

"נוע תנוע" - תכן ובקרה של רגל רובוטית



המנחה

מר כפיר כהן

פרויקט תכן מוצר חדש - 034353/4

עופר יציב, דן קלנר, חגי בר

הלקוח

מר יונתן ספיץ
"הטכניון"

חישובים דינמיים

משוואת המנוע הכולל תמסורת:

$$T_m' - T_L = (J_G + m^2 J_m) \ddot{\theta}_m + m^2 \cdot B \dot{\theta}_m + M_G$$

משוואת התנועה הכללית של הרגל:

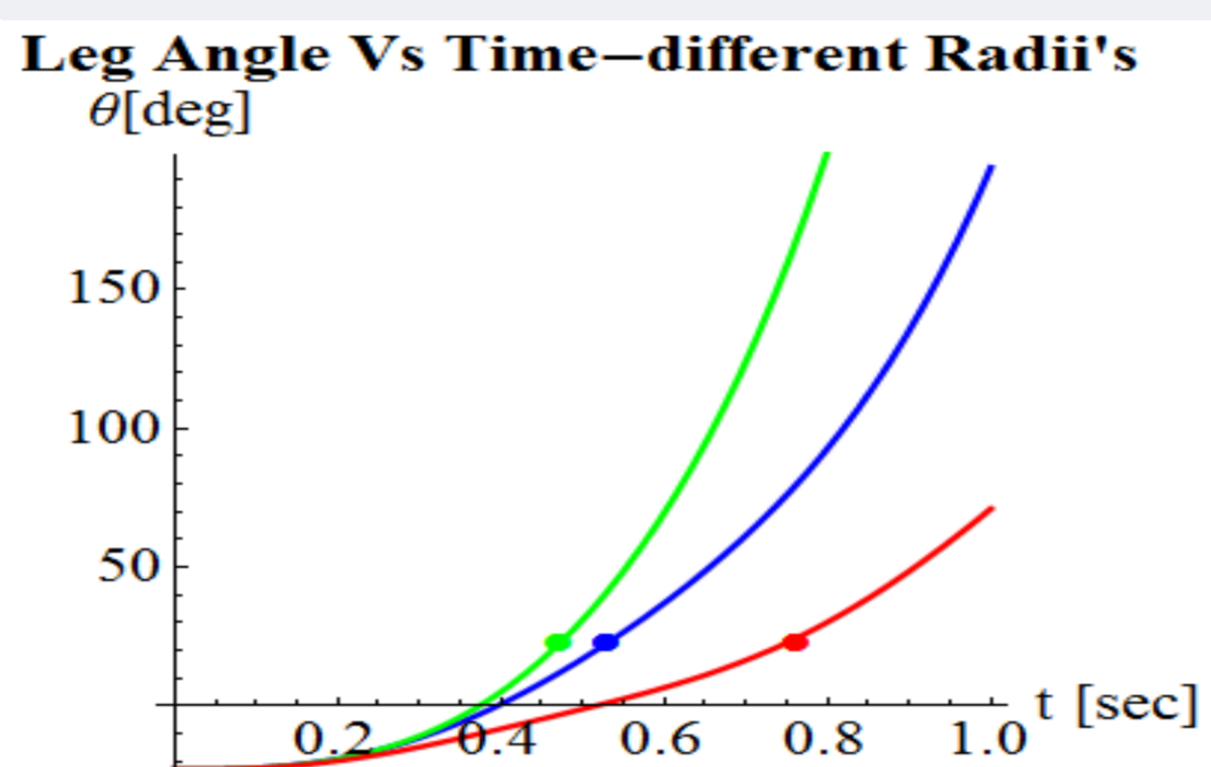
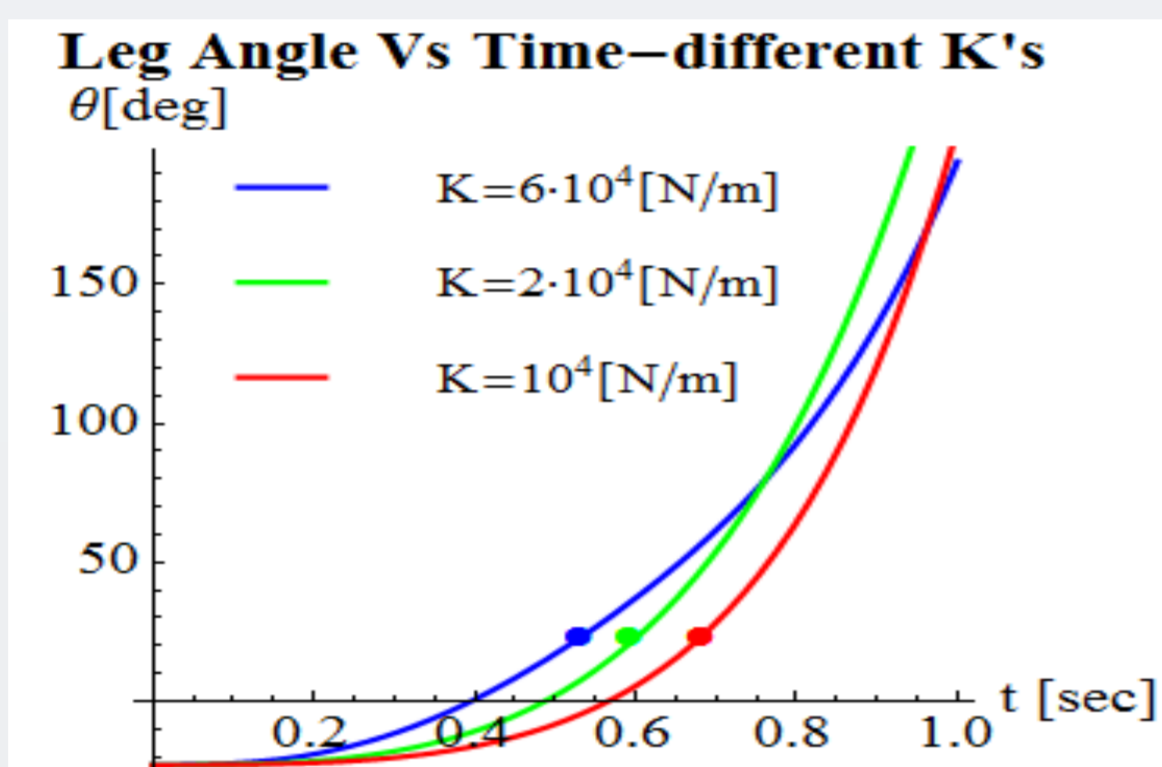
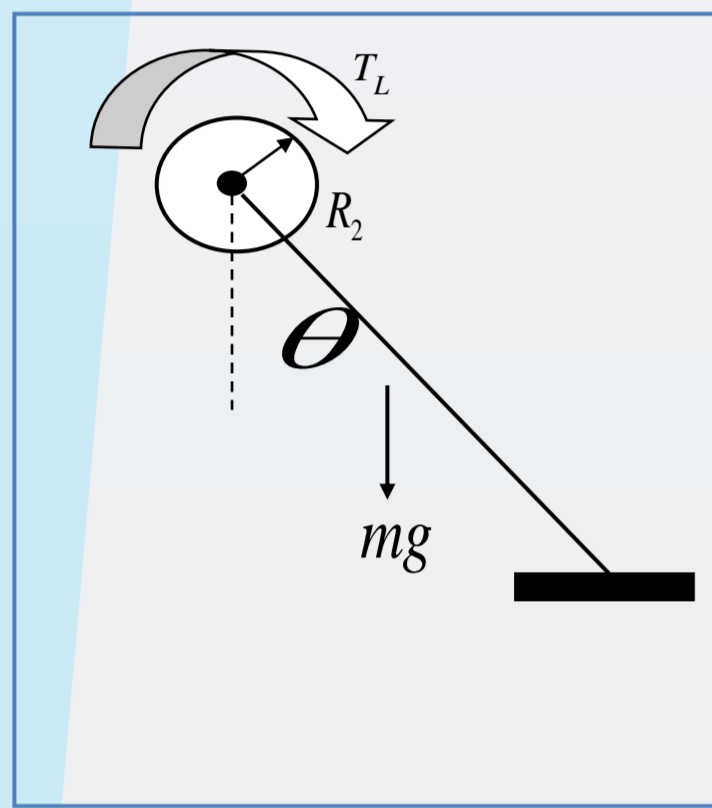
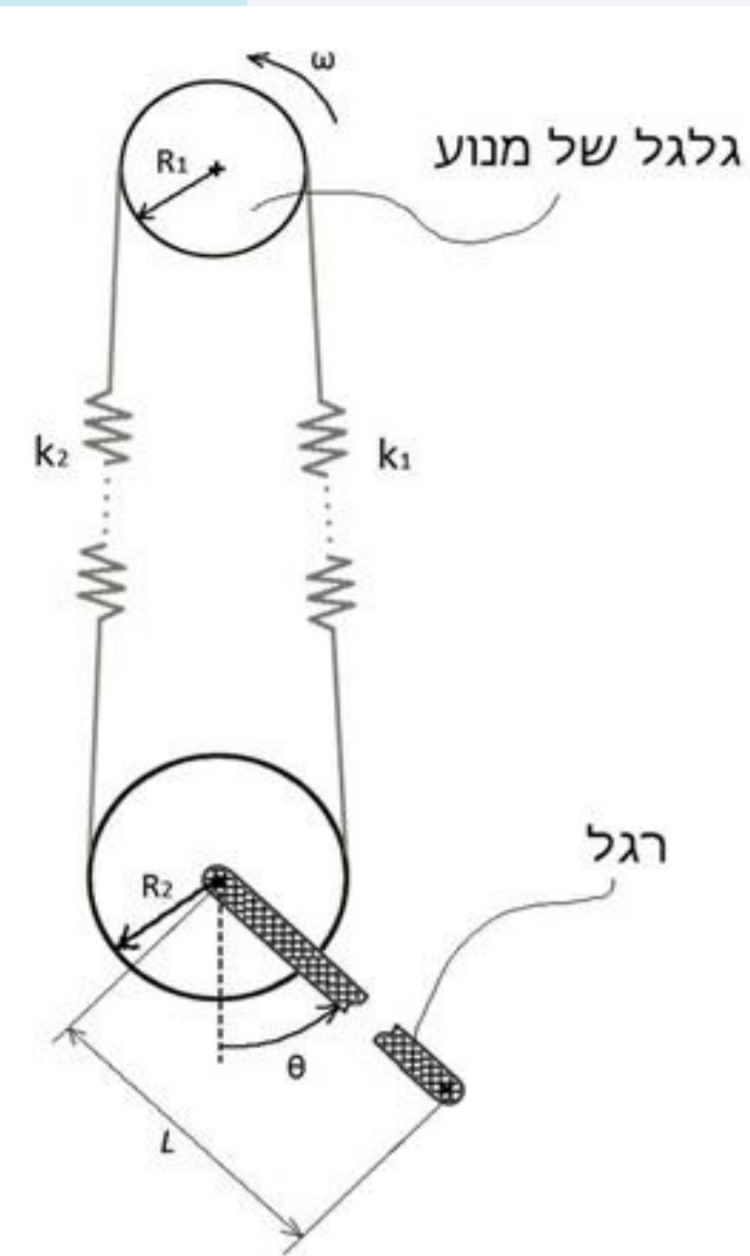
$$J_L \ddot{\theta} = T_L - mg \cdot \frac{L}{2} \cdot \sin \theta \approx T_L - mg \cdot \frac{L}{2} \cdot \theta$$

לאחר הצבות ופישוטים:

$$(J_G + m_{gear}^2 \cdot J_L) \cdot \frac{J_L}{2 \cdot K \cdot R_1 \cdot R_2} \cdot \theta^{(4)} + \left[(J_G + m_{gear}^2 J_m) \cdot \frac{2 \cdot K \cdot R_2^2 - mg \cdot L}{2 \cdot K \cdot R_1 \cdot R_2} + J_L \right] \cdot \ddot{\theta} - mg \cdot \theta = T_m' - m_{gear}^2 \cdot M_R - M_g$$

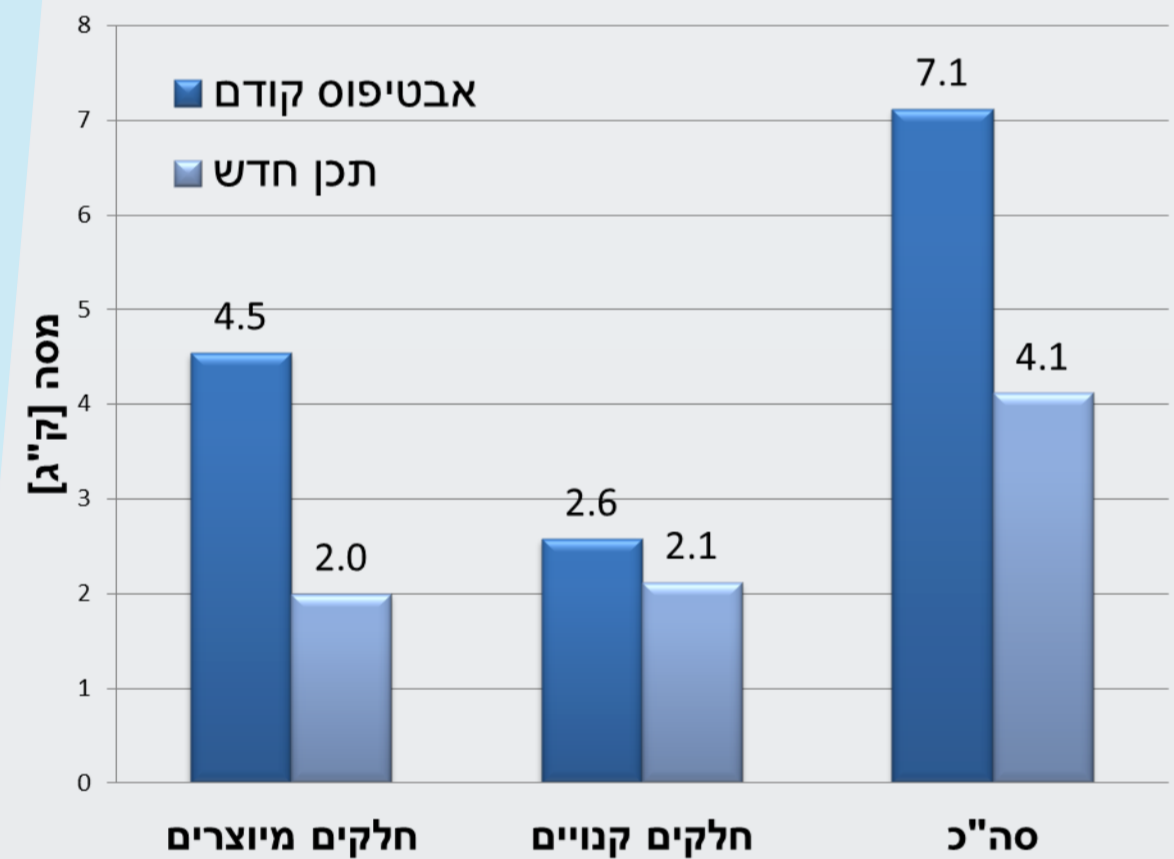
כאשר $T_m' = m \cdot T_m$ הינו המומנט ביציאה מהתמסורת.

הפתרון מתקבל ע"י פתרון משוואת המנוע ללא עומס, מצב המתקבל עקב Backlash- בתמסורת, חילוץ הזמן המתקבל עד להפעלת כוח על המערכת ושימוש בזמן זה כתנאי התחלה בפתרון משוואת התנועה.



התכן הסופי

הורדת מסת הרגל



גרף המייצג את מסת הרגל באבטיפוס הקודם לעומת המסה הנוכחית בתכן החדש. ניתן לראות ירידה משמעותית במסת החלקים המיוצרים לעומת ירידה קטנה יחסית בחלקים הקנויים עקב הדרישה לשימוש במנועים הסיבוביים הקיימים.

ניתן לראות ירידה של כ-42% במסת הרגל!

מכלול עליון - "אגן"

מנוע סיבובי עם גיר המעביר את המומנט דרך מערכת של כבל וגלגלות לציר הסיבוב היושב על שני מיסבים כדוריים. שני אינקודרים היושבים על הגיר ועל ציר הסיבוב קוראים את שינוי הזווית. המכלול מחובר בחלקו העליון לעגלה דרך מסילה ליניארית.

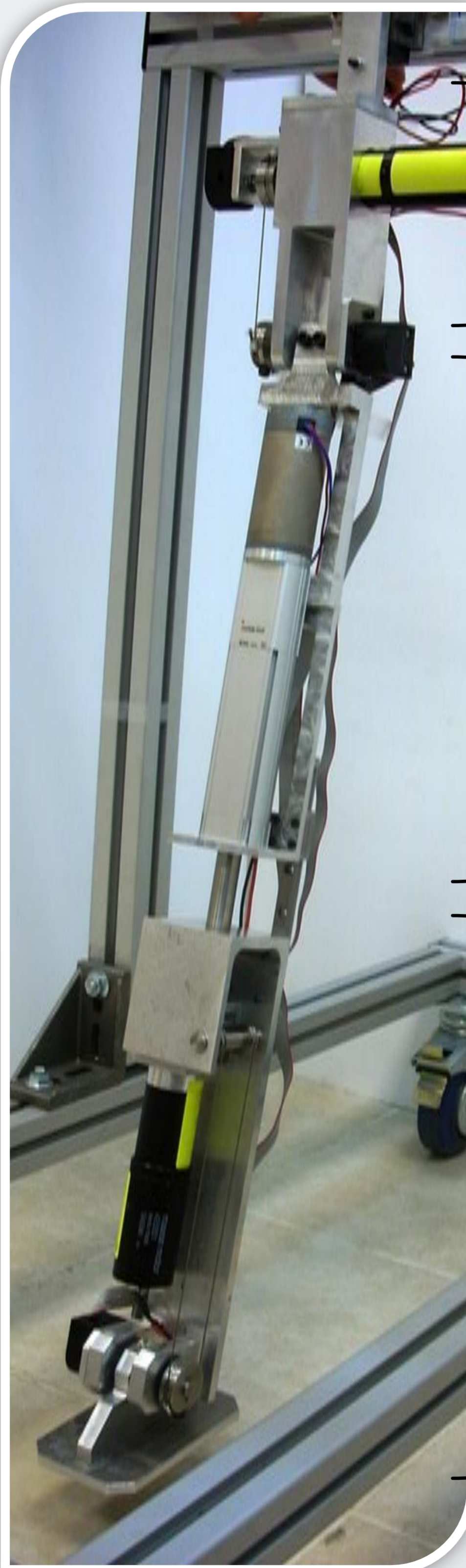
מכלול אמצעי - "ברך"

עיקרו מנוע ליניארי האחראי על התארכות והתקצרות הרגל. המנוע מאפשר לרגל מצד אחד לגעת ברצפה בכל קצה מהלך, מצד שני הרגל ארוכה ביותר, ומצד שני לאפשר לרגל להתקצר ולא לגעת ברצפה במשך שאר התנועה.

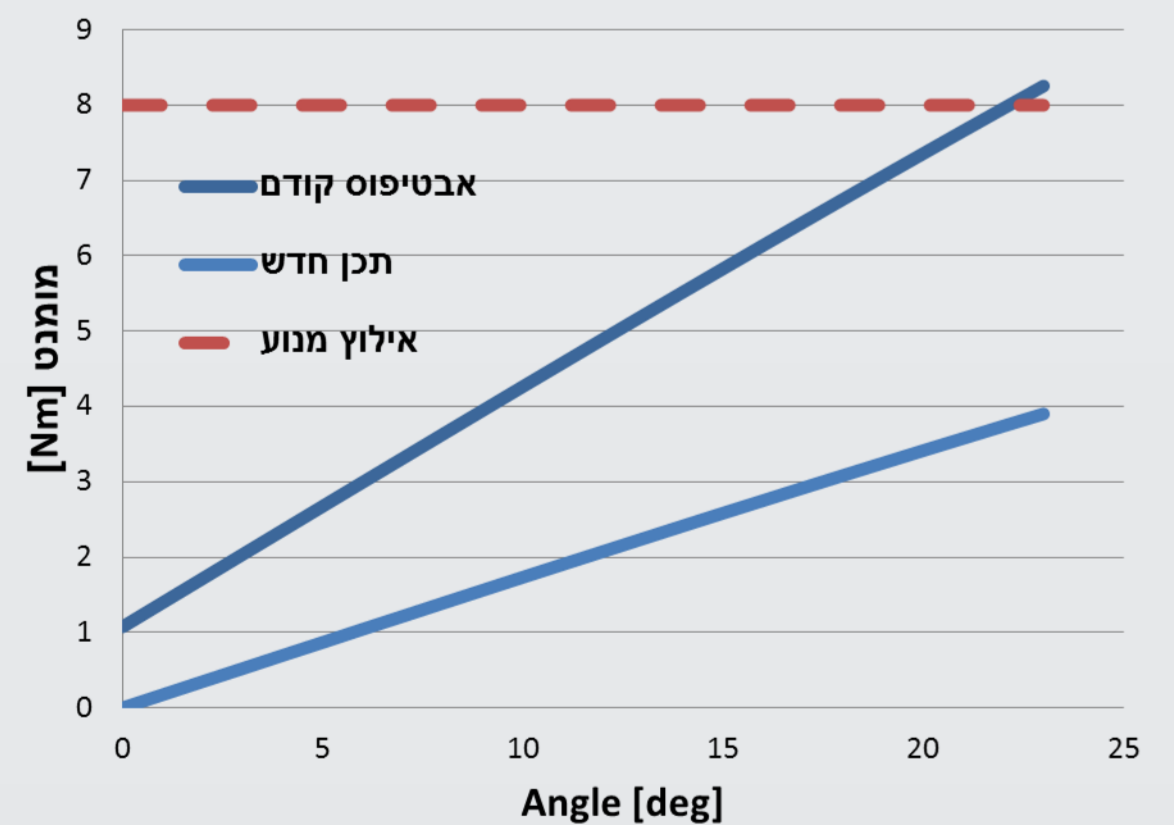
המנוע מחובר לחלק נושא ולשתי מסילות ליניאריות האחראים על העברת המומנט לאורך הרגל והמנוע. מכלול הברך מחובר בחלקו העליון לציר סיבוב האגן ובחלקו התחתון למכלול כף הרגל.

מכלול תחתון - "כף רגל"

מנוע סיבובי עם גיר המעביר את המומנט דרך מערכת של כבל וגלגלות לציר הסיבוב היושב על שני מיסבים כדוריים ואליו מחוברת כף הרגל. שני אינקודרים היושבים על הגיר ועל ציר הסיבוב קוראים את שינוי הזווית. המכלול מחובר בחלקו העליון למנוע הליניארי ובחלקו התחתון לכף הרגל המוגעת ברצפה בעת פעולתו.



המומנט בציר ה"אגן" כתלות בזווית הסיבוב



גרף המייצג את המומנט הדרוש בציר האגן על מנת להניע את הרגל כתלות בזווית המתפתחת. עבור האבטיפוס הקודם הגרף מתייחס גם לחיכוך בציר כתוצאה מהעדר מיסוב.

תקציר

פרויקט זה מציג תכן וייצור של אב-טיפוס של רגל רובוטית לצורך בדיקת היתכנות חוק הבקרה מסוג Compass-Gait-Walker, אשר פותח ע"י הלקוח.

מרבית הרובוטים הדו-רגליים מבוקרים בשיטה קוואזי-סטטית. לעומת זאת, רובוטים המבוקרים בשיטה דינמית מציגים הליכה טבעית יותר, דבר העושה אותם מהירים יותר וחסכוניים יותר באנרגיה. בהתבסס על מושגים אלה, תוכנן בקר ביומימטי בחוג סגור ומושם ב-Compass-Gait walker ע"י יונתן ספיץ ומרים זקסנהויז.

פרויקט זה מבוסס על אבטיפוס קודם שנבנה אך מציג תכן חדש ומפורט של רגל רובוטית תוך הקפדה על הפחתה משמעותית של מסת הרגל, מיסוב ותיכונן מנגנוני העברת המומנט, כל אלה תוך שמירה על הדרישות הבסיסיות של מודל הבקרה והתחשבות בדרישות הדינמיות כגון מהירות הליכה וזמן בניית המומנטים.

בפרויקט זה אנו מציגים רגל רובוטית המונעת ע"י מנועים סיבוביים המדמים את מפרק האגן ומפרק כף הרגל ומנוע ליניארי המדמה את מפרק הברך. העברת המומנט מתבצעת ע"י מכלול כבלים וקפיצי מתיחה.

דרישות הלקוח

דרישות הפרויקט היו מגוונות וכללו הן דרישות הנגזרות מהתכן והן דרישות הלקוחות בחשבון את הדינמיקה ומתחשבות באילוץ הבקרה:

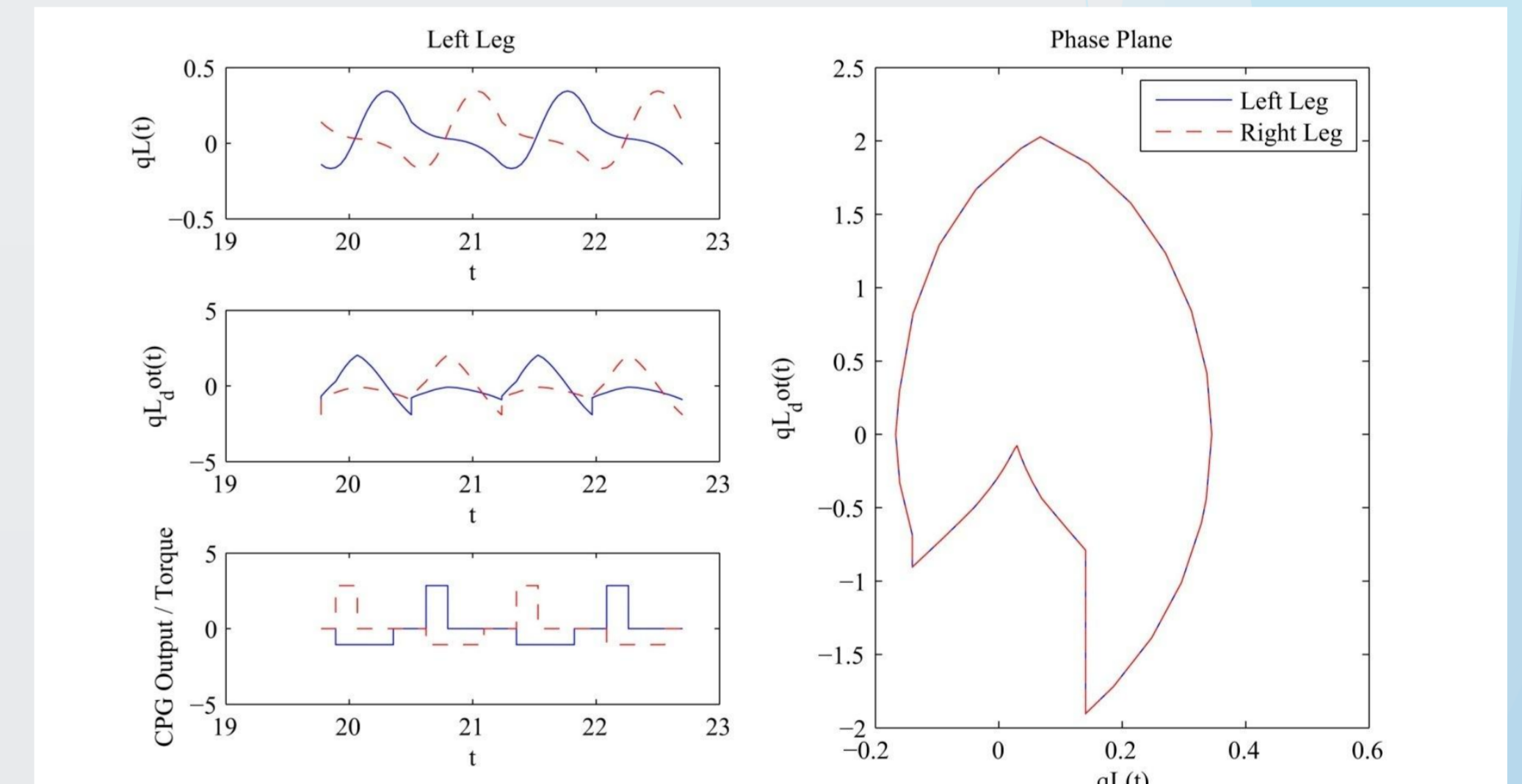
- שתי דרגות חופש סיבוביות: מפרק אגן ומפרק כף רגל.
- שתי דרגות חופש אנכיות: מפרק הברך וחיבור הרגל לעגלה.
- מנגנוני העברת מומנט הכוללים אלמנט קפיצי.
- שגיאה בבניית המומנט של לא יותר מ-0.1Nm.
- זמן בניית המומנט של לא יותר מ-0.2 שניות.
- ממדי רגל דומים לאבטיפוס הקודם. גובה הרגל לא יעלה על מטר אחד.
- זווית תנועה (של המנועים הסיבוביים) המדמות תנועה של רגל אנושית.
- הפחתה של כ-40% ממסת הרגל (יעד משקל של כ-4 ק"ג).
- האבטיפוס יזכיר בצורתו רגל אנושית.

רקע תיאורטי

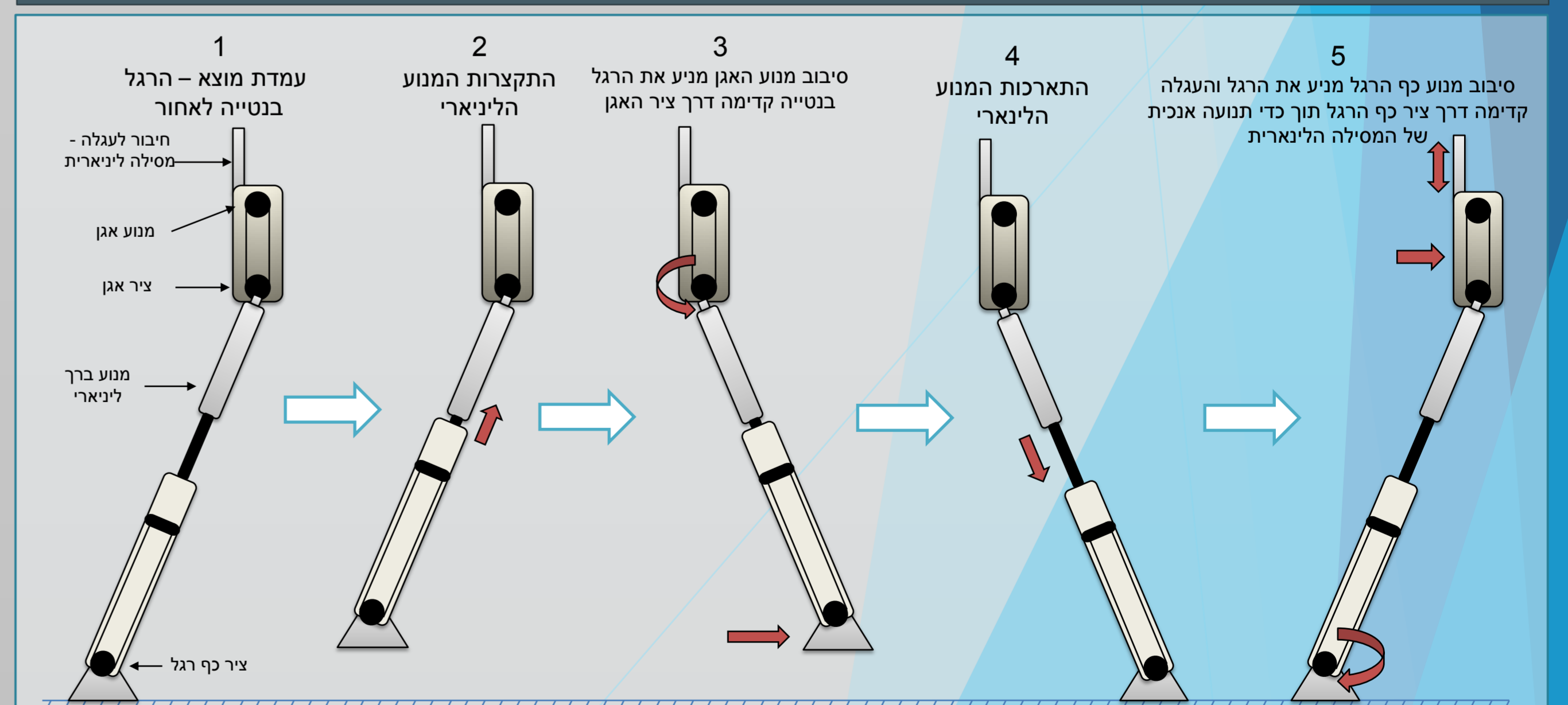
מאפייני התכן המכאני אשר מיושמים בפרויקט זה מתבססים על חוק הבקרה והסימולציה הממוחשבת אשר נכתבו ע"י הלקוח. חוק הבקרה מאופיין ע"י הפעלה מחזורית של מומנטים במפרק עליון, "אגן", ובמפרק תחתון, "כף רגל", כך שהמערכת לעולם איננה מגיעה למצב ש"מ סטטי, אלא מונעת נפילה ע"י לקיחת צעד נוסף. צורת הליכה זו מנצלת את האינרציה של המערכת ע"מ להמשיך להתקדם ועל כן הינה מהירה יחסית להליכה קוואזי-סטטית.

תנועה זו מתאפשרת ע"י שני מנועים, אחד אשר נמצא ב"אגן" ושני אשר נמצא ב"כף הרגל" והם שאחראים להפעלת המומנטים והתקדמות הרגל, ומנוע ליניארי המאפשר לרגל להתארך ולהתקצר במהלך התנועה.

תוצאות הסימולציות המוצגות להלן היו מסגרת לתכן אותו ביצענו, אשר מאפשר ליישמן בפועל.



סכמת התנועה - צעד אחד



האתגרים

- האתגרים בפרויקט נבעו הן מהפן המכני של התכן והן מהפן הנוגע לתחום הבקרה של הרגל.
- בפן המכני האתגר המרכזי היה הורדת מסת הרגל בכ-40%. תהליך התכן כולו בוצע תוך התחשבות במסת הרגל ודגש על מינימיזציה של חלקים וחומר תוך התייחסות לכוחות ולמומנטים הגדולים הפועלים על הרגל. מסת הרגל היה גם הגורם שהנחה אותנו בתכן מנגנוני העברת המומנט והוספת המיסוב לצירים הסיבוביים.
- בפן הבקרה האתגר המרכזי היה התאמת התכן לכדי מימוש הבקרה שנכתבה ע"י הלקוח. שיקולי הבקרה נלקחו בחשבון בבחירת הרכיבים השונים (חיישנים, מנועים, קפיצים) על שלל מאפייניהם השונים כך שיאפשרו תנועה מהירה מחד אך גם ניתנת לבקרה מדויקת מאידך, בדגש על תופעת ה-backlash.

תודות

כפיר כהן - על ההנחיה הצמודה והעזרה לכל אורך הפרויקט.
 יונתן ספיץ ופרופ' מרים זקסנהויז - על העזרה המקצועית ותמיכה לכל אורך הפרויקט.
 צוות בית המלאכה - יעקב האוזר, משה גולן ואורלי לוצקי - על ייצור החלקים, העזרה והתמיכה המקצועית בשלבי הייצור והרכבה.
 רומן שמסטינבוב וצוות האלקטרוניקה של הפקולטה - על העזרה והתמיכה המקצועית משלבי בחירת הרכיבים ועד שלבי זיווד וחיבור האלקטרוניקה.
 ד"ר חגי במברגר - על ההנחיה בשלבי הראשונים של הפרויקט.
 פרופ' ראובן כץ - על הייעוץ המקצועי והעזרה התקציבית.