

פיתוח אלגוריתם בקרה מבוסס לימוד מכונה לדיכוי רעידות במערכת דרגת חופש
אחת

פרויקט גמר הנדסי- דוח אמצע

BS-22-19

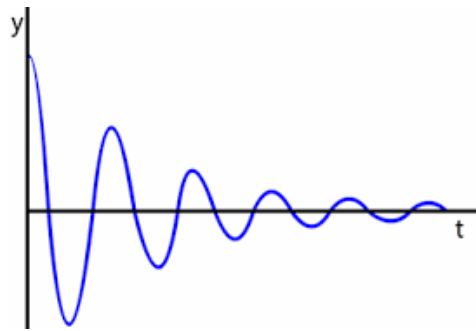
הוכן לשם השלמת הדרישות לקבלת
תואר ראשון בהנדסה B.Sc.
מאת
דניאל לילינטל

מנחים: ד"ר זיו ברנד וד"ר איתן פישר

הוגש למחלקה להנדסת מכונות – קמפוס באר שבע
המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון

מרץ 2022

אדר תשפ"ב



SCE

המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון

מהנדסית לעולם טוב יותר



פיתוח אלגוריתם בקרה מבוסס לימוד מכונה לדיכוי רעידות במערכת דרגת

חופש אחת

פרויקט גמר הנדסי- דוח אמצע

הוכן לשם השלמת הדרישות לקבלת תואר ראשון בהנדסה B.Sc.

מאת

דניאל לילינטל

שם המנחה

ד"ר זיו ברנד

חתימת המנחה



שם המנחה

ד"ר איתן פישר

חתימת המנחה



הוגש למחלקה להנדסת מכונות

המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון

באר שבע

מרץ 2022

אדר תשפ"ב



תקציר הפרויקט

מבנים מכאניים קיימים ביישומים רבים למשל מערכות תעופה וחלל, גשרים, מכונות עיבוד שבבי, רובוטים, רכבים ועוד. במקרים רבים המבנים נתונים לעומסים דינאמיים הנוצרים מרעידות והלמים מכאניים. העומסים הדינאמיים עלולים להאיץ מנגנוני כשל, למשל נזק בהתעייפות ושחיקה לצד פגיעה בפונקציונליות ואמינות המערכת. גישה מקובלת להתמודדות עם עומסים דינאמיים המופעלים על מערכות שונות היא הוספת רכיבים בולעי אנרגיה.

כיום ישנן שיטות וגישות לשיכוך רעידות למשל, גישות פאסיביות - ללא הוספת אנרגיה למערכת אלא התאמה פיזית של המערכת על מנת לשנות את התדר העצמי שלה. וגישות אקטיביות - הוספת אנרגיה מבוקרת למערכת על מנת לשכך את הרעידות. בפרויקט זה נעשה שימוש בגישה אקטיבית לשיכוך רעידות באמצעות גישה בקרה אופטימאלית המבוססת למידת מכונה. השילוב של למידת מכונה במערכות בקרה הוא בעל פוטנציאל עצום במגוון גדול של יישומים.

מטרת הפרויקט היא למידה ופיתוח אלגוריתם בקרה אופטימאלי מבוסס למידת מכונה לדיכוי רעידות במערכת מכאנית דרגת חופש אחת. הפעילות כוללת פיתוח משוואות התנועה, פיתוח אלגוריתמי בקרה מסוג PD ו LQR לצרכי השוואה וכחלק מבניית הידע לקראת פיתוח אלגוריתם מבוסס לימוד מכונה, ביצוע סימולציות וניסויים השוואתיים.

הפעילות עד כה כללה פיתוח וסימולציה של בקרי PD, LQR ובקר מבוסס לימוד מכונה. כמו כן פותח משעך דינאמי מכיוון שבמערכת הניסוי אין מדידת מהירות. התנסיתי עם בקר MYRIO של חברת NI בסביבת עבודה LABVIEW בהרצה של בקרת PD ובקרת LQR על המערכת הפיזית. בעזרת הספר "Machine Learning Control" [10] למדתי על בקרה מבוססת לימוד מכונה, ביצעתי סימולציות של מערכות דינאמיות והתנסיתי בפונקציות והתניות שונות על מנת להעמיק את ההבנה במימוש אלגוריתם MLC(Machine Learning Control). ערכתי השוואה בין ביצועי בקרת LQR לבין בקרת MLC על המודל הדינאמי בסימולציה באמצעות תוכנת MATLAB.

בסמסטר ב' תפוחת תשתית להרצה של אלגוריתם MLC על המערכת הפיזית. אבצע ניסויים בווריאציות שונות של MLC תוך השוואת ניסויים אלו לבקרה הקלאסית והאופטימלית.



תוכן עניינים

5	רשימת סימנים
6	רשימת טבלאות ואיורים
7	פרק 1: מבוא
7	תיאור הפרויקט
7	מוטיבציה לפרויקט
7	הצגת הבעיה
8	מטרות הפרויקט
8	גבולות הפרויקט
8	קריטריונים להצלחה
8	חשיבות העבודה
9	מבנה העבודה
9	לוחות זמנים
10	פרק 2: רקע -סקר ספרות
11	בקרה אופטימלית לינארית
12	שערוך דינאמי
13	בקרה מבוססת למידת מכונה
16	פרק 3: אתגרי הפרויקט
16	פרק 4: ניתוח פיזיקלי של מערכת הניסוי
21	פרק 5: תוצאות ניסויים וסימולציות
21	סימולציות
21	סימולציות PD
22	סימולציות בקרה אופטימלית (LQR) ושערוך
25	ניסויי מעבדה
26	ניסוי PD
27	ניסוי LQR
29	פרק 6: דיון ומסקנות
29	משמעות התוצאות
29	פרק 7: הערכה כלכלית
30	פרק 8: תכנית עבודה לסמסטר ב'
31	פרק 9: סיכום
31	נקודת חוזק
31	נקודות חולשה
32	ביבליוגרפיה
33	נספחים



רשימת סימנים

התנגדות מגנטית	R_L		מסה	m
זרם	I		קבוע הקפיץ	k
הגבר למשוב	K		קבוע הריסון	c
הגבר לשערוך	K_f		קבוע המגנטיות	C
כניסה למערכת	u		מיקום	x
			מהירות	\dot{x}
			תאוצה	\ddot{x}
			זרם הבקרה	I_c
			זרם ביאס	I_b
			מרחק התחלתי	L_0
			מדידת הסנסורים	s
			חוק הבקרה	b
			פונקציית המחיר	J
			הפרעות	w
			שדה מגנטי	H
			צפיפות שטף מגנטי	B
			מקדם הפרמביליות בריק	μ_0
			מקדם פרמביליות יחסית	μ_r
			מספר כריכות	N
			שטף מגנטי	ϕ
			מתח	v
			כח מגנטי	f_m
			אנרגיה מגנטית	W_m



רשימת טבלאות ואיורים

12	איור 1 - תרשים של מערכת מבוססת LQR [10]
14	איור 2 - תרשים של מערכת מבוססת MLC [10]
14	איור 3 - הפעולות שמבצע אלגוריתם גנטי לאוכלוסייה שלו בין דור j לדור $j+1$ [10]
15	איור 4 – דוגמא לאיבר מתוך האוכלוסייה [10]
15	איור 5 – שילוב של המערכת הכללית עם פירוט הפעולות שמבצע האלגוריתם על האוכלוסייה [10]
16	איור 6 - מתקן הניסוי [11]
18	איור 7 - תרשים של אלקטרו מגנט [11]
20	איור 8 - תרשים של הכוחות הפועלים על הליבה
21	איור 9 - תגובת המערכת להזזה עם ובלי בקרת PD
22	איור 10 - תגובת המערכת עם בקרת LQR ומשערך
23	איור 11 - סימולצית תזוזה בזמן של המערכת האמיתית והמשוערכת
23	איור 12 - השוואת ביצועי LQR לביצועי MLC
24	איור 13 - סימולצית השוואה בין תגובת המערכת עם חוק בקרה LQR לחוק שנמצא ע"י ה-MLC
25	איור 14 - מערכת הניסוי מבט קדמי
25	איור 15 - מערכת הניסוי מבט אחורי
26	איור 16 - דיאגרמת חוג סגור עם בקר MyRio
26	איור 17 - ניסוי בקרת PD עם כניסת Impulse על המערכת הפיזית
27	איור 18 - גרף ניסוי משערך דינאמי על המערכת הפיזית
28	איור 19 - ניסוי בקרת LQR עם כניסת Impulse על המערכת הפיזית
28	איור 20 - חוג בקרה סגור של המשך הניסוי על המערכת הפיזית



פרק 1: מבוא

תיאור הפרויקט

פרויקט זה עוסק בשיכוך רעידות במערכת בעלת דרגת חופש אחת, השיכוך יבוצע על ידי בקרה אקטיבית מבוססת למידת מכונה. אבצע השוואת ביצועים בין בקרה קלאסית לבקרה אופטימלית ואפתח תשתית ליישום אלגוריתם הבקרה במכונת חריטה.

מוטיבציה לפרויקט

הפרויקט מבוצע במסגרת פעילות מחקרית בנושא שיפור תהליכי חריטה באמצעות שימוש בכלים מעולם הבקרה אשר מבוצעת במעבדה לבקרה של מערכות מכאניות גמישות. הפרויקט מהווה בחינה ויצירת תשתית לפיתוח אלגוריתמי בקרה אופטימאליים אדפטיביים מבוססי למידת מכונה ושאינו מצריכים ידיעת המודל הדינאמי התאורטי כדיכוי רעידות במחרטה. כידוע [1] דיכוי רעידות בתהליכי חריטה יוביל לשיפור בטיב המוצר, בתנובות הייצור, בהפחתת בלאי במחרטה והפחתת רעש רקע.

הצגת הבעיה

תנובות הייצור ואיכות המוצר בתהליכי חריטה פוחתים כאשר מתפתחות רעידות [1]. בנוסף, עם התפתחות הרעידות הבלאי גובר ורעש רקע מזיק גובר [2]. במעבדה לבקרת מערכות מכאניות גמישות מתקיים מחקר העוסק בהפחתת הרעידות במחרטות באמצעות מערכת בקרה בחוג סגור. לעיתים רבות, תכנון מערכת הבקרה מצריך ידיעה טובה של המודל הדינאמי של המערכת המבוקרת, תהליכי חריטה לעיתים מורכבים ומשתנים תוך כדי החריטה (למשל, שינוי עובי דופן חומר הגלם יגרום לשינוי הקשיחות). לפיכך, קיים אתגר רב לפתח משוואות הדינאמיות אשר ייתמכו בפיתוח אלגוריתם הבקרה. מטרת הפרויקט היא לבסס שיטה לפיתוח אלגוריתם הבקרה בהסתמך על מדידות כניסה ויציאה ממערכת נתונה וללא צורך בידיעת המודל הדינאמי של התהליך הנתון באמצעות בקרה מבוססת למידת מכונה. האתגר בפרויקט זה הוא פיתוח ויישום אלגוריתם בקרה מבוסס למידת מכונה לריסון אקטיבי של רעידות באמצעות מדגים טכנולוגי של מערכת מכאנית בעלת דרגת חופש אחת.



מטרות הפרויקט

- ריסון רעידות מכניות באמצעות בקרה מבוססת למידת מכונה - Machine Learning Control.
- השוואת ביצועים בין סימולציה לניסוי.
- השוואת ביצועים לבקר LQR ו- PD.
- הכנת תשתית לקראת מימוש בכלי חריטה.

גבולות הפרויקט

במסגרת הפרויקט אבצע סימולציות על מודל דינאמי שבניתי עם בקרים שונים (LQR, PID), בנוסף, אבנה משעך דינאמי ואבצע שערוך למשתני המצב במערכת, אבצע השוואות בין ביצועי בקרת LQR ולבקרת MLC ואפתח תשתית להרצת אלגוריתם MLC על המערכת הפיסית. לא אעסוק בפיתוח מערכת הניסוי הפיסית ובשלב זה, לא אעסוק בבניית אלגוריתם MLC.

קריטריונים להצלחה

- בניית תשתית סימולציה וניסויית של בקרת MLC
- הדגמה בסימולציה וניסוי לריסון רעידות אקטיבי באמצעות בקרת MLC.

חשיבות העבודה

חשיבות פרויקט זה היא בהמשך מחקרו של ד"ר זיו ברנד אשר עשוי להשפיע על תעשיית מכלולים המכילים חלקים נעים. שיכוך רעידות בחלקים נעים או חלקים המושפעים מסביבה נעה כדוגמת מכונת חריטה, וכו' יכול לגרום להעלאת טיב פני המוצר, איכותו ואורך חייו.



מבנה העבודה

שלב ראשון - סקירה ספרותית

במסגרת הסקירה הספרותית אסוף מאמרים בנושאים: בקרת LQR, בקרת PID, MLC, שערך דינאמי ועוד.

שלב שני - בניית מודל דינאמי למדגים הטכנולוגי הנמצא במעבדה.

שלב שלישי - ביצוע סימולציות והשוואות

בעזרת המודל הדינאמי, אבצע סימולציות והשוואות בין סוגי הבקרים השונים ווריאציות שונות של MLC.

שלב רביעי - ניסוי במדגים הטכנולוגי הנמצא במעבדה

במערכת הפיזית, מימשתי חוגי בקרה שונים (PD ו-LQR) כאשר את קבועי הבקרה של ה-LQR מצאתי באמצעות המודל הדינאמי וקבועי הבקרה של ה-PD נבחרו בצורה שרירותית.

שלב חמישי - כתיבת דוח אמצע

לוחות זמנים

Jul-22	Jun-22	May-22	Apr-22	Mar-22	Feb-22	Jan-22	Dec-21	Nov-21	Oct-21	Sep-21	חודשים
מתמשך											סקר ספרות
										סיום	פיתוח מודל דינאמי
										סיום	סימולצית בקר PD
									סיום		תכנון וסימולצית בקר LQR
									סיום		תכנון וסימולציה משערך
						סימולציה		לימוד תיאוריה			תכנון וסימולציה MLC
								סיום			לימוד עבודה עם בקרי NI סביבת LabVIEW
					סיום						לימוד עבודה עם בקרי SpeedGoat סביבת MATLAB
			ניסוי MLC				ניסוי LQR	ניסוי PD			ניסוי אימות, תיקוף והשוואה סוגי בקרים
הגשה	כתיבה										כתיבת דוח מסכם + מצגת
הגשה	כתיבה										כתיבת מאמר לכנס (אופציה)

פרק 2: רקע - סקר ספרות

בתהליך החריטה מתרחשות רעידות כתוצאה מהתנגדות חומר הגלם לסכין, חוסר איזון של חומר הגלם התפסנית עצמה, קשיחות נמוכה של הסכין-עוֹבֵד וכו'. הרעידות גורמות למספר בעיות בתהליך החריטה [1]:

1. טיב פני שטח ירוד (פגיעה באיכות המוצר).

1. ירידה בתנובות הייצור.

2. שחיקה מהירה של הסכין.

3. שחיקה מהירה של חלקי המכונה.

גישה מוכרת להתמודדות עם רעידות אלה הינה שימוש בגישות המקובלות מעולם העיבוד השבבי, למשל הורדת מהירות סיבוב הספינדל, הפחתת מהירות הקידמה, הקטנת גודל השבב, הוספת נקודות אחיזה לרכיב המעובד וכו' [3]. שיטה זו מתאימה בעיקר לחריטות בהם האפקטים דינאמיים זניחים ולא משתנים תוך כדי התהליך.

גישה נוספת להתמודדות עם אתגר זה היא הגישה של הריסון הפאסיבי. בעבודה [4] מוצג פיתוח של מחזיק סכין עם מרסן פאסיבי - גוף אשר בולע את האנרגיה הקינטית הלא רצויה שנוצרת במערכת בהתאם לחישובים של דינמיקת המערכת ושל התדירות הטבעית שלה. המחזיק סכין הותקן על המחרטה על מנת לשפר את הביצועים ואכן שיטה זו הוכחה כיעילה בשיפור טיב פני השטח [4]. בעבודה [5] המחבר השתמש בשיטה דומה - מרסן פאסיבי שנמצא חיצונית למחזיק סכין - גם הוא הוכיח את יעילותה של שיטה זו. הקושי ביישום שיטות אלו הוא בגלל ריבוי הגורמים המשפיעים על תדירות המערכת שגם משתנה עם זמן העיבוד, מאוד קשה לחשב את הפרמטרים לריסון הפסיבי ויתרה מזאת התדירות הטבעית של כל מערכת משתנה מאחת לשנייה ועבור כל מערכת צריך לייצר מוצר מתאים [6].

הגישה השלישית מבוססת על שימוש ברכיבים אקטיביים שמטרתם דיכוי רעידות המכונה על-ידי בליעת אנרגיה באמצעות מערכת בקרה בחוג סגור. מערכת הבקרה בחוג סגור כוללת מדידת הרעידות, בקר אשר קובע את האנרגיה הנדרשת לדיכוי הרעידות ואקטואטור המספק אנרגיה למערכת המכאנית לצורך דיכוי הרעידות. גישה זאת מאפשרת התמודדות טובה יותר מאשר הגישה הפאסיבית עם אפקטים דינאמיים משמעותיים, שינויים דינאמיים תוך כדי תהליך החריטה והפרעות חיצוניות [7] Fan and masih [6] השתמשו באלקטרו-מגנט שממוקם על יד המחזיק סכין שמופעל באמצעות בקרה אופטימלית [12] והצליחו ע"י כך לשפר את טיב העיבוד. Atsushi, Minetaka and Iwao [7] השתמשו באקטואטורים פייזואלקטורים על מנת לרסן את הרעידות במחזיק סכין שמבוקרים ע"י מיקום קטבים. Jérémie, Fredy and Konrad [8] השתמשו גם כן באקטואטורים פייזואלקטורים אך את השליטה הם עשו ע"י בקרה אופטימלית. הם הוכיחו שאפשר לשפר טיב פני השטח בצורה משמעותית ע"י ריסון אקטיבי. אחד מהקשיים בשיטות בקרה אלה הוא חוסר היכולת לשלוט בכל הפרמטרים של המערכת הדינאמית.

בתהליך עיבוד של צילינדר דק דופן לדוגמא, יש קושי גדול בחישוב התדירות הטבעית של המערכת כיוון שהיא מושפעת גם מהעיבוד עצמו, גם מהסיבוב וגם מהשפעות חיצוניות. הקשיים שהוצגו מחזקים את הצורך בבחינה של שיטות בקרה בחוג סגור מבוססות למידת מכונה שאינן מצריכות ידע על המודל הדינאמי ומסתפקות במידע של נתוני כניסה ויציאה.

בקרה אופטימלית לינארית:

בקרה אופטימלית (Linear Quadratic Regulator - LQR) מטרתה היא לבקר את המערכת הנתונה במינימום מחיר (J) באמצעות בקרת משוב שמבוססת על משתני המצב [10]. על מנת להשיג מטרה זו יש לפתור בעיית אופטימיזציה למציאת K_r שייתן לנו את מינימום ערך של פונקציית מחיר (משוואה 3). בהינתן מודל מרחב מצב בעל n משתני מצב (יציאות) ו- m מספר הכניסות ו- p מספר המדידות:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (\text{משוואה 1})$$

והכניסה למערכת מבוססת על משוב:

$$u = -K_r x \quad (\text{משוואה 2})$$

כאשר $A[n \times n]$ ו- $B[n \times m]$ מייצגות את מרחב המצב, $x[n \times 1]$ מייצג את וקטור משתני המצב, $u[m \times 1]$ מייצג את הכניסות של המערכת ו- $K_r[n \times 1]$ מייצג את וקטור הקבועים שכופלים את וקטור משתני המצב.

מטריצת מחיר עבור משתני המצב - $Q[n \times n]$, מטריצת מחיר עבור האקטואציה - $R[m \times m]$ והמחיר J מתבסס האינטגרל הבא:

$$J(t) = \int_0^t [x^T(\tau)Qx(\tau) + u^T(\tau)Ru(\tau)] d\tau \quad (\text{משוואה 3})$$

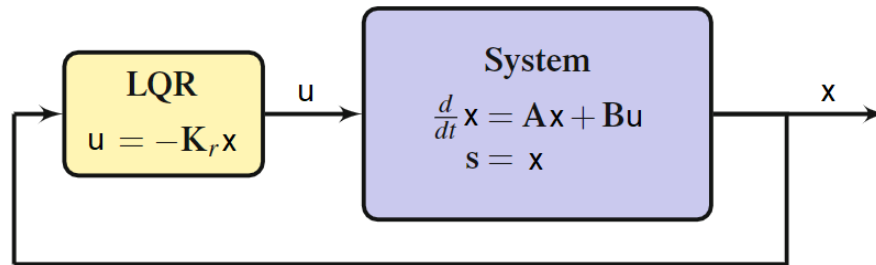
על מנת למצוא את ה- K_r שיספק לנו את ה- J הנמוך ביותר יש למצוא את נקודת המינימום של הפונקציה הנ"ל, בעיה התלויה במספר הממדים של מרחב המצב (ב-MATLAB פקודת LQR):

$$K_r = R^{-1}B^T X \quad (\text{משוואה 4})$$

כאשר X מהווה את הפתרון של משוואת ריקטי:

$$A^T X + XA - XBR^{-1}B^T X + Q = 0 \quad (\text{משוואה 5})$$

באזור הבא ניתן לראות תרשים מלבנים המתאר מערכת עם בקר LQR:



איור 1 - תרשים של מערכת מבוססת LQR [10]

בכדי שנוכל לממש בקר LQR עלינו לקבל את כל משתני המצב עבור המשוב. במידה ואיננו מקבלים את כל משתני המצב מהחיישנים עלינו לבצע שיערוך של משתני המצב החסרים. במקרה של מערכת הניסוי שלי קיים רק חיישן מרחק, ועל מנת לקבל את המהירות עלי לבצע שיערוך דינאמי.

שיערוך דינאמי

על מנת לקבל את מרחב המצב המלא עלינו לבצע שיערוך דינאמי [10]. בהינתן מרחב מצב מהצורה:

$$\frac{d}{dt}x = Ax + Bu \quad (\text{משוואה 6})$$

שמבוקר באמצעות משוב על משתני המצב שלו:

$$u = -Kx \quad (\text{משוואה 7})$$

ואין בידינו את כל משתני המצב - אין חיישן אשר מודד את כל משתני המצב (כמו מהירות במקרה שלנו):

$$y = Cx \quad (\text{משוואה 8})$$

כאשר $y[p \times 1]$ מייצג את מדידות החיישנים ו- $C[p \times n]$ מייצג את מקדמי ההגבר של החיישן למשתני המצב. יש לנו צורך להשלים את משתני המצב החסרים על בסיס מדידת משתני המצב הקיימים בידינו ובהתאם למודל הדינאמי המחושב:

$$\frac{d}{dt}\hat{x} = A\hat{x} + Bu + K_f(y - \hat{y}) \quad (\text{משוואה 9})$$

כאשר $\hat{x}[n \times 1]$ מייצג את שיערוך וקטור משתני המצב על בסיס השגיאה בין המדידה במשוערכת לבין המדידה האמיתית,

$$\hat{y} = C\hat{x} \quad (\text{משוואה 10})$$

ו- $K_f[n \times 1]$ מייצג את הקבועים אשר מחלקים את המשקל בין המודל המחושב לבין השגיאה בין המודל המחושב לבין המדידה האמיתית. לאחר פיתוח לא ארוך ניתן לראות כי השגיאה בין המדידה לבין המודל המשווער ניתן לבטא כך :

$$\frac{d}{dt}\varepsilon = (A - K_f C)\varepsilon \quad (\text{משוואה 11})$$

כאשר :

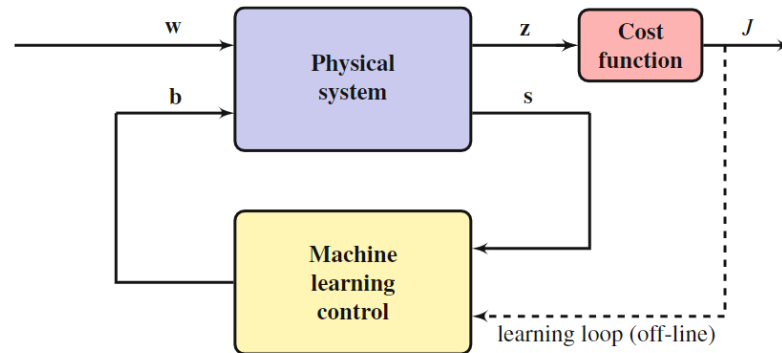
$$\varepsilon = (x - \hat{x}) \quad (\text{משוואה 12})$$

באמצעות מיקום קטבים\ מציאת נקודת אופטימום של המודל הדינאמי הנ"ל ניתן למצוא K_f שיצמצם את השגיאה ואף ינמיך רעשי מדידה ורעשים פיזיים במערכת וכך נקבל את מרחב המצב המלא [10].

בקרה מבוססת למידת מכונה :

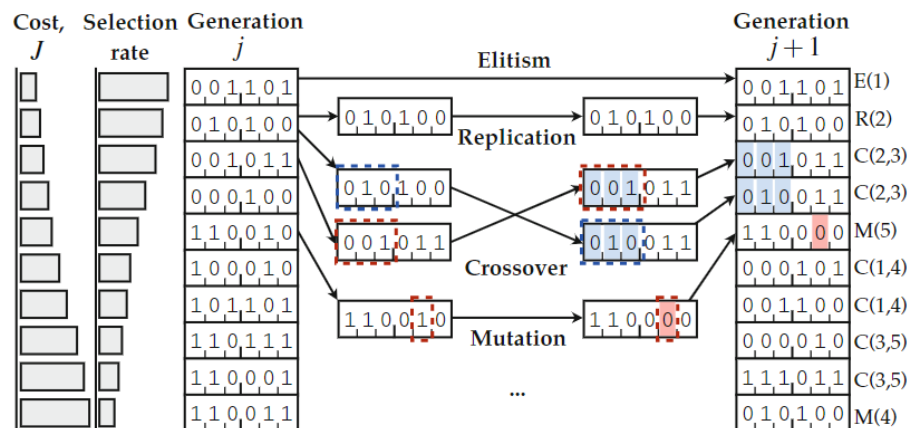
למידת מכונה - Tom M. Mitchell [9] הגדיר למידת מכונה כך : "תוכנית מחשב תיקרא לומדת מניסיון E ביחס למחלקת משימות T ומדד ביצועים P, אם הביצועים של משימות T, בהתאם למדד P, משתפרים עם הניסיון E" [9]. לדוגמה, תוכנת מחשב הלומדת לשחק שחמט, עשויה לשפר את ביצועיה (P) שנמדדים ביכולתה לנצח באוסף המשימות (T) הכרוכות במשחקי שחמט, באמצעות ניסיון (E) שהושג על ידי משחק נגד עצמה. באופן כללי, כדי שתהיה לנו בעיית למידה מוגדרת היטב, עלינו להגדיר אותה בצורה נכונה [9]. נושא למידת מכונה הוא נושא שיכול לפתור בעיות מסובכות שהאדם יתקשה לפתור. על ידי כיוון נכון של פרמטרים, כמו מדד ביצועים והגדרת הבעיה כמו שצריך, למידת מכונה יכולה להשתפר על ידי ניסויים רבים, אופטימיזציה ושיפור עצמי עם כל ניסוי. למידת מכונה משמשת לייצר מודל של מערכת, על ידי אוסף גדול של נתונים והמודל אמור להשתפר ככל שיש לו יותר ויותר נתונים [10].

בקרה מבוססת לימוד מכונה (MLC - Machine learning control) - MLC זה תת נושא של למידת מכונה שיטה זו משתמשת בלמידת מכונה על מנת לפתור בעיות אופטימיזציה. שיטה זו משמשת בעיקר לפתרון בעיות בקרה לא לינאריות, מורכבות ומרובות פרמטרים. השיטה בה אשתמש בפרויקט זה פותחה ע"י Thomas Duriez, Steven I. Brunton, Bernard R. Noack [10]. שיטה זו מטרתה לייצר חוק בקרה (אלגוריתם שע"י שימוש ביציאות המערכת הפיזית מחשב את הכניסות שעל המערכת לבצע) על בסיס מדידת ביצועים z והכנסתם לפונקציית מחיר J (עד כמה כל ביצוע במערכת חשוב לנו) ועל ידי עיבוד נתונים על בסיס אלגוריתם גנטי(הסבר בהמשך), מייצר פונקציה(חוק בקרה) $b(s)$ שתלויה במדידת הסנסורים s שקיימים במערכת ומחזיר ערך זה לכניסה למערכת הפיזית שמפעילה את האקטואטורים בהתאם כמו שניתן לראות באיור 2.

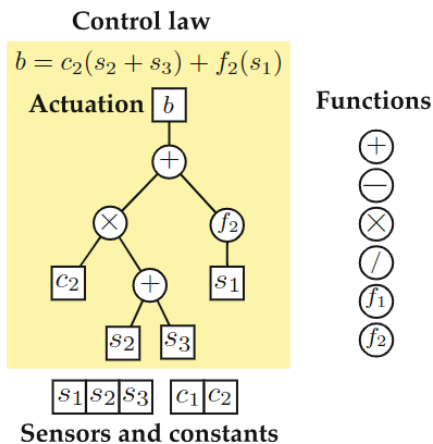


איור 2 - תרשים של מערכת מבוססת MLC. [10]

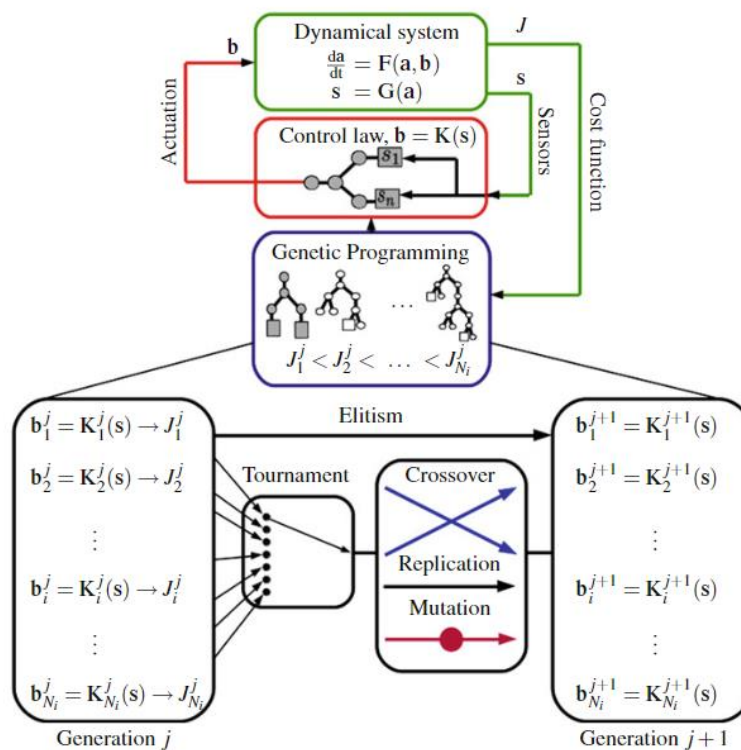
שיטה זו מתבססת על אלגוריתם גנטי - אלגוריתם שמחקה את ההתנהגות של הגנים. לאלגוריתם זה קיימת "אוכלוסייה" באוכלוסייה קיימים מספר איברים אינדיבידואלים, כל איבר באוכלוסייה הוא חוק בקרה מסוים $b(s)$ באיור 4 מוצגת דוגמא של חוק בקרה מסוים - b . על ידי ניסוי של כל איבר באוכלוסייה על המערכת ומדידת ביצועי המערכת עם פונקציית המחיר, האלגוריתם ממין את האיברים בסדר עולה (ככל שפונקציית המחיר תהיה קטנה יותר כך הביצועים טובים יותר) כך שבעצם האיבר הכי טוב נמצא למעלה. מתוך איברים אלה אחוז מסוים נשאר בחוץ ובשביל הדור הבא מתבצעות פעולות שנלקחו מעולם הגנטיקה - אליטה, שכפול, שחלוף ומוטציה. באיור 3 מוצגות פעולות אלו ומה כל אחת מבצעת על איברי האוכלוסייה. אלו פעולות שגורמות לאוכלוסייה לחקור את המרחב שלה ולגלות איברים מסוג $b(s)$ שיגרמו לפונקציית המחיר J להיות טובה יותר [10]. ככל שהאלגוריתם ירוץ יותר דורות (j) וככל שהאוכלוסייה יותר גדולה כך גדל הסיכוי למצוא חוק בקרה טוב יותר.



איור 3 - הפעולות שמבצע אלגוריתם גנטי לאוכלוסייה שלו בין דור j לדור $j+1$. [10]



איור 4 – דוגמא לאיבר מתוך האוכלוסייה [10].



איור 5 – שילוב של המערכת הכללית עם פירוט הפעולות שמבצע האלגוריתם על האוכלוסייה [10].

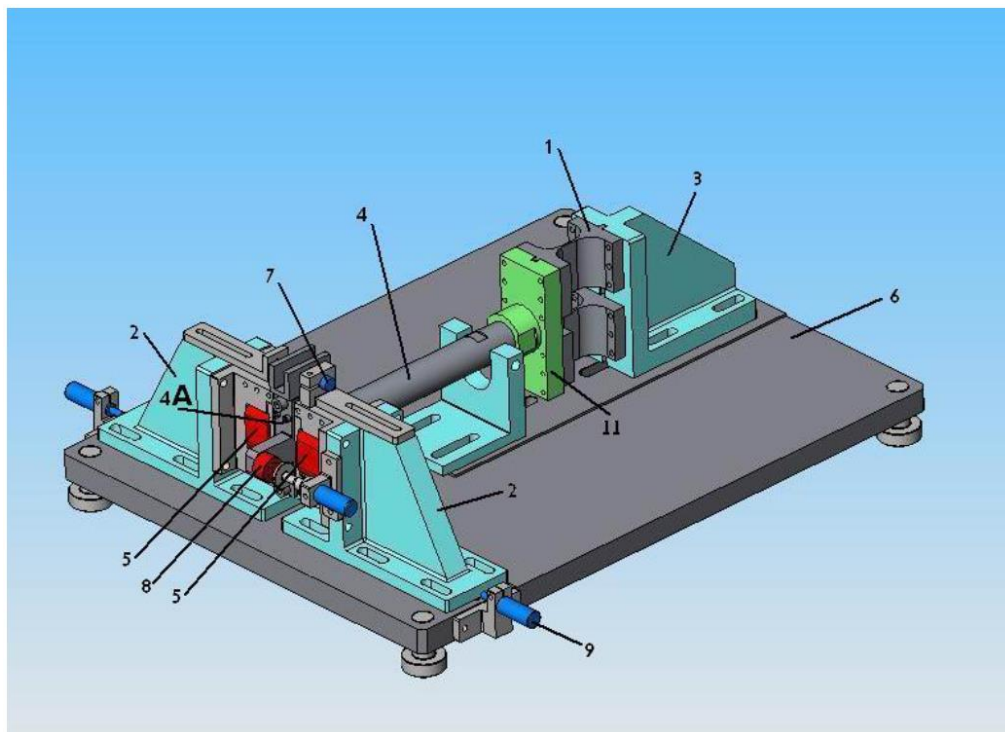
פרק 3: אתגרי הפרויקט

הבעיה המרכזית בה נתקלתי בפרויקט זה היא היישום של שיטה זו על המערכת הפיזית. הקוד של השיטה עצמה כתוב בשפת MATLAB ולכן נדרש בקר שניתן לקשר אותו למחשב בreal time, ובנוסף הבקר צריך לדעת לקבל אותות אנלוגיים של חיישן המרחק ולהוציא אותות אנלוגיים למגברי הזרם. הבקר נדרש גם לקצב דגימה גבוה על מנת לדגום ולבקר את התנועה בצורה טובה. עקב משבר השבבים העולמי נתקלתי במחסור בבקרים ומחסור במגברי זרם.

בעיה נוספת בה נתקלתי היא זמני חישוב ארוכים - דבר אשר מהווה בעיה במערכת אשר אינה יציבה בחוג פתוח עקב כך שבמהלך החישוב המערכת עלולה להתבדר.

פרק 4: ניתוח פיזיקלי של מערכת הניסוי

לטובת הניסויים על מערכת עם דרגת חופש אחת קיימת במעבדה מערכת ניסוי שמדמה מסה עם קפיץ ומרסן :



איור 6 - מתקן הניסוי [11]



מערך הניסוי כולל את מתקן הניסוי (איור 6), מערכת השליטה, מערכת איסוף הנתונים, מערכת המדידה ומגברי הזרם. המתקן מורכב מ-6 חלקים עיקריים: ציר גמיש (1), מוט וליבה נעה (4) ו-(A4), פרופיל קיבוע עבור האלקטרומגנטים (2), פרופיל קיבוע לציר הגמיש (3), אלקטרומגנטים (5) ובסיס (6) [9].

עקרון הפעולה של תנועת הליבה הוא כוח משיכה בין האלקטרומגנט לליבה העשויה מחומר פרומגנטי. על-ידי הזרמת זרם באלקטרומגנט מופעל כוח משיכה של הליבה לאלקטרומגנט. מערכת זו אינה יציבה בחוג פתוח, ולכן חלק אינטגרלי של מערכת זו הוא חוג בקרה אשר מביא את המערכת בחוג סגור ליציבות. הכניסה של חוג הבקרה היא אות מחיישן קרבה (איור), והיציאה היא זרם לאלקטרומגנט. הפיתוח המתמטי הבא מבוסס על המאמר של ד"ר זיו ברנד ואחרים [11]. השדה המגנטי נוצר בעקבות תנועת מטענים (זרם) או באמצעות מגנט קבוע. השדה המגנטי H , המתפתח סביב סליל בעל N כריכות הזורם בהם זרם I מחושב מתוך חוק אמפר (Ampere):

$$\oint H dl = NI \quad (\text{משוואה 1})$$

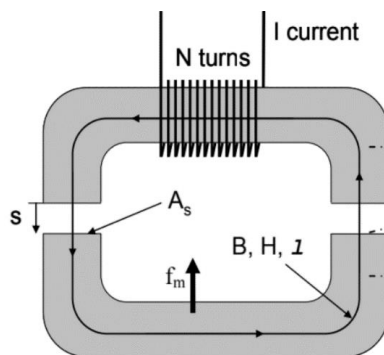
כאשר I מסלול הלולאה המגנטית. השדה המגנטי H אינו תלוי בחומר הנמצא סביב המוליך המשרה את השדה. הקשר בין השדה המגנטי לצפיפות השטף המגנטי B הוא:

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (\text{משוואה 2})$$

כאשר $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ הוא מקדם הפרמביליות בריק ו- μ_r הוא מקדם פרמביליות יחסית של החומר דרכו עוברים קווי השטף המגנטי. ערכו של μ_r בואקום הוא 1 ובחומרים פרומגנטיים גדול בהרבה מאחד. השטף המגנטי ϕ מוגדר כאינטגרל של צפיפות השטף המגנטי על פני שטח מסוים A על-ידי:

$$\phi = \int_A B dA \quad (\text{משוואה 3})$$

באיור 7 מתואר תרשים של האלקטרומגנט והליבה הפרומגנטית. בגאומטריה זו סביר להניח שצפיפות השטף קבוע וקווי השטף תמיד ניצבים או מאונכים למשטח.



איור 7 - תרשים של אלקטרו מגנט [11]

מתוך חוק אמפר מתקבל:

$$\oint H dl = H_{iron} l_{iron} + H_{gap} l_{gap} = H_{iron} l_{iron} + H_{gap} 2s = NI \quad (4 \text{ משוואה})$$

בהצבת משוואה 2 לתוך משוואה 4 ובהנחה כי צפיפות השטף נשמרת במעבר מהליבה לאוויר, מתקבל:

$$l_{iron} \frac{B}{\mu_0 \mu_r} + 2s \frac{B}{\mu_0} = NI \quad (5 \text{ משוואה})$$

פתרון משוואה 5 עבור השטף המגנטי מניב:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{\left(\frac{l_{iron}}{\mu_r} + 2s\right)} \quad (6 \text{ משוואה})$$

אם $\mu_r \gg 1$ ניתן להזניח את השפעת הליבה. במקרה זה:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{2s} \quad (7 \text{ משוואה})$$

ההשראות L במסלול המגנטי היא היחס בין השטף המגנטי ϕ הנוצר על-ידי כריכה אחת בסליל לזרם הזורם בה i. סכום השטף המגנטי ϕ הינו:



$$L = \frac{N\phi}{i} \quad (\text{משוואה 8})$$

ע"י הצבת שטף מגנטי השווה לצפיפות השטף המגנטי B ממשוואה 7 כפול השטח היעיל של מרווח האוויר A_s במשוואה 8, נקבל את ההשראות L :

$$L = N^2 \mu_0 A_a \frac{1}{2s} \quad (\text{משוואה 9})$$

על-פי חוק פרדיי (Faraday) על פני מוליך הנמצא בשדה מגנטי משתנה מתפתח מתח מושרה v :

$$v = N \frac{d\phi}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (\text{משוואה 10})$$

הכוח המופעל ע"י האלקטרומגנט מחושב ע"י הנגזרת של האנרגיה האצורה בהתקן לפי המרחק :

$$f_m = -\frac{dW_m}{ds} = -\frac{d\left(\frac{\phi^2 R_L(s)}{2}\right)}{ds} \quad (\text{משוואה 11})$$

כאשר R_L ההתנגדות המגנטית (Reluctance) של המעגל המגנטי. עבור אלקטרומגנט כמתואר באיור 4 עיקר ההתנגדות היא של מרווחי האוויר והביטוי עבורה הוא :

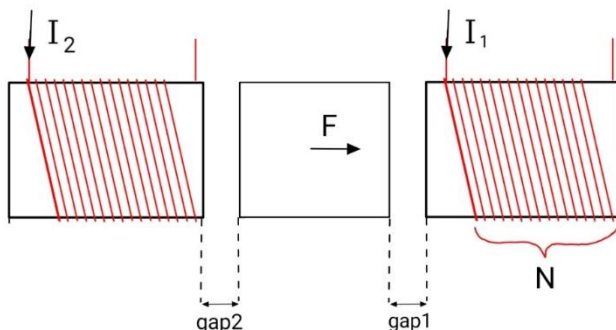
$$R_L = \frac{l}{\mu A} = \frac{2s}{\mu_0 A_s} \quad (\text{משוואה 12})$$

לפיכך מתקבל עבור הכוח :

$$|f_m| = \frac{\mu_0 A_s (NI)^2}{4s^2} = C \frac{I^2}{s^2} \quad (\text{משוואה 13})$$

$$C = \frac{1}{4} \mu_0 N^2 A_s \quad \text{כאשר}$$

הכוח הפועל על-ידי האלקטרומגנט הוא ביחס ישר לריבוע סך הזרם העובר בכריכותיו וביחס הפוך לריבוע המרווח. באיור 8 ניתן לראות את האוריינטציה של האלקטרומגנטים כלפי הליבה.



איור 8 - תרשים של הכוחות הפועלים על הליבה

כעת, על פי משוואה זו נוכל לפתח את המשוואה הדינאמית של מערכת הניסוי ע"פ חוק שני של ניוטון:

(משוואה 14)

$$m\ddot{x} = C \frac{I_1^2}{gap_1^2} - C \frac{I_2^2}{gap_2^2} - c\dot{x} - kx$$

כאשר $gap_1 = L_0 - X$ וכמו כן- $gap_2 = L_0 + X$ לכן מתקבל:

(משוואה 15)

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} \left(C \frac{I_1^2}{(L_0 - X)^2} - C \frac{I_2^2}{(L_0 + X)^2} - c\dot{x} - kx \right)$$

בכדי שנוכל לבקר את המערכת בצורה לינארית למטרת סימולציות והשוואות יש לבצע לינאריזציה סביב נקודת שיווי משקל. לאחר לינאריזציה מתקבל:

(משוואה 16)

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} \left(CI_1^2 \left(\frac{1}{L_0^2} + \frac{2}{L_0^3} X \right) - CI_2^2 \left(\frac{1}{L_0^2} - \frac{2}{L_0^3} X \right) - c\dot{x} - kx \right)$$

נגדיר את זרם הבקרה שלנו I_c ועל מנת להיות בתחום עבודה יציב אנו מוסיפים לזרם הבקרה זרם "bias" - זרם של 30[mA] אשר מוציא את האלקטרומגנטים מהתחום בו ישנן תופעות אשר איננו רוצים.

לכן: $I_1 = I_c + I_b$ וכמו כן $I_2 = -I_c + I_b$. לאחר הצבה מתקבל:

(משוואה 17)

$$\ddot{x} = \left(-\frac{4CI_b^2}{mL_0^3} - \frac{k}{m} \right) x - \frac{c}{m} \dot{x} + \frac{4CI_b}{mL_0^2} I_c$$

פרק 5: תוצאות ניסויים וסימולציות

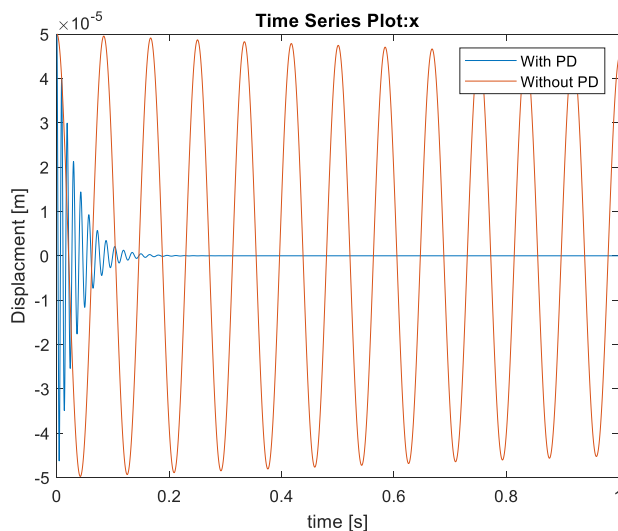
בחינת אלגוריתמי בקרה בסימולציה עבור המערכת הנתונה ביצעתי באמצעות MATLAB. המודל המתמטי הלא לינארי (משוואה 16) ייצגה את המערכת הפיזית (איור 6) וכמו כן ביצעתי לינאריזציה סביב נקודת שיווי משקל על המודל. במודל קיימים 4 פרמטרים קבועים: המסה בקצה המוט m , קשיחות הגמישון k , קבוע הריסון c וקבוע המגנטיות C . הערכים כוילו בצורה ניסויית על המערכת:

יחידות	ערך	סימן
kg	0.18	m
N/m	309.29	k
Ns/m	0.179	c
Nm^2/A^2	$3.73E-6$	C

סימולציות

סימולצית PD

באיור 9 ניתן לראות את סימולציית תגובת המערכת כאשר מיקומה ההתחלתי נמצא ב-50 מיקרו מטר ללא בקרה כלל וגרף נוסף עם בקרת PD.



איור 9 - תגובת המערכת להזזה עם ובלי בקרת PD

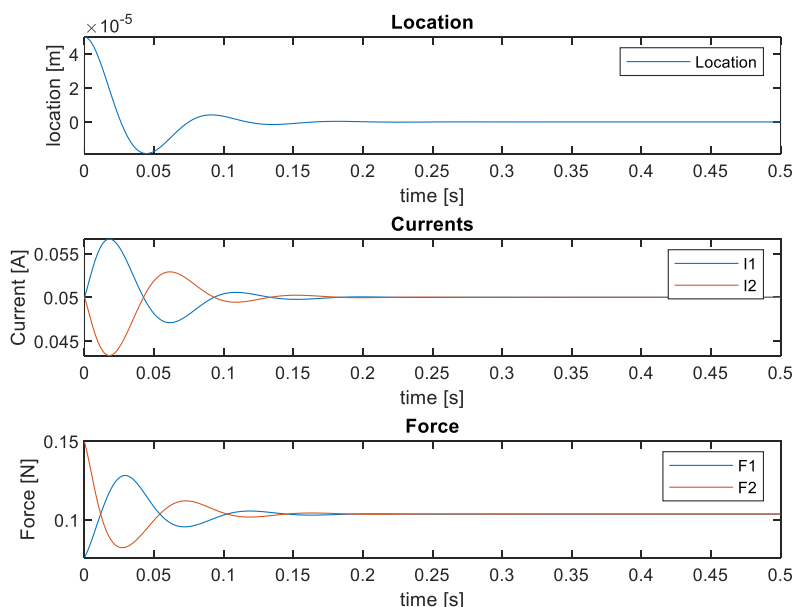
בגרף זה ניתן לראות את התזוזה בזמן כתגובה למצב התחלתי, אפשר לראות שבהשפעת בקר ה-PD המערכת מתרסנת מהר מאוד ביחס למערכת ללא בקרה.

סימולציות בקרה אופטימלית (LQR) ושערוך:

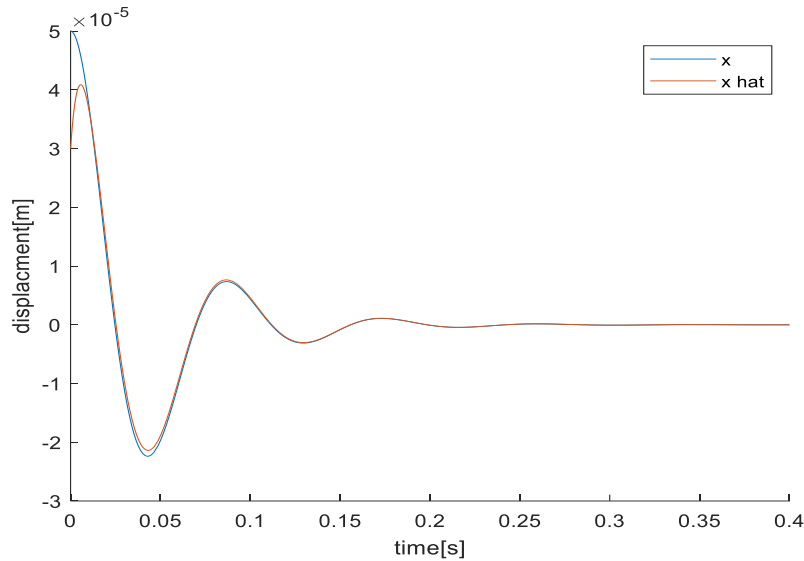
על מנת להבין את ה-MLC יש להבין את הבקרה האופטימלית, מכיוון ה-MLC היא שיטה שמבוססת על אופטימיזציה של פונקציית מחיר. ההבדל הוא שהבקרה האופטימלית מבצעת אופטימיזציה על בסיס מודל דינאמי ידוע. מטריצות המחית נבחרו על סמך ביצועים שהן הניבו, לבסוף הן התכנסו לערכים הבאים:

$$R = [0.001], Q = \begin{bmatrix} 22000 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$$

על מנת ליישם את ה-LQR על המערכת נדרש לשלוט בכל וקטור המצב X [12], עקב כך שבמערכת אין לי מדידה של כל וקטור המצב אני נדרש לבצע שיערוך דינאמי [13]. יישמתי ב-SINULINK מודל עם בקרת LQR עם משערך על מנת לבחון את תגובת המערכת לבקרה זו, ניתן לראות באיור 10 את תגובת המערכת למצב התחלתי של 50 מיקרו מטר וכיצד היא מתייצבת. באיור 11 ניתן לראות כיצד גרף השיערוך מתכנס לגרף המיקום האמיתי כאשר תנאי ההתחלה של המשערך הוא 30 מיקרו מטר.

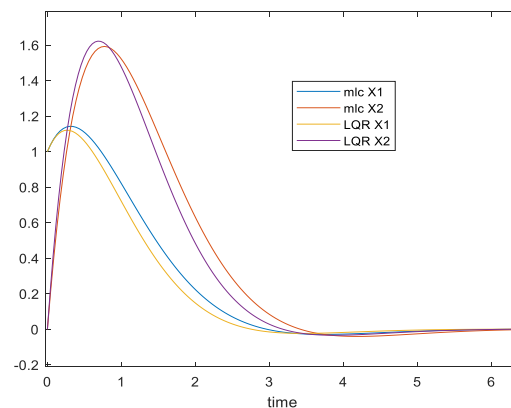


איור 10 - תגובת המערכת עם בקרת LQR ומשערך.



איור 11 - סימולצית תזוזה בזמן של המערכת האמיתית והמשוערכת.

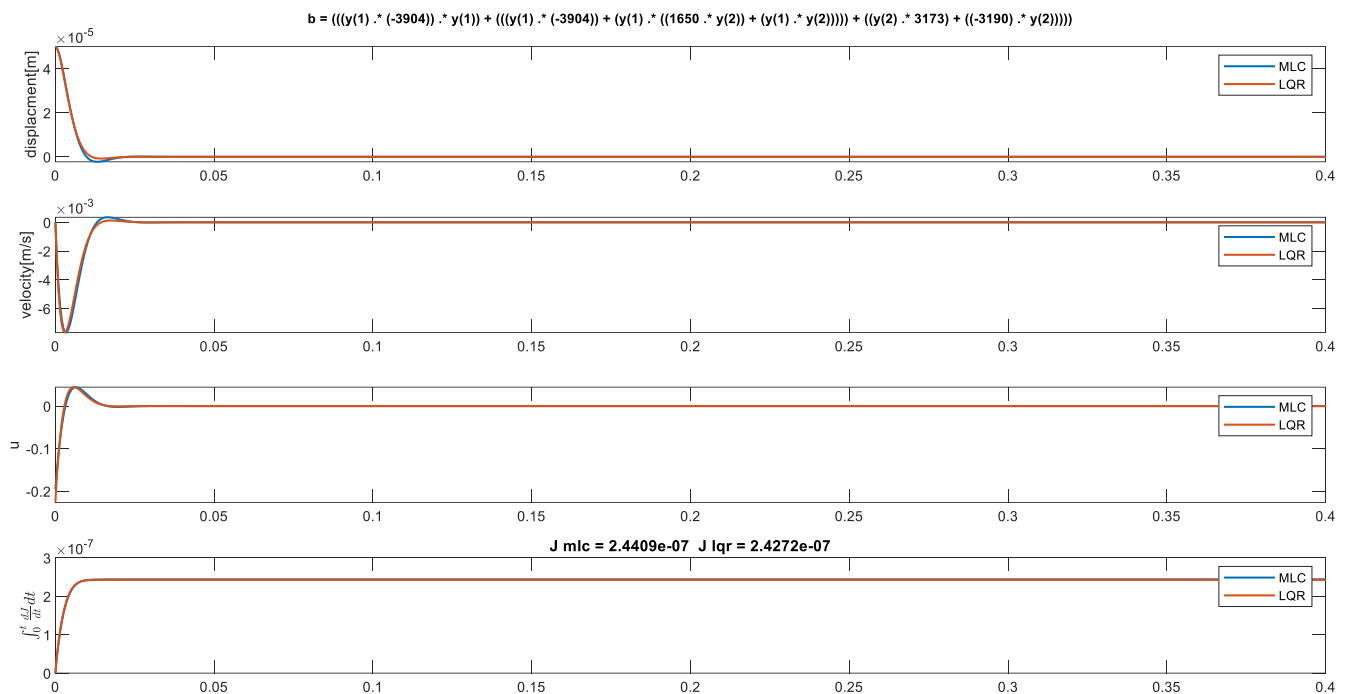
מאחר ושיטת ה-MLC היא בעצם מוציאה ערכי חוק בקרה אופטימליים עבור מערכת דינאמית, אם אריץ שיטה זו על מודל דינאמי לינארי ידוע, בהכרח ערכי חוק הבקרה (b) יתכנסו לאותם ערכים שאותם נמצא בעזרת שיטת בקרה אופטימלית LQR [10]. בתרגיל שהובא בספר [10], ביצעתי ניסוי בנידון על מערכת דינאמית פשוטה - בעזרת פקודת "LQR" ב-MATLAB הוצאתי ערכי K לבקרת המשוב, ובעזרת ה-MLC הוצאתי חוק בקרה b(s) לאחר 7 דורות של חישוב, לאחר מכן השוויתי את ביצועי המערכת עם ערכי ה-LQR ועם ערכי ה-MLC (באיור 12 ניתן לראות את ההשוואה). התוצאות שהתקבלו הראו שאכן ישנה התכנסות של חוק הבקרה ב-MLC לערכי הקבועים שמתקבלים מבקר ה-LQR.



איור 12 - השוואת ביצועי LQR לביצועי MLC

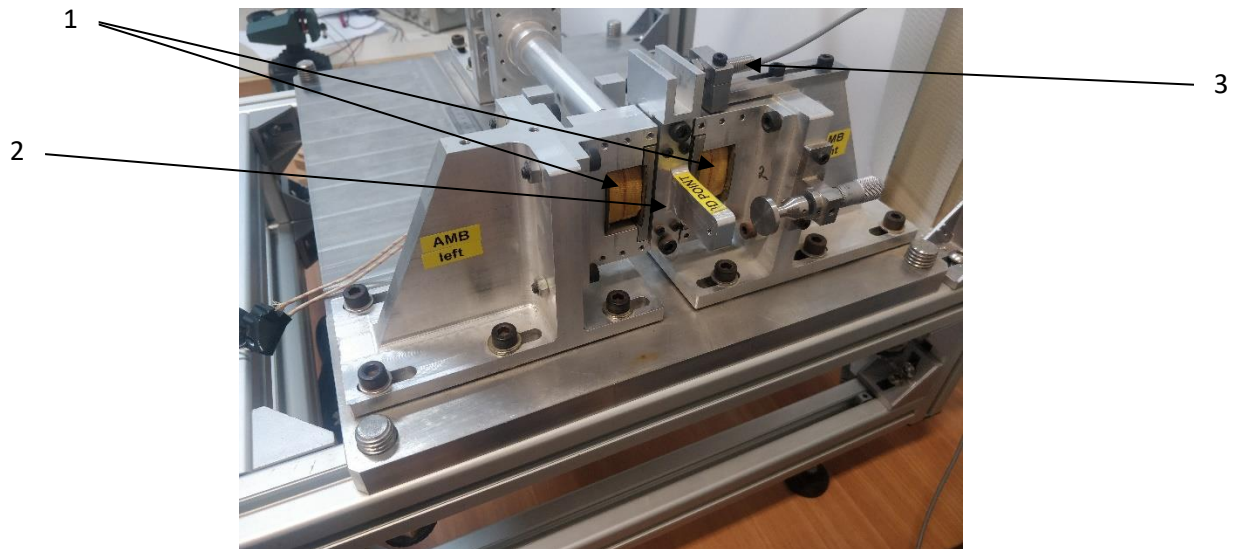


באותו אופן הרצתי את אלגוריתם ה-MLC על המודל הדינמי הלינארי של מערכת הניסוי ואכן קיבלתי גרפים מאוד דומים לגרפים שנותן ה-LQR וכמו כן האיברים הדומיננטיים של חוק הבקרה קרובים מאוד לערכים של בקר PD שעובד על המערכת הפיזית עם ביצועים טובים. באיור 13 ניתן לראות את השוואת ה-MLC ל-LQR. ניתן לראות כי פונקציית המחיר (J) שנותן ה-MLC קרוב מאוד ל-J שמתקבל מה-LQR.

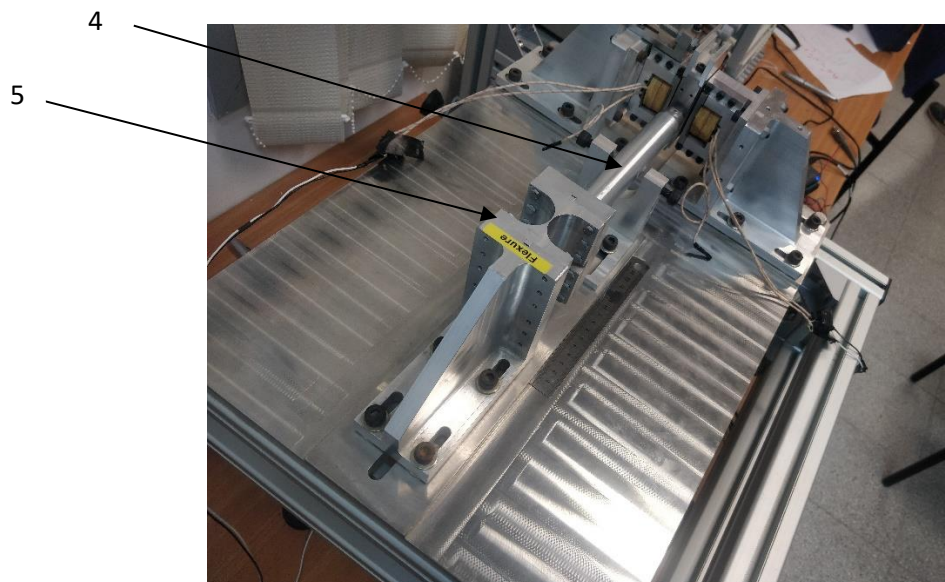


איור 13 - סימולצית השוואה בין תגובת המערכת עם חוק בקרה LQR לחוק שנמצא ע"י ה-MLC

ניסויי מעבדה



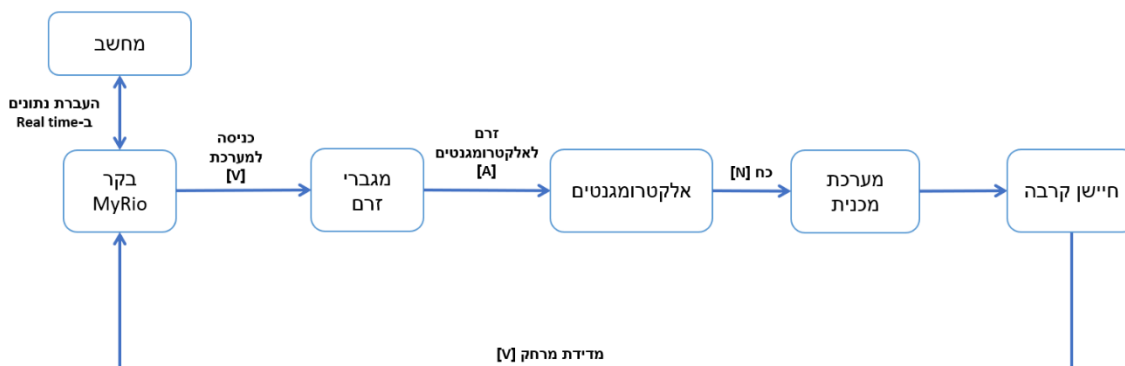
איור 14 - מערכת הניסוי מבט קדמי[11]



איור 15 - מערכת הניסוי מבט אחורי[11]

באיורים הנ"ל מוצג המדגים הטכנולוגי אשר יושב במעבדה אשר פותח ע"י כותבי המאמר[11]. ניתן לראות את האלקטרו מגנטים(1), הליבה הנעה(2), חיישן מדידת המרחק(3) הקורה השלוחה(4) הגמישון(5). תפקיד האלקטרו מגנטים הוא לבקר את המערכת וכמו כן אף להכניס הפרעה למערכת. תפקיד הגמישון הוא לאפשר למערכת גמישות בכיוון הרצוי על מנת לדמות מערכת בעלת דרגת חופש אחת. תפקיד הקורה הוא לחבר בין הליבה לבין הגמישון. הליבה עשויה חומר פרו-מגנטי כדי לאפשר שליטה לאלקטרו מגנטים. על מנת ליישם את שיטות הבקרה במעבדה השתמשתי בבקר מסוג MyRio

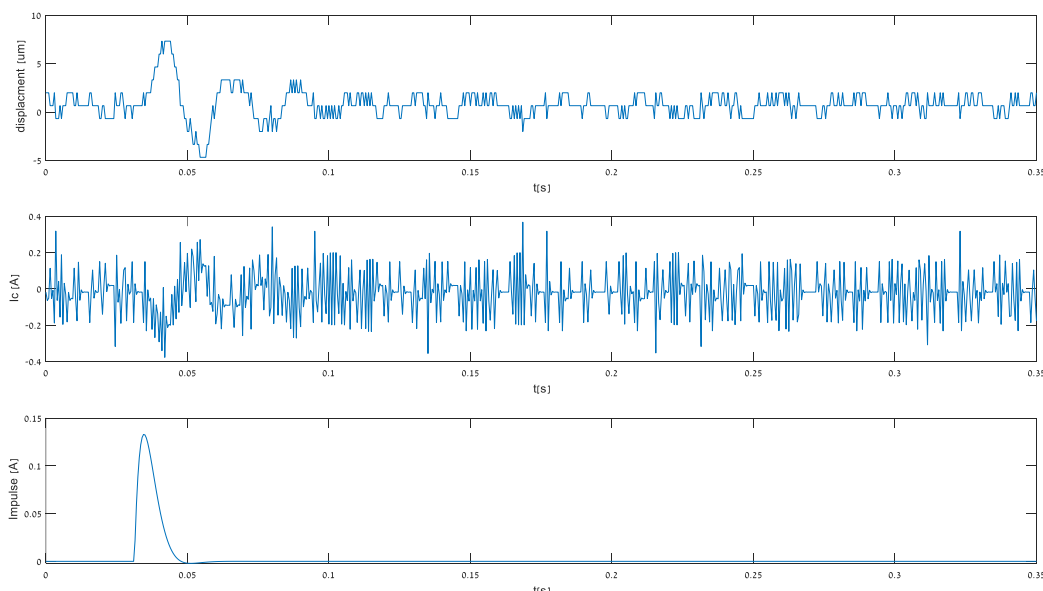
של חברת NI פועל בסביבת עבודה LabView ניתן לראות באיור הבא את דיאגרמת חוג הבקרה הסגור אשר אפשרה את הניסויים :



איור 16 - דיאגרמת חוג סגור עם בקר MyRio

ניסוי PD :

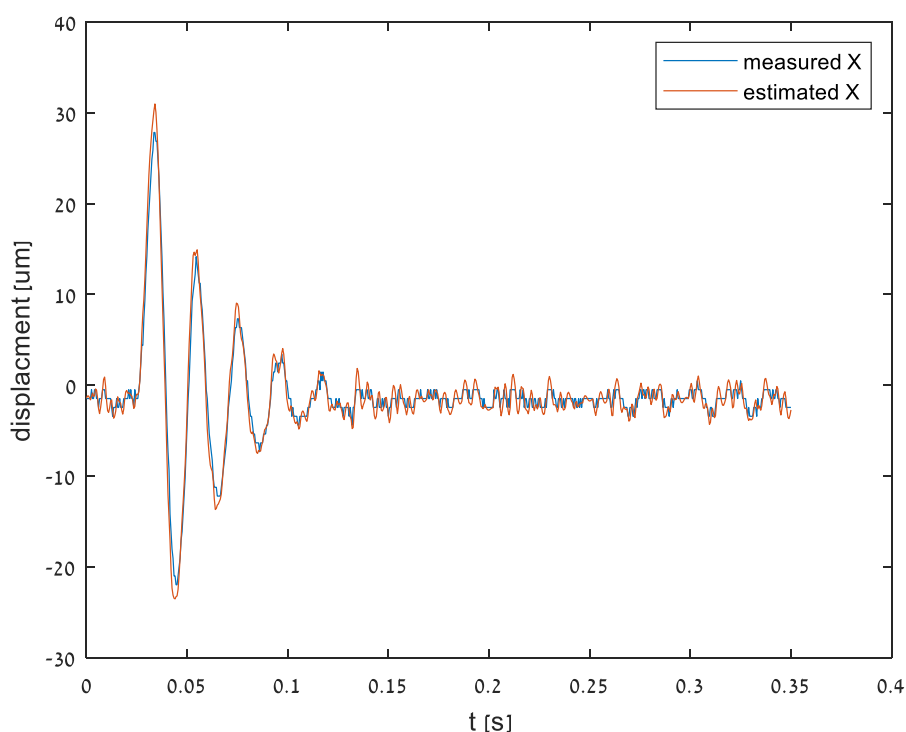
בניסוי PD ערכי הבקרה נבחרו בצורה שרירותית. בגרפים הבאים ניתן לראות את תגובת המערכת הפיזית לכניסת Impulse (בהמשך ייושם פילטר שיסנן תדרים גבוהים מהשפעת המשוב הדיפרנציאלי) :



איור 17 - ניסוי בקרת PD עם כניסת Impulse על המערכת הפיזית

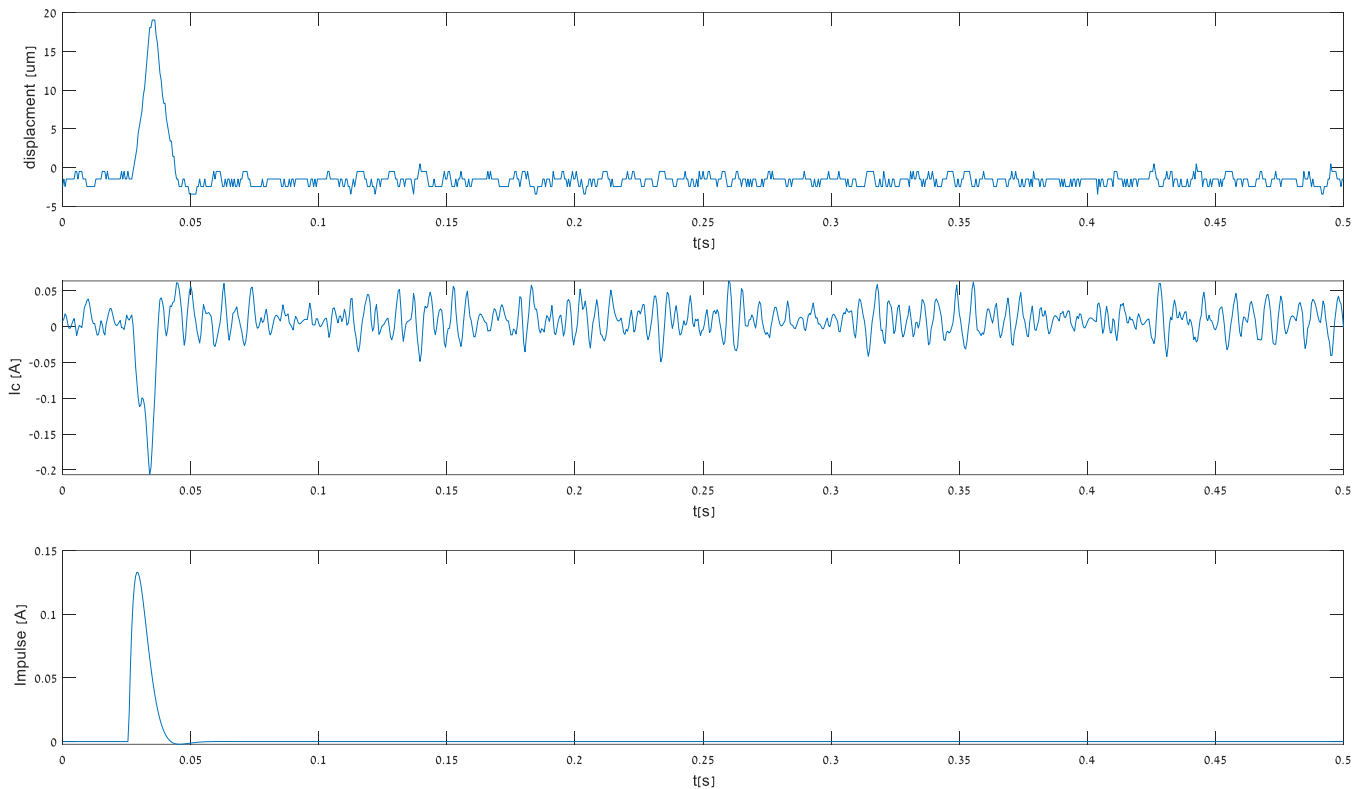
ניסוי LQR:

ערכי מטריצות המשקל זהים לערכים שיושמו בסימולציה. על מנת להשלים את מרחב המצב (לקבל את המהירות) השתמשתי במשעך דינאמי שפותח בסביבת LabView. בגרף הבאים ניתן לראות את גרף התזוזה הנמדדת ע"י חיישן וכיצד גרף התזוזה המשוערכת מתכנס אליו. חשיבות השערוך היא גדולה מאוד בגלל העובדה שהבקרה מתבססת על משתני המצב המשוערכים וניתן להסיק כי אם גרף המיקום המשוערך מתכנס כך לגרף המדידה עצמה אז המהירות המשוערכת תשקף את המהירות האמיתית של המערכת:



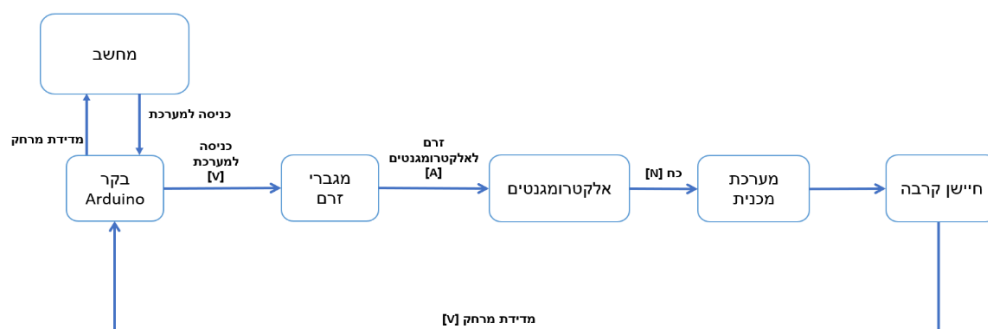
איור 18 - גרף ניסוי משעך דינאמי על המערכת הפיזית

בגרף הבא ניתן לראות את תגובת המערכת הפיזית לכניסת Impulse אפשר לראות התנהגות דומה לבקר ה-PD אך ישנם כמה הבדלים - ב-PD התזוזה קטנה יותר מאשר ב-LQR, ההתכנסות ארוכה יותר וכמו כן ישנה תגובת יתר בבקרת ה-PD אפשר לראות כי ב-LQR ההתכנסות מהירה יותר וכמעט ואין תגובת יתר:



איור 19 - ניסוי בקרת LQR עם כניסת Impulse על המערכת הפיזית

לטובת המשך הניסוי על המערכת הפיזית במעבדה אני עובד על תשתית בתוכנה שתאפשר את זה. בקר ARDUINO ישמש כ-SLAVE וכל החישובים יתבצעו בעצם על המחשב. כמו כן אתכנן משערך דינאמי ע"מ לקבל את המהירות. באיור 20 ניתן לראות את החוג הסגור של הבקרה על המערכת הפיזית.



איור 20 - חוג בקרה סגור של המשך הניסוי על המערכת הפיזית

פרק 6: דיון ומסקנות

- במהלך סמסטר אי ביצעתי סימולציות, וניסויים במדגים הטכנולוגי במעבדה. כשהרצתי את הסימולציות על מודל דינאמי לינארי, כצפוי ערכי הבקר התכנסו לערכים קרובים לערכי בקר ה-PD שביצעו טובים על המערכת הפיזית. אולם, כאשר הרצתי סימולציה על המודל הדינאמי הלא לינארי חוק הבקרה שהתקבל לא הביא ביצועים טובים על המערכת הפיזית(התבדרות במיקום) עקב כך במקדמי הריסון היו גבוהים מאוד ועוררו מודים שאינם נלקחו בחשבון במודל הדינאמי.
- נוכחתי לראות כי זמני החישוב של האלגוריתם הגנטי ארוכים בעוד שדינמיקת המערכת יכולה להשתנות. ובנוסף, המערכת אינה יציבה בחוג פתוח כך שבמהלך החישובים והרצת חוקי הבקרה המערכת עלולה להתבדר. יש לבחון את האדפטיביות של האלגוריתם על דינמיקה משתנה וכיצד הוא מתכנס לפתרון משתנה בזמן.

משמעות התוצאות

- תוצאות בקרת ה-PD וה-LQR היו טובות וריסנו את המערכת אך נדרש עבורם לחשב את המודל הדינאמי המדויק בעוד שבמחרטה ישנם הרבה גורמים שקשה עד בלתי אפשרי לקחת בחשבון ולכן בקרות מסוגים אלה אולי יפעלו אך לא בצורה אופטימאלית.
- על מנת להתמודד עם על מנת לקבל תוצאות טובות עם ה-MLC עלי להריץ את האלגוריתם על המערכת הפיזית במעבדה - הרצה של האלגוריתם על המודל המתמטי המחושב יכול לגרום לתופעות לא רצויות במערכת הפיזית כמו עירור של מודים גבוהים וכניסה של המערכת לרזוננס.

פרק 7: הערכה כלכלית

פרויקט זה הוא פרויקט מחקרי. עקב משבר השבבים העולמי נמנע מיכולתי לרכוש את מגברי הזרם, בקר מסוג NVIDIA JETSTONE NANO. הרכיב היחיד שנרכש הוא מיקרו בקר מסוג ARDUINO DUE.

מחיר ₪	הסבר	רכיב
266	מיקרו בקר	ARDUINO DUE



פרק 8: תכנית עבודה לסמסטר ב'

- יצירת תשתית להרצת אלגוריתם ה-MLC על מערכת הניסוי בעזרת בקר מסוג Arduino DUE שמתחבר ל-python במחשב וה-python מופעל ע"י MATLAB.
- התאמת מתחים בין החיישן ומגברי הזרם למתחי העבודה של ה-Arduino בעזרת מגברים.
- כיול הבקר עם המערכת הפיזית.
- הרצת ניסוי על המערכת הפיזית עם בקרת MLC.
- עיבוד תוצאות.
- כתיבת דוח מסכם.
- הכנת מצגת.
- כתיבת מאמר לכנס (אופציונלי).
- הגשת הדוח.



פרק 9: סיכום

במהלך סמסטר א' ביצעתי איסוף נתונים מקיף, למדתי נושאי בקרה מתקדמים ולמדתי את ספר הפרויקט[10]. בנוסף על כך ביצעתי סימולציות למודולי הבקרה השונים הנזכרים בפרויקט באמצעות מודל דינאמי שפותח עבור המערכת. הסימולציות נעשו בעזרת תוכנות MATLAB ו-SIMULINK. ערכתי השוואה בתוצאות בין שיטות בקרה (LQR ו-PD). בהמשך הסמסטר ביצעתי ניסויים במדגים הטכנולוגי העומד לרשותי במעבדת המכללה ע"י סביבת עבודה LabView עם בקר מסוג MyRio על מנת לראות את תגובת המערכת הפיזית לבקרים מסוג PD ו-LQR.

נקודת חוזק

- ניתן ליישם את אלגוריתם MLC על מערכת ממשית, ללא ידיעת המודל הדינאמי. האלגוריתם ימצא את חוק הבקרה האופטימלי למזעור פונקציית המחיר הרצויה.

נקודות חולשה

- זמן חישוב ארוך- על מנת למצוא חוק בקרה במערכת הפיסית, נבצע ניסוי בשימוש באלגוריתם MLC, לאלגוריתם זה לוקח זמן רב, דבר המהווה בעיה למערכת לא יציבה בחוג פתוח.
- אלגוריתם MLC אינו אלגוריתם אדפטיבי, כאשר משתנה הדינאמיקה של המערכת, האלגוריתם לא ישנה את חוק הבקרה בהתאם, אלא אם נבצע הרצה מחדש של האלגוריתם.



ביבליוגרפיה

- [1] Z. brand, S. Arogeti “Extended model and control of regenerative chatter vibration in orthogonal cutting”, IEEE,2018.
- [2] G. Quintana, J. Ciurana, “Chatter in machining process: A review,” International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 51, pp. 363–376, January 2011.
- [3] Y. Altintas, M. Weck,” Chatter stability of metal cutting and grinding.” CIRP Annals, vol 53, pp.619-642,2004.
- [4] [L. K. Rivin and H. L. Kang, “Improving dynamic performance of cantilever boring bars”, Ann. CIRP, vol. 38, no. 3, pp. 377–380, Jan. 1989.
- [5] M. H. Miguelez, L. Rubio, J. A. Loya, and J. Fernandez-Saez, “Improvement of chatter stability in boring operations with passive vibration absorbers”, Int. J. Mech. Sci., vol. 52, no. 10, pp. 1376–1384, Jul. 2010.
- [6] F. Chen, M. Hanifzadegan, “Active Damping of Boring Bar Vibration with a Magnetic Actuator”, IEEE/ASME transactions on mechatronics, vol. 20, no. 6, pp. 2783–2794, dec. 2015.
- [7] A.Matsubara, M.Maeda, I.yamaji, “Vibration suppression of boring bar by piezo electric actuators and LR circuit”, CIRP Annals vol.63, no.1 , pp.373-376, jan.2014.
- [8] J. Monnina, F. Kusterb, K. Wegenerb,” Optimal control for chatter mitigation in milling- Part 1: Modeling and control design”, Control Engineering Practice vol.24, pp.156-166,2014.
- [9] Mitchell, T. (1997). Machine Learning, McGraw Hill. ISBN 0-07-042807-7, p.2.
- [10] T. Duriez et al., “Machine Learning Control - Taming Nonlinear Dynamics and Turbulence”, Springer, 2017
- [11] ז.ברנד ואחרים, “מערכת חד ערוצית חלק א' - ריסון תנודות אקטיבי באמצעות חוק משוב PD”, חקריה למחקר גרעיני, 2009.
- [12] Anderson, B. D., & Moore, J. B. (2007). Optimal control: linear quadratic methods. Courier Corporation.
- [13] R. E. Kalman, “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems”, Research Institute for Advanced Study, Baltimore, Md., 1960



נספחים

תאריך 19/12/2021

הזמנת חלקים עבור פרויקט גמר

מספר פרויקט: BS-22-19

שמות הסטודנטים + ת"ז: דניאל לילינטל 311599815

נייד סטודנטים + מייל ליצירת קשר 0547775897 danlil240@gmail.com

שמות המנחים: זיו ברנד + איתן פישר

תיאור קצר של החלקים שיש לרכוש וכיצד יתרמו להצלחת הפרויקט + הערות:

הפרויקט שלי מבוסס על בקרת זרם של אלקטרו מגנטים. לטובת זה אני צריך לרכוש:

1. מיקרו בקר עם קצב דגימה גבוה ו2 יציאות אנלוגיות לטובת שליטה על מגברי הזרם ועל חיישן המרחק

2. בקר להרצת אלגוריתם בקרה מבוסס למידת מכונה.

טבלה לצורך הזמנת החלקים - יש לסדר לפי הסדר בהצעת המחיר!:

#	שם הפריט	תאור הפריט - עד 3 מילים (חיישן, בקר, מד)	מספר קטלוגי	מספר ספק	שם ספק	יחידות	מחיר (כולל מע"מ) ש"ח	הצעת מחיר
1	Arduino Due	מיקרו בקר	A000062	1562905031	דאן אלקטרוניקה בע"מ	1	266.76	מצורפת
2	Nvidia Jetson Nano Developer Kit (V3)	מיני מחשב	DEV-16271	1562905031	דאן אלקטרוניקה בע"מ	1	1023.75	מצורפת
3	משלוח						59.00	
							1351.00	סכום

סה"כ 1351.00 ש"ח

חתימת המנחים: _____

הצעות מחיר מצורפות בדפים הבאים:

19-12-2021

ח.פ. - 514645274

מסמך ממוחשב

הצעת מחיר - 503081

לכבוד : המכללה האקדמית להנדסה - סמי שמעון
כתובת : מכללות פינת בזל ביאליק באר-שבע 84100 - טל: 08-8519056
 פקס: 08-8519056

מק"ט	תאור	כמות	מחיר בש	סה"כ בש
A000062	Arduino DUE	1	228.20	228.20
DEV-16271	NVIDIA Jetson Nano Developer Kit (V3)	1	875.80	875.80
0	דמי משלוח ד. שליחים	1	50.43	50.43
	סיכום ביניים			1,154.43
	הנחה/עיגול			0.27
	סה"כ לפני מע"מ			1,154.70
	מע"מ 17.00%			196.30
סה"כ הצעת מחיר				1,351.00

תנאי תשלום: שוטף + 45

בברכה

דאן אלקטרוניקה

תוקף ההצעה: 14 יום מועדי אספקה: פריטים במלאי -- עד 4 ימי עסקים פריטים שלא במלאי -- עד 14 ימי עסקים ** מועדי האספקה של פריטים שאינם במלאי מתבססים על מצב המלאי של היצרן בחו"ל

