כף רגל רובוטית
Robotic Foot

בר נוימן , ראם לוי , ניראל כהן

המנחה: כפיר כהן

פרויקט תכן מוצר חדש

הלקוח

מר ישראל שלהיים, המעבדה לאינטגרציה של חישה ופעולה בטכניון - SMILe

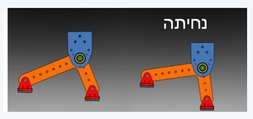
תקציר

מטרת הפרויקט הינה פיתוח וייצור של ארבע כפות רגליים רובוטיות, שיהוו חלק ממכלול רובוטי הנועד לחקור מנגנון בקרת הליכה. הרובוט יכלול 4 רגליים בעלות 3 מפרקים אקטיביים ויבצע הליכה "דו ממדית".

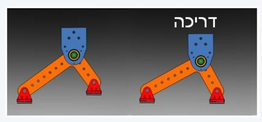
בפרויקט נדרשנו לפתח משלב הרעיון עד לייצור כף רגל שביכולתה לנוע באמצעות פקודת מומנט ובכך לאפשר למפרק הקרסול דינאמיות אקטיבית. בנוסף על ידי כך ניתן ליצור את אפקט ה- Toe Off (דחיקת הרצפה בעת ניתוק כף הרגל מהקרקע) שהינו מרכיב חשוב בהליכה. דגש נוסף הושם על קביעת נקודות מגע עם הקרקע, המוגדרות היטב וניתנות לבקרה.

רקע תיאורטי

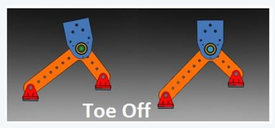
- מהסתכלות על כף הרגל ניתן לחלק מחזור צעד ל-3 שלבים עיקריים.
- **שלב ראשון:** נחיתה ,נגיעה ראשונה של כף הרגל בקרקע (בהליכה נורמלית העקב פוגע ראשון בקרקע). בשלב זה כוחות התגובה מהקרקע הם הגדולים ביותר.



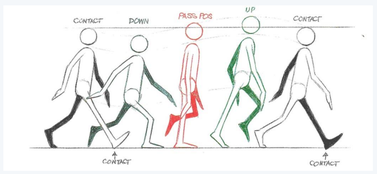
- **שלב שני:** דריכה -בשלב זה מלוא משקל הגוף פועל על כף הרגל ומתפרש על מלוא שטח פניה. במנח זה מרכז הכובד של הגוף עובר בעזרת השרירים (כבלים ומנועים ברובוט שלנו) והאינרציה מאחורי כף הרגל אל לפני כף הרגל.



- **שלב שלישי:** Toe Off – פעולת הכוח של כף הרגל. בשלב זה העקב מורם מן הקרקע בעזרת כוח מניע (שרירים או מנועים) ודוחף קדימה את מרכז המסה. בשלב זה פועלים הכוחות האקטיביים הגדולים ביותר.



- על מנת להקנות לרובוט הליכה חלקה ורציפה כף הרגל מונעת בעזרת מערכת של **Series Elastic Actuation – SEA**. מערכת הכוללת כבלי פלדה העגונים בנקודות האקטואציה - מנועים, ונקודות הפעלת הכוח בשלד כף הרגל. לאורך הכבל מחובר קפיץ מתיחה. בקרה המודדת את זווית כף הרגל וזווית המנוע בשילוב עם המידות הגיאומטריות הידועות מניבה את התארכות הקפיץ בכל רגע. בשימוש בקפיץ בעל קבוע ידוע ניתן לחשב ולבקר את הכוח המועבר לכף הרגל ובכך לקבוע את פקודת הכוח למנוע.



דרישות

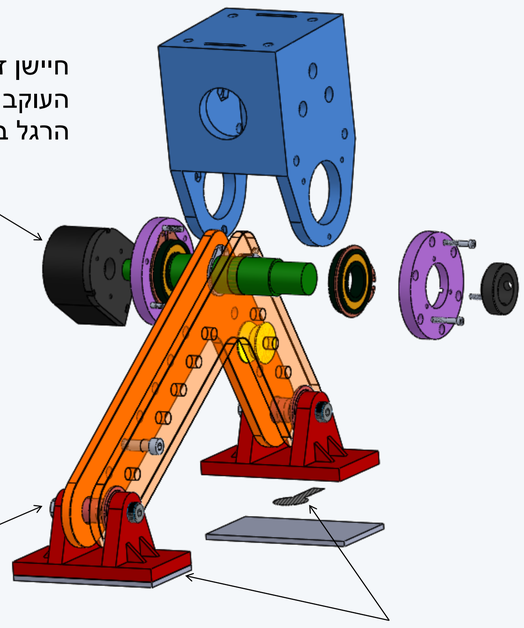
➢ **דרישות מכאניות**:
- משקל עד 250[gr].
- עמידה בעומסים של 10[kg] בנפילה מגובה 20[cm].
- זוית נטייה ±30°.
- Backlash קטן מ 1°.

➢ **דרישות בקרה**:
- מדידת זווית כף רגל ומנוע בדיוק של 0.15°.
- מדידת לחץ מופעל על הקרקע בדיוק של 0.1[N].
- מדידה רציפה של כוחות מהקרקע כולל עוצמת פגיעה.

➢ **ביצועים**:
- הפעלת מומנט בToe Off אקוויולנטי למטוטלת הפוכה במשקל 5[Kg] במפתח של ±15°.
- מהירות הליכה: כ – 1[m/s].
- הליכה בשיפועים של ±10°.

תיאור המוצר

חיישן זווית (encoder) העוקב אחר זווית כף הרגל במהלך תנועתה



צירי האצבעות ממוסבים בכדי להבטיח אופקיות ומשטח מגע יציב

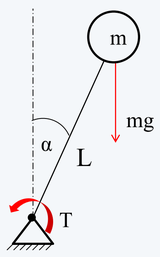
בקרת מגע באמצעות חיישני כוח מסוג FlexiForce A201.

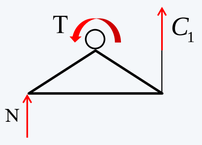
המוצר תוכנן כ-3 מכלולים עיקריים

- **ממשק עליון – קרסול**: חלק זה מכיל את הציר המרכזי עליו נעה כף הרגל ומאפשר תנועה סיבובית חלקה של הציר המרכזי על גבי זוג מסבים כדוריים. בחלק זה מוצב כרטיס אלק' הקולט את הנתונים המגיעים מהחיישנים בכל כף רגל- חיישני לחץ לבקרת המגע וחיישן זוית למדידת זוית כף הרגל. מכלול זה הוא הממשק לגוף הרובוט.
- **שלד כף הרגל:** תוכנן באוריינטציה למבנה אנושי של כף רגל. בדומה לכף רגל אנושית ההנעה נעשית ע"י כבלים וקפיצים המעוגנים לחלק זה. החלק תוכן לשימוש מודולרי כך שניתן לעגן את הכבלים ו/או הקפיצים בנקודות שונות לטובת המחקר.
- **אצבעות**: תוכננו כך שיבטיחו מגע מלא ויציב. האצבעות נעות על ציר ביחס לשלד ולכן שומרות על מנח מקביל לקרקע משלב הדריכה עד שלב עזיבת הקרקע. במבנה האצבעות ממוקם חיישן לחץ למדידת עוצמת המגע בקרקע. לאצבעות מחוברת "סוליית" גומי המגנה על החיישן ומספקת חיכוך גבוה.

אנליזות וחישובים

אנליזות מאמצים באלמנטים סופיים:





$$\sum M_O:\ mg\cdot L\cdot Sin(\alpha)=T$$

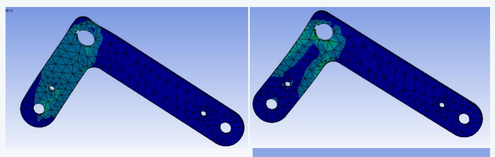
$$T=5\cdot 9.81\cdot 1\cdot Sin(25°)=20.73[Nm]$$

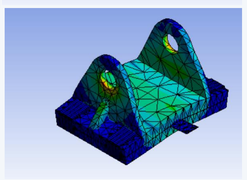
$$\sum M_{O,f}:\ C_1\cdot 2l_f - \underset{mg\cdot l_f}{N} = T$$

$$C_1=\frac{T+mg\cdot l_f}{l_f}=\frac{20.73+9.81\cdot 100\cdot 10^{-3}}{100\cdot 10^{-3}}=217.11[N]$$

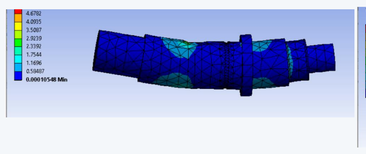
C_1 – *Tension on wire*

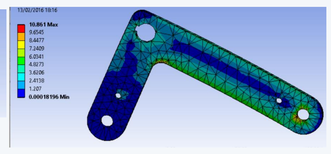
נחיתה	דריכה





Toe Off





האתגרים

- **משקל** – כף הרגל היא החלק הרחוק ביותר ממרכז ההנעה של הרובוט, לכן כדי למזער את האינרציה של כף הרגל ביחס לקופסאת המנועים הוגבל משקל כף רגל ל-[gr] 250. הגבלה זה היוותה אתגר מפני שכף הרגל עומדת בכוחות רבים ומונעת ע"י המנוע בעל ההספק הגבוה ביותר ברובוט. כדי להתמודד עם הגבלה זו רוב חלקי כף הרגל הדופסו במדפסת תלת מימד מפולימר קל משקל. כמו כן שלד כף הרגל תוכן כך שיורכב מ-2 פלטות ולא מגוף אחד, ובכך קיבלנו עמידות גבוהה בכיוונים הרצויים וחיסכון רב במשקל.
- **בקרת מגע בקרקע** – נדרשנו למדוד את כוחות הריאקציה מהקרקע בכל שלבי המגע. כף הרגל מבצעת תנועה סיבובית ביחס לרצפה ולכן כדי להגדיר נקודות מגע קבועות תוכן ממשק מגע ,"אצבעות", הנעות על גבי ציר ביחס לשלד ושומרות על משטח מקביל לקרקע בכל שלבי הצעד ללא גלגול.
- **עבודה עם צוות נוסף** – גוף הרובוט הכולל את מערכת ההנעה תוכנן ע"י קבוצה אחרת. לאורך הפרוייקט נדרש תיאום ודיאלוג שוטף עם הקבוצה לתיאום חיבורים, ממשקים והעברת ההנע לאורך גוף הרובוט.

תודות

בית המלאכה בפקולטה – תודה ליעקב, אורלי וכל הצוות על ייצור החלקים לפרויקט, התמיכה והייעוץ.

צוות המעבדה – תודה לפרופ' זקסנהויז, ישראל ורע על שיתוף פעולה לאורך הפרויקט.

לאייל אברהם על התמיכה האלקטרונית.

למנחה, כפיר כהן, על ההכוונה והשעות הרבות במשרד.