

# רֹבוּטִים נֵידִים – תְשִׁפָ"ז

## תרגיל 3 (אודומטריה של רובוט דמוי מכונית, SLAM)

בתרגיל זה תרchieבו את מה שהשגתם עד כה בקורס – תבנו רובוט בעל גלגלים מניעים ואגליי היגי (בדומה למכונית), תמשכו מודל אודומטריה המתאים לרובוט זה, ותמשכו אלגוריתם למיפוי וনיווט בו זמןית - SLAM (Simultaneous localization and mapping), כל זאת עם שלושה מנועים, חישון מרחק, שני חיישני מגע, חיישן תאורה ואולי גם מצלמה.

לזרה נוספת נספו נקודות עוגן כדי להקל על ביצוע תהליך ה-SLAM. אלה הם פסים שחורים אנכיים המודבקים על פס לבן לאורך הקיר כמו צג בתמונה:



המשך המשימה העיקרית בתרגיל זה היא מיפוי ומיציאת מיקום בו זמןית (SLAM).

תוכלו לבחור באחת מצורות ההנעה של רובוטים המתוארכות בהמשך. חלון פשוטות וקלות יותר לביצוע ואחרות מתוגרות ומלמדות יותר.  
בכל מבנה רובוט שתבחרו ובל' קשור לצורת ההנעה, יש לבצע את התרגיל על פי ההנחיות האלה:

- א. ידוע שהזירה סגורה ואורך ההיקף שלה בין 6 ל 10 מטר, שהקירות שלה ישרים יחסית, ושיש בה סימונים כהים על פני רקע בהיר בגובה מסוים (אותו תוכלו למדוד). אין להניח ידע אחר על הקירות – מספר הקירות, אורכם, או זווית המפגש ביניהם.
- ב. בתחילת המשימה הרובוט יונח בזירה מיקום וכיוון שאינם ידועים לכם מראש.
- ג. הרובוט ינוע במסלול ועל פי שיטה שתבחרו.
- ד. לרובוט יהיה חישון מרחק הפונה כלפיו על פי בחירתכם, ושני חיישני מגע – אחד בקדמת הקדמי והשני בקדמת האחורי.
- ה. התגשות קדמית או אחוריית תפעיל רצף הנעה מתאים על פי השיטה שתבחרו.
- ו. במהלך הנסיעה על הרובוט למדוד את מיקומו בעזרת אודומטריה ושימוש בחישנים האחרים, ולחשב את המסלול המctrבר.
- ז. הרובוט יציג בזמן אמת את המיקום הנוכחי ואת המסלול המctrבר על מסך ה-LCD שלו.
- ח. לאחר פרק זמן מספק, ולא יותר מאשר דקות, הרובוט יעצור וידע על סיום שלב התנועה.
- ט. המידע יועבר למחשב (בעזרת USB או BT).
- ו'. בעזרת מידע זה תוחשב מפה שתוצג במחשב ועליה יוצג מסלול הנסעה.

כעת יוצגו כמה אפשרויות לבנייה הרובוט ושיטת ההיגוי שלהם.  
האפשרויות שונות בדרגת הקושי, ומצאות ב **ציוון מקסימלי** ו/או **תוספת בונוס**:

1. רובוט בעל היגוי דיפרנציאלי. **ציוון מקסימלי 70.**

אפשרות זו מורידה כמעט לגמרי את האתגר המכני ואתגר האודומטריה ולכן מיועדת  
למי שבוחר באתגר המינימלי שעדין אפשר לסייע את הקורס בהצלחה.

2. רובוט עם היגוי מכוני. **ציוון מקסימלי 90.**

מנוע אחד מניע זוג גללים בצורה שווה, ומנווע שני מסובב הגה ששולט בכיוון הציר  
המחבר את הגלגלים האחרים (או גלגל יחיד אחר), וכך קובע את ציוון הנסיעה.  
בביצוע אפשרות זו יש לפתח (או למצוא ולהתאים) את משוואות האודומטריה.

3. כמו אפשרות 1 או 2 אך עם חישון מרחק מסתווב. **בונוס עד 15 נקודות.**

חישון מרחק מסתווב יכול לתת הרבה מידע לצרכי המיפוי והמיקום, אך גם מוסיף  
אתגר של **בנייה, תוכנה, אינטגריה וניתוח מידע**.

4. כמו אפשרות 2 אבל עם מפרק מרכזי בשלט על ידי מנוע, המשנה את ציוון הרכב, וגם  
מנוע קדמי ומנווע אחורי. **בונוס עד 15 נקודות.**

חישבו ובידקו: באילו תנאים יש יתרונות לבנייה של הנעה קדמית \ אחורי \ שתיהן?

5. כמו האפשרות הקודמת אבל עם מפרק המנסה את אורך הרכב (משולש עלי, או  
בוכנה). **בונוס עד 15 נקודות.**

מפרק זה משנה את היגוי ואת האודומטריה. חישבו ובידקו: באילו תנאים יש יתרון  
למבנה בעל אורך משתנה?

6. אחת מן האפשרויות הקודמות בתוספת שימוש במכשיר. **בונוס עד 40 נקודות.**  
יש כפל בונוסים (למשל מבנה רובוט אפשרות 5 וגם מצלמה כמתואר כאן).

**קראו בתשומת לב את הנקודות – בסעיף זה ישן הרבה אפשרויות ביצוע וחילוק  
מצאות בפחות נקודות מהבונוס המלא.**

באפשרות זו תשתמשו מצלמה חייזנית שמבייטה על הזרה ומשמשת למעקב אחר  
הרובוט בזמן אמת (ואז אפשר להשתמש בתקשורת עם הרובוט להחלפת מידע) או  
למעקב אחרי הרובוט בסרטון שצולם בזמן הנסעה אבל מעובד במחשב רק לאחר  
סיומה.

אפשר למחשב אליו מחוברת המצלמה לצלם את הזרה לפני שהרובוט מוכנס אליה  
כדי להכיר את הזרה ללא האובייקט הנע.

אפשר לשימוש במידות הזרה האמיתיות כדי לכיל את המצלמה (כלומר למצוא את  
הטרנספורמציה בין הזרה כפי שנראית בתמונה לבין גיאומטריות הזרה האמיתית)  
כפי שמתואר בהמשך. **אבל שימוש במידות הזרה האמיתיות מוריד 5 נקודות.** לכן

מומלץ להשתמש בכיוול צהה בשלב הפיתוח, ולהחליפו אחר כך בכיוול אוטומטי המתבסס על מסלול הרובוט.

**זיהוי הזירה בצורה ידנית (סימון ידני של מיקומי הפינות ואו הקירות על גבי התמונה) מוריד 10 נקודות.** لكن מומלץ להשתמש בזיהוי ידני רק בשלב הפיתוח ולאחר מכן להחליפו בזיהוי אוטומטי אמין.

זיהוי הזירה בצורה אוטומטית יכול להיעשות על ידי הוספת סימוני צבע על החלקיםعلילונים של הפינות ואו הקירות של הזירה, ושימוש בכל' עיבוד תמונה לזייהו איזורי הצבע האלה. זיהוי צבע נוח יותר לעשות למרחב צבע HSV מאשר למרחב RGB. בבדיקה את אמינות השיטה בתלות בסוג המצלמה, מיקום המצלמה, רזולוציית התמונה, התאורה החיצונית, הצבע ואו תבנית הצבע שימושיפים לזירה.

זיהוי הזירה בעזרת מצלמה לא ישמש לייצרת המפה של הזירה. את המפה צריך ליצור בעזרנתנו התנועה של הרובוט (המבוססים עקיבאה בוידאו אחר הרובוט ועל האודומטריה של תנועות הרובוט).

אפשר לבצע חישוב מסלול הרובוט בזמן אמת בעזרת עקיבאה אחר הרובוט בוידאו. במקרה צהה תצטרכו לתקשר עם הרובוט בזמן אמת כדי להציג את המסלול על גבי מסך LCD של הרובוט תוך כדי ביצוע הנסעה.  
**אבל חישוב המסלול בעזרת עקיבאה בוידאו בלבד מוריד 10 נקודות.** כדי להימנע מהורדת הנקודות יש לחשב מסלול בעזרת אודומטריה על ידי הרובוט, ולאחר מכן להשוות את התוצאות של שני חישובי המסלול לצורך שיפור הדיוק, ניתוח הביצועים והמלצות להמשך.

עקבאה אחר הרובוט אפשרית בעזרת זיהוי צבע, או מאפיינים אחרים של הרובוט בתמונה או זיהויثنויים מפריים בוידאו. מומלץ להשתמש בספריות עיבוד תמונה וראייה ממוחשבת דוגמת OpenCV או כלים של MATLAB. בהן נמצאת תשתיית לביצוע משימות הזיהוי והעקבאה.

גיאומטריית הזירה כפי שנראית בצלמה שונה מהגיאומטריה של הזירה האמיתית. התמונה המתקבלת היא הטלה דו ממדית של הזירה ובה עיויות שונים הכוללים הזזה, סיבוב, מתיחה ושינוי גודל.

הטלה שהיא מיפוי בין מישור בתלת ממד (כמו רצפת הזירה) למישור אחר (למשל מישור התמונה) מכונה הומוגרפיה דו ממדית (2D homography) ומיצגת על ידי מטריצה  $3 \times 3$  בשם H. אפשר להשתמש בהומוגרפיה צזו כקירוב להטלה של הזירה התלת ממדית אל מישור התמונה כיוון שהפרשי הגובה בזירה קטנים ביחס למרחק של הזירה מן המצלמה, ולגודל הזירה.

لمטריצת ההומוגרפיה 9 איברים אבל רק 8 דרגות חופש (כי המשוואות נכונות עד כדי כפל בסקלר שונה מאפס). על כן נחוצות 8 משוואות למציאת 8 הפרמטרים של המטריצה.

נקודה בתמונה והנקודה המתאימה לה בזירה נקראות זוג נקודות توאמות (למשל פינה מסוימת בזירה שקל לזיהות בתמונה). זוג צהה מספק 2 מושואות מתוך ה 8. لكن מספיקות 4 זוגות נקודות توאמות בין התמונה לבין הזירה למציאת המטריצה.

אנו משתמשים בקואורדינטות הומוגניות בהן נקודה במרחב הדו ממד' מתוארת על ידי וקטור הקואורדינטות  $[x, y, 1]^T$ . המטרה מנוקודה במצלמה לנוקודה במישור הזירה תתואר על ידי המכפלת

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}_w = [H] \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}_c$$

כאשר  $H$  היא מטריצה  $3 \times 3$ ,  $w$  מסמן זира (עולם),  $c$  מסמן מצלמה. אפשר להרchip את המשווה הזה, המתארת זוג יחיד של נקודות توאמות, ולכלול יותר זוגות. כאמור צריך לפחות 4 זוגות למציאת המטריצה. מציאת המטריצה מתבצעת מתמטית על ידי פתרון משווה מטריציוני במנוחי ממשיות ידועות.

אפשר להשתמש ביותר זוגות, אז הפתרון המתתקבל יהיה הטוב ביותר ביותר במנוחי מינימום שגיאה ריבועית.

מפני לוקחים את 4 זוגות נקודות توאמות? אפשר להשתמש במידות הזרה האמיתיות לחישוב מיקום הפינות בעולם, ולהן להתאים את מיקום הפינות במצלמה (שנמצאו ידנית או אוטומטית). כפי שתכתב קודם לכן, חישוב  $H$  בערך ידע על המידות האמיתיות של הזרה **מוריד 5 נקודות**.

לקבלת מלאה הנקודות בחישוב ההומוגרפיה יש להשתמש במסלול הרובוט המחשב בעזרת אודומטריה ובמסלול המחשב בעזרת עקיבה. כיצד? הרוי עקיבה אחר הרובוט המתבצע במישור התמונה מספקת מסלול בזמן, המוטל גם הוא בעזרתאותה הומוגרפיה. לכן לאחר קבלת האודומטריה של הרובוט אפשר להשתמש במסלול הנצפה (מן התמונה) ובמסלול המחשב על ידי הרובוט לבצע בינם ההתאמה (matching). בעזרת ההתאמה אפשר למצוא את מטריצת ההומוגרפיה.

## סיכום סעיף 6

לקבלת הבונוס המקסימלי (40 נקודות) יש לבצע בהצלחה:

- אודומטריה בעזרת הרובוט – קבלת מסלול,
- מעקב אחר הרובוט במצלמה – קבלת מסלול ב,
- חישוב המיפוי בין תמונה לזרה (הומוגרפיה דו ממדית) על ידי ההתאמה (matching) של שני המסלולים.
- חישוב המגיאומטריה של הזרה (מפה) מתוך כל המידע.

שימוש לב

- כדי להצליח לבצע כל זאת, צריך לבחור צורת נסיעה של הרובוט שתיצור מסלול נוח למציאת ההתאמה בין תמונה לזרה, וגם מסלול שמיועד לביצוע מיפוי.
- אין צורך לבצע זיהוי של הזרה במצלמה. ההתאמה תתבצע בין האודומטריה למסלול שנמצא במהלך העקבה.

ההורדות בኒקود לסעיף זה:

- 10 נקודות - **דיהוי ידני של הזרה**,
- 5 נקודות - **чисוב ההומוגרפיה** בעזרת מידע על מידות הזרה האמיתיות,
- 10 נקודות – **ויתור על אודומטריה** של הרובוט והסתפקות במסלול הנוצר מ**העקביה בויאידאו**.

7. אפשרות הרחבה אחרת, לפי בחירתכם. זה דורש אישור המרצה שיקבע גם את גובה הבונוס. כאן המקום לעשות משהו נוסף שמעניין אתכם, וגם ללמידה ולקבל נקודות.

#### הוראות הצגה והגשה:

1. בדיקה במעבדה החל מיום שישי ה-30.1.26. אפשר לאמת מועדים אחרים לבדיקה והגשה בתוך תקופת המבחנים.
2. הגשת הדוח כתוב ביום שלישי שאחרי ההציגות לתיקית ההגשה ב Moodle על ידי אחד מחברי הצוות.
3. קל יותר לפתור את התרגילים בקבוצה גדולה וכן יבוצע תיקון הציון של התרגילים על פי גודל הקבוצה:

גודל צוות	תוספת לציון
+10	1
0	3, 2
-5	4
4. מותר להשתמש במקורות חיצוניים (תיעוד, מאמרים, הדגמות, קוד, כל' AI). חובה לציין כל מקור.
5. יש לרשום שם ות"ז של כל חברי הצוות בראשית כל קובץ או מסמך.
6. הדוח כתוב יוגש כקובץ Word, ובו:
  - א) תיאור מפורט של הרובוט ושל תהליך הבניה והפיתוח, כולל צילומים רלוונטיים.
  - ב) הסבר מפורט של שיטת חישוב האודומטריה.
  - ג) הסבר מפורט של אסטרטגיית פתרון SLAM ובמיוחד סגירת הלולאה.

- ד) הסבר מפורט של כל שיטה או אלגוריתם אותם פיתחתם וביהם השתמשתם לפתרון התרגיל (או הפניה למקורות אם זו קופסה שחורה בה השתמשתם).
- ה) תיאור מפורט של התוצאות.
- ו) דיוון ענייני ובקורטי בתוצאות. הדיוון צריך לכלול הערכת איכות של התוצאות, ובמיוחד אבל לא רק השוואת המפה המתקבלת לנוטוני הגודל והזווית שידועים לכם.
- ז) הפניה לתיקית שיתוף ובה צילומים וסרטונים המתעדים את השלבי השונים והתוצאות.
- ח) סיכום: מסקנות והצעות להמשך.
- ט) רשימת מקורות. יש להפנות לרשימה זו מתוך הטקסט הראשי.

7. הגיעו את קבצי הווידאו של הבדיקות במעבדה או (אם הם גדולים מדי) קישור לתיקית שיתוף בה נמצאים קבצי הווידאו.

8. הגיעו את הקוד בתיקייה דחוסה או הפנו לתיקית שיתוף.  
הקפידו על סטנדרטים של כתיבת קוד: ארגון, שמות משתנים, תיעוד.  
**הסипו קובץ readme.txt** המסביר את הפעלת הקוד, ואת הספריות והתקנות הנדרשות להפעלו.

#### **קישורים:**

#### **דוגמאות לרובוטי לגן, ובهم גם רובוט מכונית**

- [MINDSTORMS EV3 Community | I am a teacher and transferred to a school with about 22 sets of barely used 9797 NXT sets | Facebook](#)

#### **מודלים של היגוי ואודומטריה**

- [Ackermann steering geometry - Wikipedia](#)
- [Mobile Robot Kinematics Equations - MATLAB & Simulink](#)
- [ackermannKinematics - Car-like steering vehicle model - MATLAB](#)
- [How and why to use the Ackermann steering model](#)
- [Motion Control Lesson — MentorPi v2.0 documentation](#)
- [trigonometry - Calculate \(three wheeled\) mobile robot position and heading - Mathematics Stack Exchange](#)
- [Wheeled Mobile Robot Kinematics — ROS2\\_Control: Rolling Dec 2025 documentation](#)
- [13.4. Odometry – Modern Robotics](#)

- [Simultaneous localization and mapping - Wikipedia](#)
- [What Is SLAM \(Simultaneous Localization and Mapping\)? - MATLAB & Simulink](#)
- [SLAM for Dummies](#)
- [\(PDF\) The Simultaneous Localization and Mapping \(SLAM\)-An Overview](#)

### הומוגרפיה דו ממדית

- [OpenCV: Basic concepts of the homography explained with code](#)
- [16\\_Homography-estimation-and-decomposition.key](#)

בצלחה!