 - חישוב ערך PESCL של הרכיב המקלט - RX  
 33 ..... נוסחה 7 - חישוב מספר פעימות שעון נדרשות למנייה  
 33 ..... נוסחה 8 - חישוב כמות מחזורים נדרשת למנייה  
 34 ..... נוסחה 9 - המרת זווית לערך של  $\theta$  ביטים  
 39 ..... נוסחה 10 - המרה ממעלות לשנייה לסיבובים לדקה  
 41 ..... נוסחה 11 - חישוב Duty Cycle  
 43 ..... נוסחה 12 - חישוב רזולוציית מנוע  
 43 ..... נוסחה 13 - מציאת גודל צעד כתלות במרחק  
 49 ..... נוסחה 14 - חישוב מהירות סיבוב של מנוע

### 9.3. רשימת טבלאות:

20	טבלה 1 - צריכת זרם של המערכת
25	טבלה 2 - קבועים בקוד Matlab
25	טבלה 3 - אובייקטים בקוד Matlab
31	טבלה 4 - פירוט סיביות מידע, פרוטוקול תקשורת RS-232
40	טבלה 5 - תוצאות מדידה זמן נפילת בלון
49	טבלה 6 - מדידת מהירות סיבוב מנוע בציר X
50	טבלה 7 - מדידת מהירות סיבוב מנוע בציר Y
58	טבלה 8 - השוואה בין מערכת ה"נאוטילוס" לבין "מערכת יירוט בלונים"
59	טבלה 9 - רשימת סימונים וקיצורים
62	טבלה 10 - עלויות הפרויקט – רכיבים שנרכשו
62	טבלה 11 - אופציות רכש למצלמת רשת
62	טבלה 12 - אופציות רכש למנועי servo
63	טבלה 13 - שינוי אפיון רכיבים כתלות בחומרה קיימת בשוק ותקציב
63	טבלה 14 - חלוקת משימות ולוחות זמנים
64	טבלה 15 - נגדים
64	טבלה 16 - רכיבים נוספים
65	טבלה 17 - חיבור פינים פנימי כרטיס Altera לחיבור UART
67	טבלה 18 - מפת חיבורים בין כרטיס Altera ללוח ההלחמה

#### 9.4. רשימת איורים:

6	איור 1 - מערכת "נאוטילוס"
6	איור 2 - פעולת מערכת "נאוטילוס"
10	איור 3 - תמונה של גב המערכת - 1
10	איור 4 - תמונה של חזית המערכת
11	איור 5 - תמונה של גב המערכת - 2
16	איור 6 - דיאגרמת בלוקים של המערכת
17	איור 7 - סכמת חיבורים ומתחים כללית
17	איור 8 - סכמה חשמלית עבור Shifter
18	איור 9 - סכמה חשמלית עבור DC-DC Converter
18	איור 10 - שרטוט חשמלי עקרוני של מעגל המרת מתח DC-DC
19	איור 11 - סכמה חשמלית מפורטת של המערכת
19	איור 12 - לוח מולחם, מבט מלמעלה
20	איור 13 - לוח מולחם, מבט מלמטה
22	איור 14 - תרשים זרימה לוגי כולל של פעולת המערכת
23	איור 15 - תרשים זרימה לוגי - Matlab
24	איור 16 - תרשים זרימה לוגי - Altera
27	איור 17 - חילוץ גווני אדום, ירוק וכחול מהפריים
28	איור 18 - חילוץ גווני אדום מהפריים, המרה לתמונה בינארית וניקוי רעשים (מתוך Matlab)
29	איור 19 - סכמה של התוכנית הראשית
30	איור 20 - תרשים זרימה לוגי - Process(RX_BUSY)
30	איור 21 - תרשים זרימה לוגי - קומפוננטה RX
31	איור 22 - סכמת קומפוננטה RX
32	איור 23 - תרשים זרימה לוגי - קומפוננטה PWM Generator
33	איור 24 - סכמת קומפוננטה PWM Generator
35	איור 25 - תרשים זרימה לוגי - קומפוננטה MS_Counter
35	איור 26 - סכמת קומפוננטה Ms_Counter
38	איור 27 - צילום מערכת הניסוי, נפילת בלון
39	איור 28 - שרטוט של מערכת הניסוי
41	איור 29 - דיאגרמת זמנים לשליטה במנוע סרבו
42	איור 30 - קצה טווח תנועה מקסימלי של המנוע
42	איור 31 - קצה טווח תנועה מינימאלי של המנוע
43	איור 32 - שרטוט עזר למציאת גודל הצעד
45	איור 33 - גרף גודל צעד כתלות במרחק ורזולוציית המנוע
46	איור 34 - תקשורת בין המחשב לכרטיס הפיתוח
48	איור 35 - מוצא כרטיס הפיתוח PWM
51	איור 36 - פגיעה במרחק 1.5 מטר
51	איור 37 - פגיעה במרחק 2.5 מטר
52	איור 38 - פגיעה של המערכת, מרחק של 5 מטר
52	איור 39 - תמונת תקריב של הפגיעה, מרחק 5 מטר
53	איור 40 - החטאה במרחק 5 מטר
53	איור 41 - תמונת תקריב של ההחטאה, מרחק 5 מטר
65	איור 42 - מבנה חיבור כבל RS-232 UART
66	איור 43 - מחבר 40 פינים על כרטיס ה-Altera
66	איור 44 - סכמת חיבורים קונקטור 22 פינים

## 10. נספחים:

### 10.1. תקציב הפרויקט:

טבלה 10 - עלויות הפרויקט – רכיבים שנרכשו:

Product name	Manufacturer	Supplier	Price (NIS)	Quantity	Tot. Price (NIS)
Widcam F100	Genius	Genius CA, USA	215.11	1	215.11
Pan Tilt Kit	RobotGeek	RobotGeek	220.82	1	220.82
DC-DC Converter	N/A	Ebay	2.8	6	16.8
				<b>Subtotal (NIS)</b>	<b>435.93</b>

בנוסף נעשה שימוש ברכיבים וחומרים שלא נרכשו, אלא היו באוניברסיטה/ בבית (כרטיס פיתוח DE2-115, ממסר 4 יציאות, מפסקים, נגדים, רכיב Shifter CD4504BE, לוח הלחמה, חוטים, מחברים, ספק כח ועוד).

### 10.2. אופציות רכש לרכיבים (בשלב הפיתוח):

טבלה 11 - אופציות רכש למצלמת רשת:

Product name	Manufacturer	Interface	Wide Angle [Deg]	Resolution	Supply time	Price	Status	Description
Kinect	Microsoft	USB (Not included)	57	640*480 @ 30 FPS	Immediately	600 NIS		High Price, Low Angle
Pro Webcam	Logitech	USB	90	1080p Full HD @ 30 FPS	14 Days	350 NIS		High Price
Conference Cam BCC950	Logitech	USB	78	1080p Full HD @ 30 FPS	7 Days	950 NIS		High Price, Low Angle
MEETUP	Logitech	USB	120	4K UHD @ 30 FPS	14 Days	899 USD		High Price
WideCam F100	Genius	USB	120	1080p Full HD @ 30 FPS	30 Days US Shipping	60 USD	Purchased - Arrives mid Jan.	

### טבלה 12 - אופציות רכש למנועי servo:

Product name	Manufacturer	Comm. type	Speed @ 6V [RPM]	Accuracy [Deg]	Motion Range [Deg]	Pan-Tilt Assembly	Supply time	Price [USD]	Status	Description
AX-12	Dynamixel	Digital	59	0.29	300	Optional - sold separately	30 Days	44.9		Digital communication
ASM-RGS-12	RobotGeek	Analog	43	N/A	180	Optional - sold separately	30 Days	24.95		2x units are included in Pan-Tilt Kit
<b>ASM-RG-PANTILT</b>	RobotGeek						30 Days	49.95	Purchased - Arrives mid Jan.	<b>Include 2x ASM-RGS-12</b>
HD-6001HB	Power HD	Analog	71.5	N/A	160	N/A	5-10 Days	19.95		Will need to fabricate Pan-Tilt system
HS-645MG	Hitec	Analog	50	N/A	197	N/A	30 Days	39.99		Will need to fabricate Pan-Tilt system

### 10.3. רכיבים נדרשים - דרישות טכניות - שינויים מאפיון ראשוני :

בתכנון המקורי של המערכת נקבעו דרישות טכניות רצויות, לאחר בחינת מגוון האופציות האפשריות לרכיבים השונים בוצעו שינויים קלים בדרישות הטכניות של המערכת.  
בטבלה מטה מפורטים השינויים שנעשו בפרמטרים בהם המערכת צריכה לעמוד וסיבת השינוי.

טבלה 13 - שינוי אפיון רכיבים כתלות בחומרה קיימת בשוק ותקציב :

מס"ד	הרכיב שהשתנה	פרמטר ששונה		סיבה
		ערך קודם	ערך חדש	
1	מצלמה – זווית צפייה	140 מעלות	120 מעלות	לא קיימות בשוק מצלמות בעלות זווית צפייה של 140 מעלות העומדת בדרישות התקציב.
2	מנועים - דיוק	0.716[deg]	כ-2.8[deg]	עלות גבוהה של מנועים דיגיטליים (כ-45\$ למנוע לפני עלויות משלוח ומתאמים להרכבה)
3	מנועים - מהירות	58.5 RPM	43 RPM	
4	טווח פעולה	מרחק : 1 עד 5 מטר. רוחב 2.5 מטרים לצדדים. גובה של 3 מטר	נק' זיהוי של המערכת ברוחב מקסימלי תהיה במרחק 1.5 מטר	מרחב פעולה אפשרי עקב זווית הראייה של המצלמה

### 10.4. אבני דרך לביצוע פרויקט גמר :

הנחת היסוד היא שגורם העיכוב המרכזי יהיה אינטגרציה בין המערכות והרכיבים השונים. לצורך כך יש לבצע אפיון של דרישות המינימום מרכיבי המערכת כך שבעת כתיבת התוכנה יהיו כמה שפחות תיקונים עקב רכישת רכיב לא מתאים.

טבלה 14 - חלוקת משימות ולוחות זמנים :

מס"ד	שלבי עבודה		דרישות מיוחדות	תאריך יעד	סטאטוס
	אסף	גיא			
1	א. תכנון ראשוני של הפרויקט ב. קביעת חומרה נדרשת והזמנתה		הזמנת רכיבי המערכת בדגש על מצלמה ומערכת הינע למראות	1.12.17	בוצע
2	כתיבת קוד בסביבת Matlab	כתיבת קוד בסביבת VHDL להפעלת מע' ההינע		1.2.18	בוצע
3	לצורך עיבוד תמונה בזמן אמת	תכנון מע' חשמלית תומכת ובניית סביבת עבודה	הרכבת כלל הרכיבים של תתי המערכות	1.3.18	בוצע
4	אינטגרציה בין המחשב ללוח הפיתוח ומע' ההינע		ביצוע בדיקות	1.4.18	בוצע
5	הרכבת המערכת הכוללת וקיבוע		ביצוע בדיקות	1.5.18	בוצע
6	הגשת ספר פרויקט			15.7.18	בוצע
7	הצגת הפרויקט			20.7.18	

10.5. רשימת רכיבים:

טבלה 15 - נגדים:

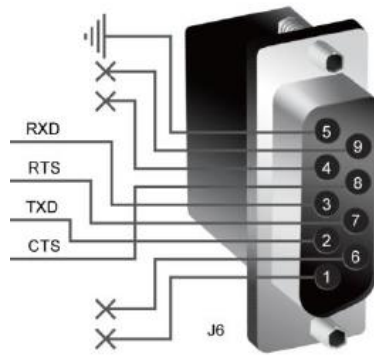
Resistor table		
Value [ $\Omega$ ]	Quantity	Name
100	2	R2, R3
1000	2	R1, R4

טבלה 16 - רכיבים נוספים:

Components List		
Type	Quantity	Name
Shift Switch	2	SW1, SW2, P_SW
Push Button	1	PB1
Led	2	L1, L2
Shifter	1	Shifter
Quad Relay	1	Quad Relay
22 Pin Connector	1	22 Pin Conn.
DC-DC Convertor	5	DC-DC Convertor 1
		DC-DC Convertor 2
		DC-DC Convertor 3
		DC-DC Convertor 4
		DC-DC Convertor 5



10.6. חיבור של כבל תקשורת RS-232 לכרטיס Altera:

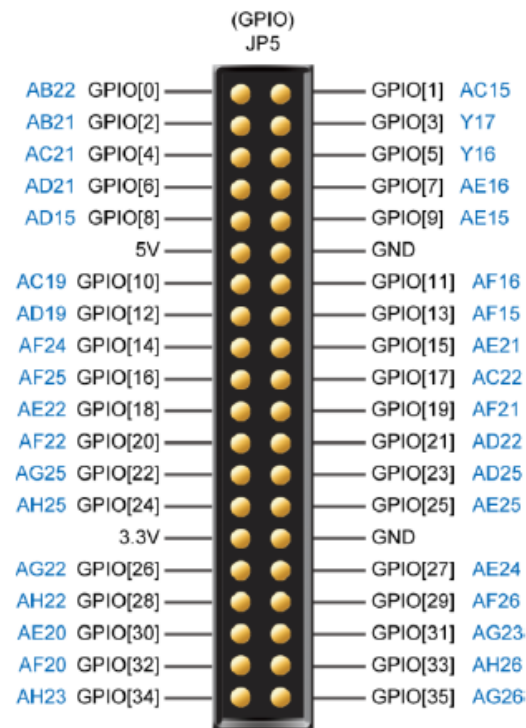


איור 42 - מבנה חיבור כבל RS-232 UART

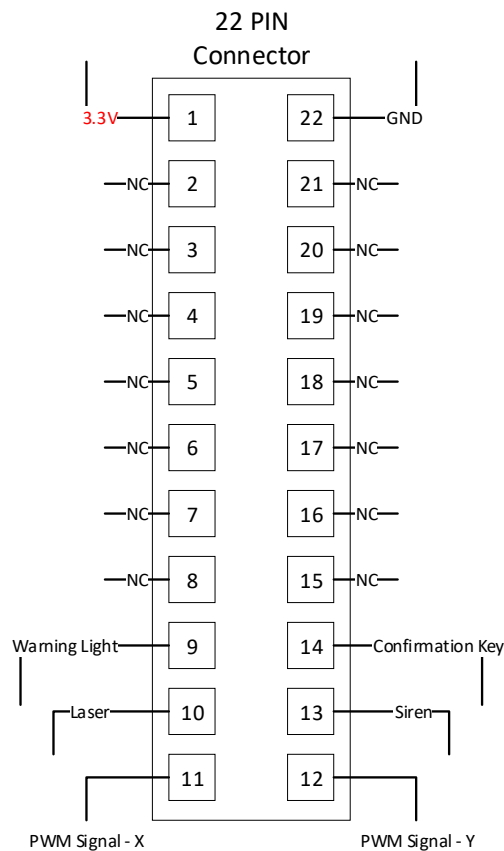
טבלה 17 - חיבור פינים פנימי כרטיס Altera לחיבור UART:

Signal Name	FPGA Pin No.	Description	I/O Standard
UART_RXD	PIN_G12	UART Receiver	3.3V
UART_TXD	PIN_G9	UART Transmitter	3.3V
UART_CTS	PIN_G14	UART Clear to Send	3.3V
UART_RTS	PIN_J13	UART Request to Send	3.3V

10.7. חיבורים בין כרטיס ה-Altera למעגל המולחם של המערכת:



איור 43 - מחבר 40 פינים על כרטיס ה-Altera<sup>12</sup>



איור 44 - סכמת חיבורים קונקטור 22 פינים

<sup>12</sup> מתוך Altera.User\_Manual

טבלה 18 - מפת חיבורים בין כרטיס Altera ללוח ההלחמה :

שם הדק ב-Altera	מס' הדק בלוח ההלחמה	ייעוד	צבע חוט
3.3v	1	VCC	אדום
GPIO [26]	9	Warning Light	צהוב
GPIO [28]	10	Laser	כתום
GPIO [30]	11	PWM Signal X	שחור
GPIO [31]	12	PWM Signal Y	שחור
GPIO [29]	13	Siren	חום
GPIO [27]	14	Conf Key	לבן
GND	22	GND	כחול

10.8 . דף נתונים טכניים – מנועי סרבו<sup>13</sup>:

RG-SRV180 Stats	
Operating Voltage	6v
Stall Torque	12 kg·cm 166.6oz·in
No-load Speed	43 RPM; .23 seconds/60°
Operating Angle	180°
Weight	60g
Size	30 x 45 x 51 mm
Stall Current	1600 mA
Standby/No Load Current	150 mA
Control Protocol	PWM
Cable Length	270mm
Material	Plastic Body and Metal Gears

<sup>13</sup> מתוך דף האינטרנט של המנועים, באתר היצרן, כפי שמפורט בסעיף קישורים ברשת



Data sheet acquired from Harris Semiconductor  
SCHS069D - Revised November 2004

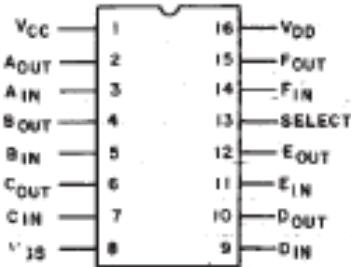
## CD4504B Types

### CMOS Hex Voltage-Level Shifter for TTL-to-CMOS or CMOS-to-CMOS Operation High-Voltage Types (20-Volt Rating)

#### Features:

- Independence of power-supply sequence considerations— $V_{CC}$  can exceed  $V_{DD}$ ; input signals can exceed both  $V_{CC}$  and  $V_{DD}$
- Up and down level-shifting capability
- Shiftable input threshold for either CMOS or TTL compatibility
- Standardized symmetrical output characteristics

- 100% tested for quiescent current @ 20 V
- Maximum input current of 1  $\mu$ A at 18 V over full package-temperature range; 100 nA at 18 V and 25°C
- 5 V, 10 V, and 15 V parametric ratings
- Meets all requirements of JEDEC Standard No. 13B, "Standard Specifications for Description of 'B' Series CMOS Devices"



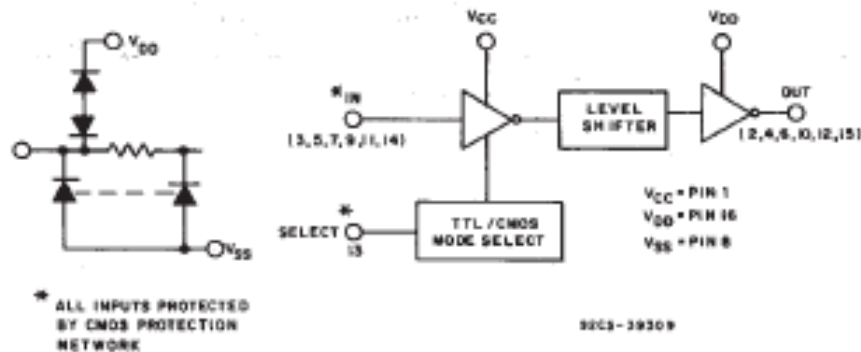
TOP VIEW

92CS-3930B

#### TERMINAL ASSIGNMENT

■ CD4504B hex voltage level-shifter consists of six circuits which shift input signals from the  $V_{CC}$  logic level to the  $V_{DD}$  logic level. To shift TTL signals to CMOS logic levels, the SELECT input is at the  $V_{CC}$  HIGH logic state. When the SELECT input is at a LOW logic state, each circuit translates signals from one CMOS level to another.

The CD4504B types are supplied in 16-lead hermetic dual-in-line ceramic packages (F3A suffix), 16-lead dual-in-line plastic packages (E suffix), 16-lead small-outline packages (M, M96, and MT suffixes), and 16-lead thin shrink small-outline packages (PW and PWR suffixes).



92CS-3930B

Fig. 1 - Functional diagram for CD4504B.

#### MAXIMUM RATINGS, Absolute-Maximum Values:

##### DC SUPPLY-VOLTAGE RANGE, ( $V_{DD}$ )

Voltages referenced to  $V_{SS}$  Terminal ..... -0.5V to +20V

INPUT VOLTAGE RANGE, ALL INPUTS ..... -0.5V to  $V_{CC}$  + 0.5V

DC INPUT CURRENT, ANY ONE INPUT .....  $\pm 10$ mA

##### POWER DISSIPATION PER PACKAGE ( $P_D$ ):

For  $T_A = -55^\circ\text{C}$  to  $+100^\circ\text{C}$  ..... 500mW

For  $T_A = +100^\circ\text{C}$  to  $+125^\circ\text{C}$  ..... Derate Linearly at 12mW/ $^\circ\text{C}$  to 200mW

##### DEVICE DISSIPATION PER OUTPUT TRANSISTOR -

FOR  $T_A =$  FULL PACKAGE-TEMPERATURE RANGE (All Package Types) ..... 100mW

OPERATING-TEMPERATURE RANGE ( $T_A$ ) .....  $-55^\circ\text{C}$  to  $+125^\circ\text{C}$

STORAGE TEMPERATURE RANGE ( $T_{stg}$ ) .....  $-55^\circ\text{C}$  to  $+150^\circ\text{C}$

##### LEAD TEMPERATURE (DURING SOLDERING):

At distance 1/16  $\pm$  1/32 inch (1.59  $\pm$  0.79mm) from case for 10s max ..... +265 $^\circ\text{C}$



75W Single Output Switching Power Supply

**LRS-75** series



#### ■ Features

- Universal AC input / Full range
- Withstand 300VAC surge input for 5 second
- No load power consumption<0.3W
- Miniature size and 1U low profile
- High operating temperature up to 70°C
- Protections: Short circuit / Overload / Over voltage
- Cooling by free air convection
- Compliance to IEC/EN 60335-1(PD3) and IEC/EN61558-1, -2-16 for household appliances
- Operating altitude up to 5000 meters (Note.7)
- Withstand 5G vibration test
- High efficiency, long life and high reliability
- LED indicator for power on
- Over voltage category III
- 100% full load burn-in test
- 3 years warranty

#### ■ Applications

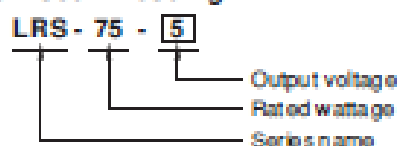
- Industrial automation machinery
- Industrial control system
- Mechanical and electrical equipment
- Electronic instruments, equipments or apparatus
- Household appliances

#### ■ Description

LRS-75 series is a 75W single-output enclosed type power supply with 30mm of low profile design. Adopting the full range 85~264VAC input, the entire series provides an output voltage line of 5V, 12V, 15V, 24V, 36V and 48V.

In addition to the high efficiency up to 91.5%, the design of metallic mesh case enhances the heat dissipation of LRS-75 that the whole series operates from -30°C through 70°C under air convection without a fan. Delivering an extremely low no load power consumption (less than 0.3W), it allows the end system to easily meet the worldwide energy requirement. LRS-75 has the complete protection functions and 5G anti-vibration capability; it is complied with the international safety regulations such as TUV EN60950-1, EN60335-1, EN61558-1/-2-16, UL60950-1 and GB4943. LRS-75 series serves as a high price-to-performance power supply solution for various industrial applications.

#### ■ Model Encoding



File Name: LRS-75-SPW 2017-11-24-01



The Future of Analog IC Technology®

## MP1484 3A, 18V, 340KHz Synchronous Rectified Step-Down Converter

### DESCRIPTION

The MP1484 is a monolithic synchronous buck regulator. The device integrates top and bottom 85mΩ MOSFETS that provide 3A of continuous load current over a wide operating input voltage of 4.75V to 18V. Current mode control provides fast transient response and cycle-by-cycle current limit.

An adjustable soft-start prevents inrush current at turn-on and in shutdown mode, the supply current drops below 1μA.

The MP1484 is PIN compatible to the MP1482 2A/18V/Synchronous Step-Down Converter.

### FEATURES

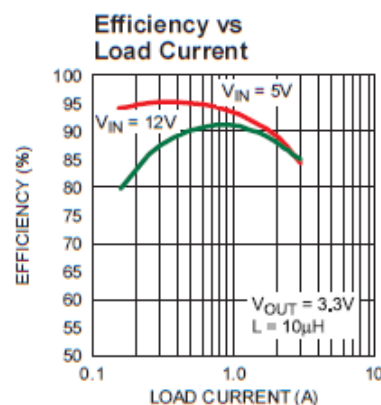
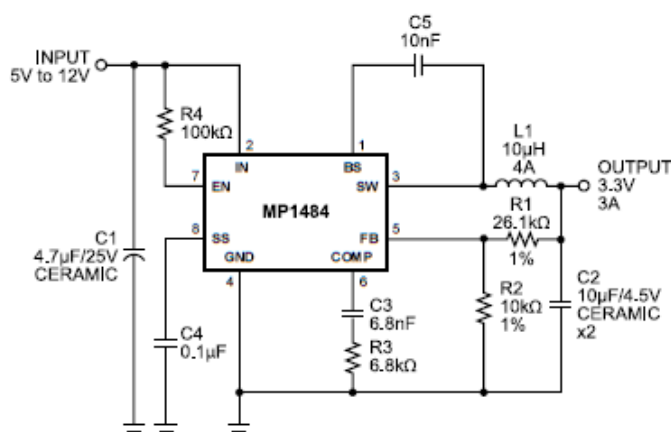
- 3A Continuous Output Current
- Wide 4.75V to 18V Operating Input Range
- Integrated 85mΩ Power MOSFET Switches
- Output Adjustable from 0.925V to 20V
- Up to 95% Efficiency
- Programmable Soft-Start
- Stable with Low ESR Ceramic Output Capacitors
- Fixed 340KHz Frequency
- Cycle-by-Cycle Over Current Protection
- Input Under Voltage Lockout
- Thermally Enhanced 8-Pin SOIC Package

### APPLICATIONS

- FPGA, ASIC, DSP Power Supplies
- LCD TV
- Green Electronics/Appliances
- Notebook Computers

"MPS" and "The Future of Analog IC Technology" are Registered Trademarks of Monolithic Power Systems, Inc.

### TYPICAL APPLICATION



10.12. קוד הפרויקט - Matlab :

10.12.1. קבצי הקוד :



colorDetection.m



errorPlot.m

10.12.2. הקוד :

10.12.2.1. תוכנית לשרטוט גודל הצעד :

```
font_size = 16;
L = [1.5: 0.01: 5];
d = 2.5;
x = d - L.*tan(atan(d./L)-pi/256);
x2 = d - L.*tan(atan(d./L)-pi/64);

figure
hold on
plot(L, x*100, 'b')
plot(L(x==min(x)), min(x)*100, 'b--o')
text(L(x==min(x)), min(x)*100+1, { "min ('+L(x==min(x))+ '[m],
"+num2str(min(x)*100)+' [cm])" }, 'Color', 'blue', 'FontSize', font_size)
plot(L(x==max(x)), max(x)*100, 'b--o')
text(L(x==max(x))-1, max(x)*100+1, { "max ('+L(x==max(x))+ '[m],
"+num2str(max(x)*100)+' [cm])" }, 'Color', 'blue', 'FontSize', font_size)
text(3, 10, '8 bit resolution', 'Color', 'blue', 'FontSize', font_size)

plot(L, x2*100, 'r')
plot(L(x2==min(x2)), min(x2)*100, 'r--o')
text(L(x2==min(x2)), min(x2)*100+1, { "min ('+L(x2==min(x2))+ '[m],
"+num2str(min(x2)*100)+' [cm])" }, 'Color', 'red', 'FontSize', font_size)
plot(L(x2==max(x2)), max(x2)*100, 'r--o')
text(L(x2==max(x2))-1, max(x2)*100-1, { "max ('+L(x2==max(x2))+ '[m],
"+num2str(max(x2)*100)+' [cm])" }, 'Color', 'red', 'FontSize', font_size)
text(3, 27, '6 bit resolution', 'Color', 'red', 'FontSize', font_size)

hold off
grid on
title('Step(L)', 'FontSize', 20)
xlabel('L[m]', 'FontSize', 20)
ylabel('Step[cm]', 'FontSize', 20)
```



```
%% colorDetection %%
clc; clear; close all;
clearvars all

%% SetUp Paramerers
sensitivity = 0.3;
numOfPixels = 35;

%% Serial object
% Close any open objects so they don't interfere
delete(instrfind);

% start serial connection 256000
SerialConn = serial('COM4', 'BaudRate', 256000, 'DataBits', 8);
fopen(SerialConn);

%% Create the webcam object.
% cam = webcam('USB_Camera', 'Resolution', '1280x720');
cam = webcam('USB_Camera', 'Resolution', '640x480');

% Capture one frame to get its size.
frame = snapshot(cam);
frameSize = size(frame);
midFrame = flip(frameSize(1:2))/2;

%% Create the video player object.
videoPlayer = vision.VideoPlayer('Position', [100 100 [frameSize(2), frameSize(1)]+30]);
videoPlayer.step(frame);

%% preset
Position = [0.5 0.5];
for i=0:5
    sendPos(SerialConn, 0.5, '01');
end

%%
Count = 0;
runLoop = 1;
while(runLoop)
    % Get the snapshot of the current frame
    frame = snapshot(cam);

    % subtract the red component from the grayscale image to extract the red components in the image.
    subtract_im = imsubtract(frame(:, :, 1), rgb2gray(frame)); %1-Red, 2-Green, 3-Blue

    % Convert the resulting grayscale image into a binary image.
    bin_im = imbinarize(subtract_im, sensitivity);

    % Remove all those pixels less than 35px
    clean_bin_im = bwareaopen(bin_im, numOfPixels);

    % get a set of properties for each labeled region.
    object = regionprops(clean_bin_im, 'BoundingBox', 'Centroid', 'Area');

    %% Display the biggest object
    if ~isempty(object)
        Count = 0;
        biggestObjectNum = [object.Area]==max([object.Area]);

        centroid = object(biggestObjectNum).Centroid;
        boundingBox = object(biggestObjectNum).BoundingBox;

        % Display a bounding box around the object being tracked.
        frame = insertShape(frame, 'Rectangle', boundingBox, 'LineWidth', 5, 'color', 'red');
```

```

% Display a cross in the middle of the box.
frame = insertMarker(frame, centroid, '+', 'Color', 'red');

% Display center mass centroid.
centroid_text = ([X: ', num2str(round(centroid(1))),...
    ' Y: ', num2str(round(centroid(2)))]);

frame = insertText(frame, [centroid(1)+15 centroid(2)],...
    centroid_text,'TextColor', 'black', 'FontSize', 12,...
    'BoxColor', 'red', 'BoxOpacity', 1);

for i=1:2
    if (abs(centroid(i)-midFrame(i)) > 15) % 15 pixels
        if centroid(i) > midFrame(i)
            centroid(i) = centroid(i) + 8; % 8 pixels
            if centroid(i) > frameSize(i)
                centroid(i) = frameSize(i);
            end
        else
            centroid(i) = centroid(i) - 8; % 8 pixels
            if centroid(i) < 0
                centroid(i) = 0;
            end
        end
    end
end

step = 0.06*(centroid./midFrame - 1);
step(abs(centroid-midFrame) < 7) = 0;
Position = Position + step;

% Limit Motor Angle
Position(Position>1) = 1;
Position(Position<0) = 0.0001;

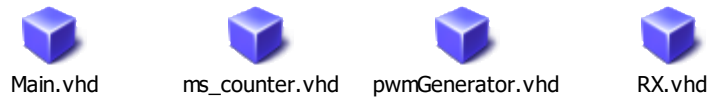
sendPos(SerialConn, Position(1), '11');
sendPos(SerialConn, Position(2), '10');
else
    sendPos(SerialConn, 0, '00');
    Count = Count + 1;
    if (115<Count && Count<120) % 0.035 sec for loop, 0.035*115=4.025 sec
        Position = [0.5 0.5];
        sendPos(SerialConn, 0.5, '01');
    end
end
videoPlayer.step(frame); % update display
runLoop = isOpen(videoPlayer);
end % loop end here.

% Reset Position
for i=0:10
    sendPos(SerialConn, 0.5, '01');
end
%% Clean up.
clear cam;
release(videoPlayer);

function sendPos(port, pos, xy)
    pos = bin2dec([dec2bin(uint8(pos*63),6) xy]);
    flushoutput(port)
    fwrite(port, pos)
end

```

: Altera - קוד הפרויקט .10.13  
: קבצי הקוד .10.13.1



: הקוד .10.13.2

: Main .10.13.2.1

```
library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
```

```
entity main is
  Port( sys_clk      : in STD_LOGIC;
        UART_RXD     : in STD_LOGIC;
        confirmation_key : in STD_LOGIC;
        laser        : out STD_LOGIC;
        flicker      : out STD_LOGIC;
        siren        : out STD_LOGIC;
        pwm_x, pwm_y  : out STD_LOGIC);
end main;
```

architecture Behavioral of main is

```
constant baudrate      : INTEGER := 256_000;
constant min_period     : INTEGER := 28_150;      -- 28150/50_000_000=0.563 ms
constant max_period     : INTEGER := 121_900;     -- 121900/50_000_000=2.438 ms
constant pwm_resolution : INTEGER := 6;           -- 6 bit resolution
```

```
signal position_x, position_y : STD_LOGIC_VECTOR(pwm_resolution-1 downto 0) := "100000";
signal fire_confirmation      : STD_LOGIC;
signal enable                 : STD_LOGIC;
```

```
signal RX_DATA : STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
signal SUCCESS : STD_LOGIC := '1';
signal RX_BUSY : STD_LOGIC;
```

-----

component RX is

```
GENERIC( sys_clk_freq : INTEGER := 50_000_000;
  baudrate : INTEGER := 9600);
  Port( CLK : in STD_LOGIC;
        RX_LINE : in STD_LOGIC;
        BUSY : out STD_LOGIC;
        DATA : out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
        SUCCESS : out STD_LOGIC);
```

end component RX;

-----

component pwmGenerator is

```
GENERIC(bits_resolution : INTEGER := 8;      --bits of resolution
  sys_clk_freq : INTEGER := 50_000_000;
  pwm_freq : INTEGER := 50;
  min_period : INTEGER := 50_000;      --in msec 0.563 ms
  max_period : INTEGER := 100_000;     --in msec 0.563 ms
  direction : STD_LOGIC := '0');
  port ( clk : in STD_LOGIC;      --system clock
        position : in STD_LOGIC_VECTOR(bits_resolution-1 downto 0);
        pwm_out : out STD_LOGIC);
```

end component pwmGenerator;

-----

component ms\_counter is

```
GENERIC( sys_clk_freq : INTEGER := 50_000_000;
  reach_to : INTEGER := 1000);      -- 1 sec
  Port ( clk : in STD_LOGIC;      --system clock
        enable : in STD_LOGIC;
        count_flag : out STD_LOGIC);
```

end component ms\_counter;

-----

```

begin
  servo_x : pwmGenerator generic map(
    bits_resolution    => pwm_resolution,
    min_period         => min_period,
    max_period         => max_period,
    direction          => '1')
  port map (
    clk                => sys_clk,
    position            => position_x,
    pwm_out             => pwm_x);

  servo_y : pwmGenerator generic map(
    bits_resolution    => pwm_resolution,
    min_period         => min_period,
    max_period         => max_period)
  port map (
    clk                => sys_clk,
    position            => position_y,
    pwm_out             => pwm_y);

  Receiver : RX generic map(
    baudrate           => baudrate)
  port map (
    CLK                => sys_clk,
    RX_LINE             => UART_RXD,
    BUSY               => RX_BUSY,
    DATA               => RX_DATA,
    SUCCESS             => SUCCESS);

  count_150ms : ms_counter generic map (
    reach_to           => 150)
  port map (
    clk                => sys_clk,
    enable              => enable,
    count_flag          => fire_confirmation);

  process(RX_BUSY)
  variable x_ok, y_ok : STD_LOGIC := '0';
  begin
    if falling_edge(RX_BUSY) then
      if SUCCESS = '1' then
        if RX_DATA(1 downto 0) = "11" then
          x_ok := '1';
          position_x <= RX_DATA(7 downto 2);
        elsif RX_DATA(1 downto 0) = "10" then
          y_ok := '1';
          position_y <= RX_DATA(7 downto 2);
        elsif RX_DATA(1 downto 0) = "01" then
          y_ok := '0'; y_ok := '0';
          position_X <= RX_DATA(7 downto 2);
          position_y <= RX_DATA(7 downto 2);
        else
          x_ok := '0'; y_ok := '0';
        end if;
      else
        x_ok := '0'; y_ok := '0';
      end if;
    end if;
    enable <= x_ok and y_ok;
  end process;

  laser    <= '0' when fire_confirmation = '1' and confirmation_key = '1' else '1';
  flicker  <= '0' when fire_confirmation = '1' else '1';
  siren    <= '0' when fire_confirmation = '1' else '1';

end Behavioral;

```

```

library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;

entity RX is
  GENERIC(
    sys_clk_freq : INTEGER := 50_000_000;
    baudrate     : INTEGER := 9600);
  Port (
    CLK : in STD_LOGIC;
    RX_LINE : in STD_LOGIC;
    BUSY : out STD_LOGIC;
    DATA : out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
    SUCCESS : out STD_LOGIC);
end RX;

architecture Behavioral of RX is
  constant MAX_PRSCL : INTEGER := sys_clk_freq/baudrate; -- 50MHz /256000=195.33(256000: the baudrate)
  constant HALF_PRSCL : INTEGER := MAX_PRSCL/2;
  signal PRSCL : INTEGER range 0 to MAX_PRSCL := 0;
  signal INDEX : INTEGER range 0 to 9 := 0;
  signal DATAFLL : STD_LOGIC_VECTOR(9 downto 0);
  signal RX_FLG : STD_LOGIC := '0';
begin
  -- Receiver
  process(CLK)
  begin
    if rising_edge(CLK) then
      if (RX_FLG = '0' and RX_LINE = '0') then
        INDEX <= 0;
        PRSCL <= 0;
        BUSY <= '1';
        RX_FLG <= '1';
      end if;

      if (RX_FLG = '1') then
        DATAFLL(INDEX) <= RX_LINE;
        if (PRSCL < MAX_PRSCL) then
          PRSCL <= PRSCL + 1;
        else
          PRSCL <= 0;
        end if;

        if (PRSCL = HALF_PRSCL) then
          if (INDEX < 9) then
            INDEX <= INDEX + 1;
          else
            if (DATAFLL(0)='0' and DATAFLL(9) = '1') then
              DATA <= DATAFLL(8 downto 1);
              SUCCESS <= '1';
            else
              DATA <= (others => '0');
              SUCCESS <= '0';
            end if;
            RX_FLG <= '0';
            BUSY <= '0';
          end if;
        end if;
      end if;
    end if;
  end process;
end Behavioral;

```

```

library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
use IEEE.STD_LOGIC_UNSIGNED.ALL;

entity pwmGenerator is
  GENERIC(
    bits_resolution : INTEGER := 8; --bits of resolution
    sys_clk_freq : INTEGER := 50_000_000;
    pwm_freq : INTEGER := 50;
    min_period : INTEGER := 50_000; --in msec 1 ms
    max_period : INTEGER := 100_000; --in msec 2 ms
    direction : STD_LOGIC := '0';
    Port ( clk : in STD_LOGIC; --system clock
          position : in STD_LOGIC_VECTOR (bits_resolution-1 downto 0);
          pwm_out : out STD_LOGIC); --pwm outputs
end pwmGenerator;

architecture logic of pwmGenerator is
  constant period : INTEGER := sys_clk_freq/pwm_freq; --number of clocks in one pwm period
begin
  process(clk)
    variable count : INTEGER range 0 to period - 1 := 0;
    variable num_of_period : INTEGER range 0 to max_period := 0; --number of clocks in 1/2 duty cycle
  begin
    if rising_edge(clk) then
      if direction = '0' then
        num_of_period := min_period + conv_integer(position)* (max_period-min_period)/(2**bits_resolution);
        --determine clocks in 1/2 duty cycle
      else
        num_of_period := max_period - conv_integer(position)* (max_period-min_period)/(2**bits_resolution);
      end if;

      if(count = period - 1) then --end of period reached
        count := 0; --reset counter
      else --end of period not reached
        count := count + 1; --increment counter
      end if;
      if(count <= num_of_period) then --phase's falling edge reached
        pwm_out <= '1'; --deassert the pwm output
      else --phase's rising edge reached
        pwm_out <= '0'; --assert the pwm output
      end if;
    end if;
  end process;
end logic;

```

: ms\_counter .10.13.2.4

```

library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;

entity ms_counter is
    GENERIC( sys_clk_freq : INTEGER := 50_000_000;
            reach_to      : INTEGER := 1000);          -- 1 sec
    Port (   clk          : in  STD_LOGIC;            --system clock
            enable        : in  STD_LOGIC;
            count_flag    : out STD_LOGIC);
end ms_counter;

architecture Behavioral of ms_counter is
    constant one_ms      : INTEGER := sys_clk_freq/1000;  --num of period in 1ms
begin
    process(clk)
        variable count    : INTEGER range 0 to (reach_to*one_ms) := 0;
    begin
        if rising_edge(clk) then
            if enable = '1' then
                count := 0;
                count_flag <= '1';                    -- reset counter
            else
                if(count < reach_to*one_ms -1) then
                    count := count + 1;
                    count_flag <= '1';                --increment counter
                else
                    count_flag <= '0';
                end if;
            end if;
        end if;
    end process;
end Behavioral;

```

## 11. מקורות ספרותיים:

### 11.1. מקורות:

- 11.1.1. דף נתונים ללוח פיתוח Altera DE2-115.
- 11.1.2. ספר "שפת תיאור חומרה VHDL" מאת אייל חברבר, הוצאת שורש.
- 11.1.3. ספר "פרקים באופטיקה יישומית" מאת פרופ' אראל גרנות, הוצאת אוניברסיטת אריאל בשומרון.
- 11.1.4. חומר בנוגע להתפתחות הלייזרים  
[https://www.photonics.com/a42279/A\\_History\\_of\\_the\\_Laser\\_A\\_Trip\\_Through\\_the\\_Light](https://www.photonics.com/a42279/A_History_of_the_Laser_A_Trip_Through_the_Light)

<http://www.scienceclarified.com/scitech/Lasers/Military-Applications-of-Lasers.html>

### 11.2. קישורים ברשת:

- 11.2.1. הסברים ודוגמאות מהאתר הרשמי של Matlab - [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)
- 11.2.2. קישור לדף נתונים מנועי ה-Servo - <https://www.robotgeek.com/rg-180-servo>
- 11.2.3. קישור לדף נתונים מצלמת רשת - <https://geniushop.com/product/ultra-wide-angle-full-hd-webcam-f100>
- 11.2.4. קישור לדף נתוני מערכת Pan-Tilt - <https://www.robotgeek.com/robotgeek-pantilt.aspx>
- 11.2.5. קישור לדף נתוני רכיב DC-DC Convertor - [https://www.ebay.com/itm/MP1484EN-DC-DC-Buck-Voltage-Step-down-Regulator-Converter-Module/312020967529?hash=item48a5e62069:m:mKtPZACQrs1R61co9o4v\\_Sg](https://www.ebay.com/itm/MP1484EN-DC-DC-Buck-Voltage-Step-down-Regulator-Converter-Module/312020967529?hash=item48a5e62069:m:mKtPZACQrs1R61co9o4v_Sg)
- 11.2.6. קישור לדף נתונים ספק כוח LRS-75-12 - <http://meanwellusa.com/productPdf.aspx?i=403#1>
- 11.2.7. קישור לדף נתונים רכיב MP1484 - <https://www.mouser.com/ds/2/277/MP1484-1186021.pdf>