

גג: העתיד כאן - ייצור מכונות הולכות

רובוט עכביש מישורי

מאת דר' אמיר שפירא*

מזה זמן רב מפתחים בעולם רובוטים ניידים. רובוטים ניידים הנם מכונות אוטונומיות אשר אינן בעלי בסיס קבוע והמסוגלות לנוע ממקום למקום. השימושים העיקריים לרובוטים ניידים הנם למשימות תובלה בהן יש צורך להעביר מטען מנקודה לנקודה או לביצוע משימות מיוחדות במקומות אליהם בני-אדם אינם יכולים להגיע עקב תנאים פיזיים קשים או עקב סיכונם. עד לאחרונה רוב הרובוטים הניידים היו רובוטים גלגליים אשר נסעו בעזרת גלגליהם ממקום למקום. דוגמא לרובוטים כאלו הנם רובוטים ניידים המשרתים מכונות ייצור במפעלי תעשייה.

בתכנון תנועה עבור רובוטים גלגליים, הרובוט מנווט אל קונפיגורצית¹ המטרה תוך הימנעות ממגע עם מכשולים. אולם, העבירות של רובוט גלגלי הינה מוגבלת ולכן משימות תנועה רבות מתאימות יותר לרובוטים בעלי רגליים המסוגלים לבצע תנועות הליכה. בתנועות הליכה הרובוט חייב להיות במגע עם הסביבה כדי לבצע הליכה יציבה. דוגמאות למשימות המתאימות לרובוטים הולכים הן: חיפוש ניצולים בתוך מבנים הרוסים, פיקוח ואחזקה של מערכות צנרת מורכבות, וביצוע משימות אחזקה במקומות מסוכנים כגון כורים גרעיניים. משימות אלו דורשות תנועה בסביבה צפופה, מורכבת, ומאוד לא מובנית. כמו כן היות והרובוט לא מסתמך על הגרביטציה (הגרביטציה פועלת בניצב למישור העבודה של הרובוט ולכן לא משפיעה על תנועתו) לביצוע תנועתו הוא יכול גם לשמש להעברה של מטענים בתחנת חלל.

רובוטים הדומים לעכביש בעל גוף מרכזי אליו מחוברות זרועות בעלות מפרקים, או רובוטים בתצורת נחש בהם המפרקים מחוברים בטור אחד לאחר השני, הם דוגמאות לרובוטים היכולים לנוע בסביבה צפופה ולא מובנית. עבודות קודמות על רובוטים דמויי עכביש הן כדלהלן, רובוטים לתנועה בצינורות של (Neubauer 1993, 1994) ושל (Pfeiffer et al. (2001, 1996 דוגמא נוספת הינה רובוט המטפס על סולם של (Dubowsky et al. (1992, 2000) דוגמאות לרובוטים בתצורת נחש הן עבודות של (Chrikjian and Burdick (1993, 1993), של (Shan and Koren, 1993), ושל (Hirose and Morishima, 1990). דוגמאות אלו ורבות אחרות מתארות מאמץ מרוכז אשר מושקע ע"י קהילת אנשי הרובוטיקה בעולם לפיתוח מכונות הולכות. אולם עד עתה המחקר התיאורטי על הליכת רובוטים אינו מפותח דיו, דבר זה הביא אותנו לפתח את רובוט העכביש ולחקור בצורה שיטתית ועמוקה את האספקטים והתיאורטיים הכרוכים בבנייה והפעלה של מכונה אוטונומית הולכת.

במאמר זה מתואר הליך הפיתוח ושיטת המחקר** אשר הביאה אותנו לפתח את רובוט העכביש. רובוט זה מהווה צעד ואבן דרך לקראת המטרה של פיתוח רובוטים הולכים המסוגלים לבצע מגוון משימות תנועה על קרקע לא מובנית ובתוך תעלות ומנהרות צפופות ובעלות מבנה משתנה.

בעבודתנו אנו חוקרים את **האספקטים התיאורטיים והמעשיים** הקשורים למכונות הולכות. **האספקטים התיאורטיים** במחקר כוללים, פיתוח אלגוריתמים לתכנון התנועה והבקרה של הרובוט. אלגוריתם תכנון התנועה מייצר מסלול רציף לכל אחד ממפרקי הזרועות. מסלול זה קובע את הזווית לכל אחד ממפרקי הרובוט בכל נקודת זמן, כך שתנועה מתואמת של כל המפרקים לאורך המסלול המתוכנן תאפשר את הגעת הרובוט מקונפיגורציה ההתחלה אל קונפיגורציה המטרה. מערכת הבקרה דואגת שכל אחד ממנועי הרובוט יספק את המומנט הדרוש ממנו על מנת להבטיח תנועה לאורך המסלול המתוכנן. בהמשך לאמור, דואגת מערכת הבקרה לפיצוי על הפרעות ושגיאות מיקום ומהירות העלולות להופיע במהלך תנועת הרובוט. **האספקטים המעשיים** של המחקר הינם פיתוח ובנייה של רובוט הולך וביצוע ניסויים המדגימים את ישימות פעולת האלגוריתמים התיאורטיים שפותחו.

תנאי המחקר

הבעיה המרכזית עמה התמודדנו היא כיצד לשמור על יציבות הרובוט במהלך התנועה. על מנת להבטיח את יציבות הרובוט במהלך התנועה נבחרה צורת הליכה בה הרובוט נמצא בשיווי-משקל בכל זמן התנועה. צורת הליכה זו נקראת הליכה קווי-סטטית בה הכוחות האינרציאליים הם קטנים ביחס לשאר הכוחות במערכת. דוגמה להליכה קווי-סטטית הינה מטפס צוקים המחזיק עצמו בשיווי משקל ומחפש נקודת אחיזה חדשה לפני שהוא מנתק נקודת אחיזה קיימת. צורת הליכה זו נבדלת מהליכה דינאמית בה מנצלים את הכוחות האינרציאליים לשם ביצוע התנועה.

הנחנו כי לא קיימת גרביטציה ולכן הרובוט חייב ללכת בתוך מנהרה על מנת להישאר בשיווי משקל. בדרך זו ע"י אחיזה בדפנות מנוגדות של המנהרה הרובוט נאחז ביציבות. הנחות נוספות שבוצעו בשלב זה הן כדלהלן: א. המנהרה היא ליניארית למקוטעין. ב. הרובוט הוא מישורי. ג. הרובוט נוגע בסביבה רק באמצעות החוליה האחרונה בכל רגל הנקראת "כף הרגל" של הרובוט. ד. כפות רגלי הרובוט יכולות רק לדחוף כנגד דפנות המנהרה ואינן יכולות למשוך משום שלא מותקנים אמצעי יניקה על כפות הרגליים או ידיות על דפנות המנהרה.

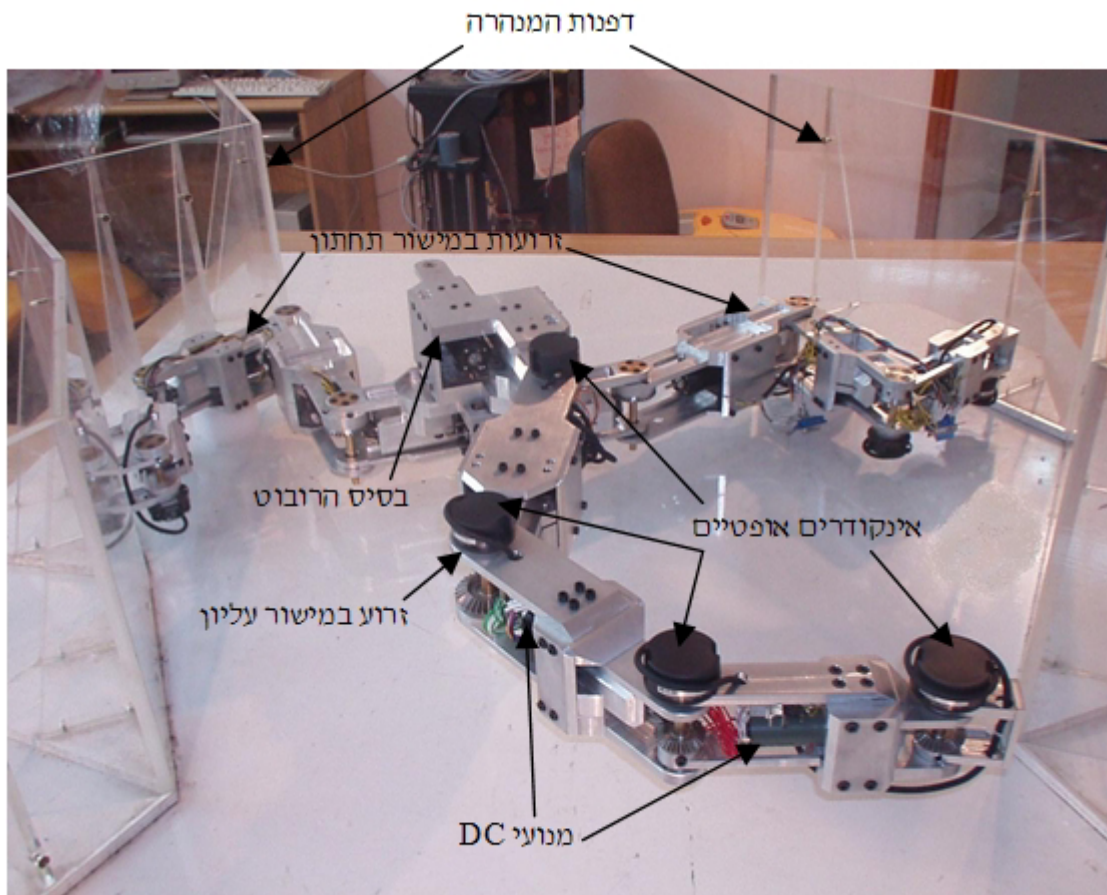
ההנחה כי הרובוט מישורי מאפשרת לנו להימנע מהשפעות הגרביטציה באמצעות קביעה כי מישור תנועת הרובוט הוא אופקי ולכן ניצב לפעולת הגרביטציה. בשלב הבא של המחקר נשחרר את הנחת אי פעולת הגרביטציה ותיבחן השפעת הגרביטציה על תנועת הרובוט. דבר זה יאפשר תנועת הליכה על פני הקרקע.

מבנה הרובוט

הרובוט בנוי מגוף מרכזי, הנקרא בסיס הרובוט, אליו מחוברות זרועות בעלות מפרקים ממונעים. הרובוט נאחז באמצעות זרועותיו כנגד דפנות המנהרה. בהנחה כי קיים חיכוך בין דפנות המנהרה לכפות רגלי הרובוט דרושות שתי זרועות לרובוט כדי לאחוז עצמו כנגד דפנות מנהרה. זרוע נוספת דרושה כדי לבצע את הצעד הבא ובכך לאפשר תנועות הליכה. לכן, הרובוט הינו בעל שלוש זרועות, שזהו גם המספר המינימאלי של זרועות הדרושות לרובוט מסוג זה.

בכל זרוע ארבעה מפרקים הממונעים ע"י מנועי סרבו לזרם ישר מתוצרת חברת Maxon. על הציר של כל פרק מורכב אינקודר אופטי² המודד את זווית הפרק. לרובוט מישורי דרושים לכל הפחות שלושה מפרקים על מנת להגיע לכל נקודה במישור העבודה כך שקצה הרובוט יהיה בזווית הרצויה. לכן, *בהינתן מיקום לבסיס הרובוט (כלומר כאשר הבסיס קבוע)*, באמצעות שלושה מפרקים בזרוע היא יכולה להגיע לכל מיקום ואוריינטציה בטווח העבודה. אולם, היות ובמנהרה יש לעיתים פינות או מקומות צרים אותן הזרוע צריכה לעקוף הוספנו את המפרק הרביעי המאפשר תנועתיות רבה יותר לזרוע.

מנועי הזרועות נבחרו בצורה הדרגתית כך שהמנועים החזקים ביותר מורכבים בפרקים הקרובים לבסיס הרובוט והחלשים יותר מורכבים במפרקים הקרובים לקצות הזרועות. בצורה זו עוצמת כל מנוע מתאימה למומנט אותו הוא צריך להפעיל, דבר המאפשר חיסכון משקל ניכר לעומת החלופה של בבחירת מנועים זהים לכל הפרקים. הזרועות פועלות בשני מישורים נפרדים בכדי לאפשר מעבר של זרוע מעל זרוע ללא התנגשות.



איור 1: אב-טיפוס של רובוט העכביש

דפוס ההליכה

רובוטים הולכים טיפוסיים הולכים בדפוס צעידה קבוע. כלומר, כל צעד זהה לקודמו וסידרת הצעדים מתבצעת בצורה מחזורית. אולם, דפוס הליכה מחזורי לא מאפשר ניצול כל היתרונות של רובוט הולך. יתר על כן, בתואי שטח מסוימים או בגיאומטריות מנהרה מסוימות הליכה בדפוס צעידה מחזורי עלולה לגרום לאובדן יציבות ואף לנפילה. במקרה שלנו הרובוט נע בדפוס צעידה מסוג 3-2-3. כלומר, שלוש זרועות אוחזות כנגד המנהרה, זרוע מנתקת מגע, בשלב זה הרובוט נאחז רק בעזרת שתי זרועות, הזרוע החופשית נעה אל נקודת אחיזה חדשה ויוצרת אחיזה תלת-זרועית חדשה. ראוי לציין כי כל צעד של הרובוט שונה מקודמו, ולמעשה כל צעד מתוכנן בנפרד ואינו דומה לצעדים אחרים אותם ביצע הרובוט.

לרובוט העכביש יש 15 דרגות חופש³ עפ"י החישוב הבא: שלוש זרועות כפול ארבעה מפרקים לזרוע ועוד שלוש דרגות חופש של הבסיס (שתי דרגות חופש למיקום ואחת אוריינטציה של בסיס). לכן מימד מרחב הקונפיגורציה של הרובוט הינו 15 כמספר דרגות החופש שלו. נהוג לתכנן את תנועת רובוטים ניידים ע"י חיפוש מסלול במרחב הקונפיגורציה⁴

של הרובוט. אולם חיפוש מסלול במרחב 15 מימדי הוא מסובך מידי ומצריך משאבי חישוב כבדים.

כדי לפתור בעיה זו חילקנו את בעיית תכנון המסלול לשלושה חלקים באופן הבא: שלב א' אנו מוצאים סידרה של נקודות אחיזה לאורך המנהרה. שלב ב' אנו מוצאים עקום תנועה רציף לבסיס הרובוט מנקודת ההתחלה עד לנקודת המטרה. בשלב ג' נמצא מסלול תנועה לכל אחד ממפרקי הרובוט.

פיתחנו אלגוריתם, הנקרא PCG (short for Partitioned Cubes Gaiting), לתכנון מיקומי נקודות האחיזה של רובוט העכביש על דפנות מנהרה מישורית ליניארית למקוטעין.

1. האלגוריתם מייצג את כל האחיזות האפשריות לעכביש במנהרה במרחב אבסטרקטי תלת-ממדי הנקרא מרחב קופיגורציות המגע⁵ של הרובוט.
 2. האלגוריתם מקרב את קבוצת קונפיגורציות המגע המותרות לרובוט באמצעות תיבות. קירוב זה מתבצע תוך שימוש בשיטות אופטימיזציה קמורה.
 3. האלגוריתם מבצע חיתוך הדדי של התיבות כך שמתקבלות כעת תת-תיבות של קונפיגורציות מגע מותרות.
 4. בשלב זה נבנה בסיס נתונים מסוג גרף⁶ בו כל תת-תיבה מייצגת צומת ובין כל שתי תת-תיבות שניתן לעבור ביניהן באמצעות צעד אחד נבנית קשת.
 5. השלב הסופי של האלגוריתם הינו חיפוש מסלול קצר ביותר בגרף. דבר זה נעשה באמצעות אלגוריתם דיאקסטרא המשמש למציאת מסלול קצר ביותר בגרף.
- לסיכום, האלגוריתם מייצר דפוס צעידה מסוג 3-2-3 המביא את הרובוט מנקודת ההתחלה אל הסיום תוך ביצוע מספר צעדים מינימאלי. חומר נוסף על אלגוריתם הניווט ניתן למצוא ב-(Shapiro and Rimon, 2003).

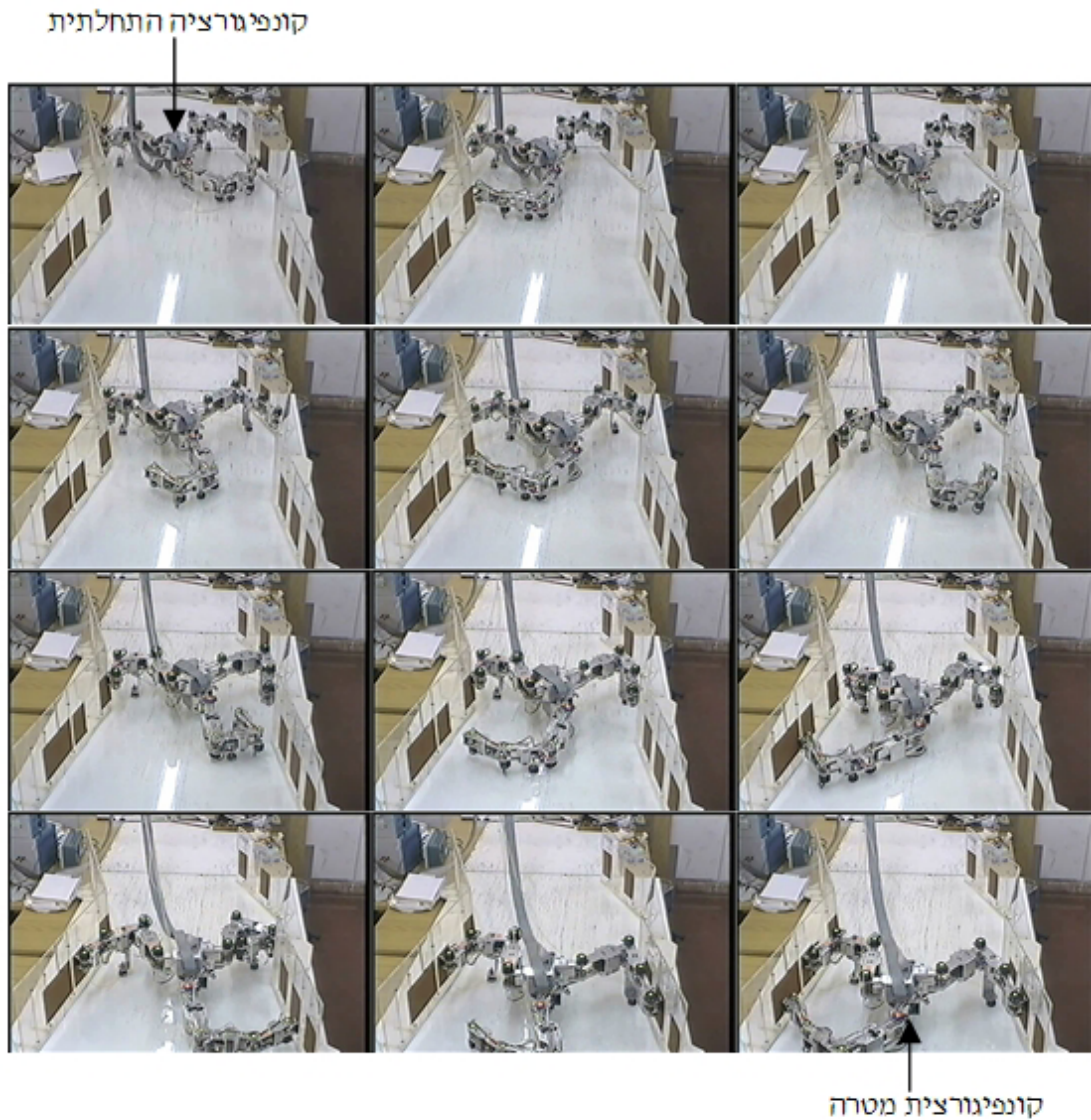
שיטת בקרה

נדון כעת בבעיית הבקרה של הרובוט. לעכביש שלוש זרועות אשר לכל אחת מהן ארבע דרגות חופש ממונעות. הגוף-המרכזי מוסיף שלוש דרגות חופש נוספות. כלומר לעכביש יש בסך הכול 15 דרגות חופש, מתוכן רק 12 ממונעות. אולם, העכביש אינו מערכת תת-ממונעת. זאת משום שכאשר העכביש נאחז כנגד דפנות המנהרה הזרועות האוחזות כנגד הדפנות מציבות אילוצים קינמטיים אשר למעשה מאלצים את עכביש לנוע ביריעה⁷ שמימדה קטן מ-12. בעיית הבקרה היא לכן אילו מומנטים יש להפעיל ב-12 מנועי עכביש על מנת להביא את כל 15 משתני הקונפיגורציה של העכביש אל המיקום הדרוש כך שבסיום התנועה העכביש ימצא שוב על היריעה. בפרט אנו מעוניינים ליצור כוחות ומומנטים הפועלים על הגוף-המרכזי על מנת להביא אותו אל המיקום והאוריינטציה הרצויים.

שיטת הבקרה אותה ישמנו מתבססת על אחיזת העכביש בשיווי-משקל יציב ע"י דפנות המנהרה. כאשר כפות-רגלי העכביש נשארות בתנוחה בה מושגת אחיזת שיווי-משקל יציבה של העכביש ביחס לסביבתו, כוחות הריאקציה הנוצרים עקב הגמישות הטבעית של החומרים ועקב כוחות החיכוך במגעם יפעלו כדי לייצב את המכניזם כגוף-קשיח אחד. לכן שיטת הבקרה אותה ישמנו מתבססת על הרכיבים האקטיביים והפסיביים הבאים. הרכיב האקטיבי הוא הנעה של מפרקי הרובוט הממונעים בצורה המבטיחה כי כפות הרגליים האוחזות תשארנה נייחות אחת ביחס לשנייה. בצורה זו מנקודת המבט של המנהרה העכביש מתנהג כגוף-קשיח אחד במשך כל התנועה. נציין כי למרות דרישה זו אנו עדיין חופשיים להניע את הגוף-המרכזי ואת הרגל החופשית לאורך כל מסלול תנועה רצוי, כאשר התנאי היחיד על מסלול התנועה הוא שכפות הרגליים האוחזות תשארנה נייחות אחת ביחס לשנייה. הרכיב הפסיבי של הבקרה מסתמך על כוחות הריאקציה הנוצרים ע"י דפנות המנהרה. כוחות אלו פועלים על כפות-הרגליים האוחזות על מנת להשאיר את העכביש כגוף-קשיח אחד באותו מיקום ואוריינטציה. במילים אחרות, דפנות המנהרה וכוחות החיכוך בנקודות המגע יבטלו אוטומטית כל כוח אינרציאלי מספיק קטן הנוצר ע"י החלקים הנעים של העכביש. בסיום התנועה כאשר הרגל החופשית תגיע ליעדה הכוחות האינרציאליים אשר נבעו מתנועתה יתאפסו, וכפות-הרגליים האוחזות תתייצבנה בדיוק במיקומן ההתחלתי. לפירוט נוסף על בקרת הרובוט ראה (Shapiro, 2003).

סיכום

לסיכום, הדגמנו בפועל את יישום התיאוריות שפותחו באמצעות ניסויים. ניסויים אלו בוצעו באמצעות הדור השני של רובוט העכביש אשר פותח במעבדתנו. רובוט זה הינו רובוט עכביש מישורי תלת-רגלי ההולך בתוך מנהרה דו ממדית. הניסויים מסתכמים בסרט ווידאו, אשר ניתן להורידו מאתר המעבדה לניווט רובוטים (<http://www.technion.ac.il/~robots/>), המראה תנועה שלמה של הרובוט מתחילת המנהרה ועד סופה. במהלך תנועה זו הרובוט מבוקר באמצעות שיטת הבקרה שפיתחנו ובוחר את נקודות האחיזה באמצעות אלגוריתם PCG.



איור 2: תמונות מסרט הוידאו המראה ניסוי תנועה של הרובוט. בניסוי זה הרובוט הולך מקונפיגורציה התחלתית אל קונפיגורציה מטרות לכל אורך המנהרה.

מקורות

- Chirikjian, G.S. and Burdick, J.W. 1993. Design and Experiments with a 30 Degree-Of-Freedom Hyper Redundant Robot. *In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 3 pp. 113-117.
- Duboowsky, S., Sunada, C., and Marvoidis, C., 1999, Coordinated Motion and Force Control of Multi-Limbed Robotic Systems. *Autonomous Robots*, 6:7-20

- Hirose , S. and Morishima, A. 1990. Design and Control of a Mobile Robot with an Articulated Body. *Int. J. Robotics Research*,9(2):99-114.
- Madhani, A. and Dubowsky, S. 1992. Motion planning of Mobile Multi-Limb Robotic Systems Subject to Force and Friction Constraints. *In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 223-239.
- Neubauer, W. 1993. Locomotion with Articulated legs in pipes or ducts. In *Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems*, pp.64-71.
- Neubauer, W. 1994. Spider-Like Robot that Climbs Vertically in Ducts or Pipes. . In *IEEE/RSJ/GI Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol 2, pp.1178-1185.
- Pfeiffer, F., Roassmann, T., Bolotonik, N., Chernousko, F., and Kostin, G. 2001, Simulation and Optimization of Regular Motions of a Tube-Crawling Robot. *Multi body Sys. Dyn.* 5:159-184.
- Roassmann, T. and Pfeiffer, F. 1996, Control and Design of a Pipe Crawling Robot. In *13th World Congress of Automatic Control*, San Francisco, USA.
- Shan, Y. and Koren, Y. 1993. Design and Motion Planning of a Mechanical Snake. *IEEE Trans. On Systems Man and Cybernetics*, 23(4):1091-1100.
- Shapiro, A. and Rimon, E. 2003. PCG: A Foothold Selection Algorithm for Spider Robot Locomotion in 2D Tunnels, In *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Taipei, Taiwan.
- Shapiro A., 2003. Design and Control of an Autonomous Spider-Like Robot for Motion in 2D Tunnels Environments, *Ph.D. Thesis Technion, Israel*.

הבהרות

1. קונפיגורציה של רובוט היא סט הפרמטרים (זוויות כל החוליות, ומיקום הבסיס) המתארים חד ערכית את המיקום של כל מפרקי הרובוט.
2. אינקודר אופטי הינו רכיב אלקטרוני המיועד למדידת הזווית של צירים סובבים (קיימים גם אינקודרים לינאריים המודדים מרחק תנועה). האינקודר מורכב מדיסקה סובבת אשר מוטבעים עליה קווים ומחיישן אופטי ניח הרואה את הקווים. באמצעות ספירת הקווים ניתן לדעת מה זווית הציר.

3. מספר דרגות החופש של הרובוט זהה למספר משתני הקונפיגורציה. כל ציר ברובוט מהווה דרגת חופש אחת. לבסיס הרובוט שלוש דרגות חופש של תנועה בכיוון האורכי הרחבי וסיבוב.
4. מרחב הקונפיגורציה של רובוט הוא מרחב אבסטרקטי אשר הקואורדינטות שלו הן משתני הקונפיגורציה (זוויות המפרקים ומיקום בסיס הרובוט). מימד מרחב הקונפיגורציה הינו כמספר דרגות החופש של הרובוט.
5. מרחב קונפיגורציות המגע הינו מרחב תלת מימדי אשר כל נקודה בו מייצגת שלוש נקודות מגע לשלוש כפות רגלי הרובוט על דפנות המנהרה.
6. בסיס נתונים מסוג גרף מורכב מסט של צמתים וקשתות המחברות בין הצמתים. דוגמא נפוצה לגרף היא גרף בו הצמתים הן הערים במדינה וקשתות מייצגות כבישים המחברים בין הערים.
7. יריעה במרחב הקונפיגורציה הינה תת-מרחב אשר בו חלק מהמפרקים מאולצים להיות תלויים בזוויות מפרקים אחרים כך שכפות רגלי הרובוט יגעו בדפנות המנהרה במהלך התנועה.

* המחלקה להנדסת מכונות, אוניברסיטת בן גוריון בנגב
המחקר בוצע בהנחיית פרופ' אילון רימון מהפקולטה להנדסת מכונות בטכניון ובשיתוף עם ד"ר שרגא שובל מהמחלקה להנדסת תעשייה וניהול במכללת יהודה ושומרון ומר יזהר אור מהפקולטה להנדסת מכונות בטכניון.

תמונות נוספת, אופציונאליות, מאת הצלם מיקי קורן



