

# רובוטים ניידים – תשפ"ו

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

בתרגיל זה תרחיבו את מה שהשגתם עד כה בקורס – תבנו רובוט בעל גלגלים מניעים וגלגלי היגוי (בדומה למכונית), תממשו מודל אודומטריה המתאים לרובוט כזה, ותממשו אלגוריתם למיפוי וניווט בזמנית - Simultaneous localization and mapping (SLAM), כל זאת עם שלושה מנועים, חיישן מרחק, שני חיישני מגע, חיישן תאורה ואולי גם מצלמה.

לזירה נוספו נקודת עוגן כדי להקל על ביצוע תהליך ה-SLAM. אלה הם פסים שחורים אנכיים המודבקים על פס לבן לאורך הקיר כמוצג בתמונות:



המשימה העיקרית בתרגיל זה היא מיפוי ומציאת מיקום בזמנית (SLAM).

תוכלו לבחור באחת מצורות ההנעה של רובוטים המתוארות בהמשך. חלקן פשוטות וקלות יותר לביצוע ואחרות מאתגרות ומלמדות יותר. בכל מבנה רובוט שתבחרו ובלי קשר 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 זוויות 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 חיישן מרחק הפונה לכיוון על פי בחירתכם, ושני חיישני מגע - אחד בקצה הקדמי והשני בקצה האחורי.
- ה. התנגשות קדמית או אחורית תפעיל רצף הנעה מתאים על פי השיטה שתבחרו.
- ו. במהלך הנסיעה על הרובוט למדוד את מיקומו בעזרת אודומטריה ושימוש בחיישנים האחרים, ולחשב את המסלול המצטבר.
- ז. הרובוט יציג בזמן אמת את המיקום הנוכחי ואת המסלול המצטבר על מסך ה-LCD שלו.
- ח. לאחר פרק זמן מספיק, ולא יותר מעשר דקות, הרובוט יעצור ויודיע על סיום שלב התנועה.
- ט. המידע יועבר למחשב (בעזרת USB או BT).
- י. בעזרת מידע זה תחושב מפה שתוצג במחשב ועליה יוצג מסלול הנסיעה.

כעת יוצגו כמה אפשרויות למבנה הרובוט ושיטת ההיגוי שלו.  
האפשרויות שונות בדרגת הקושי, ומזכות ב **ציון מקסימלי** ולא **תוספת בונוס**:

1. רובוט בעל היגוי דיפרנציאלי. **ציון מקסימלי 70**.  
אפשרות זו מורידה כמעט לגמרי את האתגר המכני ואתגר האודומטריה ולכן מיועדת למי שבוחר באתגר המינימלי שעדיין מאפשר לסיים את הקורס בהצלחה.
2. רובוט עם היגוי מכונית. **ציון מקסימלי 90**.  
מנוע אחד מניע זוג גלגלים בצורה שווה, ומנוע שני מסובב הגה ששולט בכיוון הציר המחבר את הגלגלים האחרים (או גלגל יחיד אחר), וכך קובע את כיוון הנסיעה. בביצוע אפשרות זו יש לפתח (או למצוא ולהתאים) את משוואות האודומטריה.
3. כמו אפשרות 1 או 2 אך עם חיישן מרחק מסתובב. **בונוס עד 15 נקודות**.  
חיישן מרחק מסתובב יכול לתת הרבה מידע לצרכי המיפוי והמיקום, אך גם מוסיף אתגר של בניה, תוכנה, אינטגרציה וניתוח מידע.
4. כמו אפשרות 2 אבל עם מפרק מרכזי נשלט על ידי מנוע, המשנה את כיוון הרכב, וגם מנוע קדמי ומנוע אחורי. **בונוס עד 15 נקודות**.  
חישבו ובידקו: באילו תנאים יש יתרונות למבנה של הנעה קדמית \ אחורית \ שתיהן?
5. כמו האפשרות הקודמת אבל עם מפרק המשנה את אורך הרכב (משולש עילי או בוכנה). **בונוס עד 15 נקודות**.  
מפרק כזה משנה את ההיגוי ואת האודומטריה. חישבו ובידקו: באילו תנאים יש יתרון למבנה בעל אורך משתנה?
6. אחת מן האפשרויות הקודמות בתוספת שימוש במצלמה. **בונוס עד 40 נקודות**.  
יש כפל בונוסים (למשל מבנה רובוט מאפשרות 5 וגם מצלמה כמתואר כאן).

**קראו בתשומת לב את ההנחיות – בסעיף זה ישנן הרבה אפשרויות ביצוע וחלקן  
מזכות בפחות נקודות מהבונוס המלא.**

באפשרות זו תשתמשו מצלמה חיצונית שמביטה על הזירה ומשמשת למעקב אחר הרובוט בזמן אמת (ואז אפשר להשתמש בתקשורת עם הרובוט להחלפת מידע) או למעקב אחרי הרובוט בסרטון שצולם בזמן הנסיעה אבל מעובד במחשב רק לאחר סיומה.

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

מותר להשתמש במידות הזירה האמיתיות כדי לכייל את המצלמה (כלומר למצוא את הטרנספורמציה בין הזירה כפי שנראית בתמונה לבין גיאומטריית הזירה האמיתית) כפי שמתואר בהמשך. **אבל שימוש במידות הזירה האמיתיות מוריד 5 נקודות**. לכן

מומלץ להשתמש בכיול כזה בשלב הפיתוח, ולהחליפו אחר כך בכיול אוטומטי המתבסס על מסלול הרובוט.

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

זיהוי הזירה בצורה אוטומטית יכול להיעשות על ידי הוספת סימוני צבע על החלקים העליונים של הפינות ואו הקירות של הזירה, ושימוש בכלי עיבוד תמונה לזיהוי אזורי הצבע האלה. זיהוי צבע נוח יותר לעשות במרחב צבע HSV מאשר במרחב RGB. בידקו את אמינות השיטה בתלות בסוג המצלמה, מיקום המצלמה, רזולוציית התמונה, התאורה החיצונית, הצבע ואו תבנית הצבע שמוסיפים לזירה.

זיהוי הזירה בעזרת מצלמה לא ישמש ליצירת המפה של הזירה. את המפה צריך ליצור בעזרת נתוני התנועה של הרובוט (המבוססים עקיבה בווידאו אחר הרובוט ועל האודומטריה של תנועת הרובוט).

מותר לבצע חישוב מסלול הרובוט בזמן אמת בעזרת עקיבה אחר הרובוט בווידאו. במקרה כזה תצטרכו לתקשר עם הרובוט בזמן אמת כדי להציג את המסלול על גבי מסך ה LCD של הרובוט תוך כדי ביצוע הנסיעה.

**אבל חישוב המסלול בעזרת עקיבה בווידאו 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.

עקיבה אחר הרובוט אפשרית בעזרת זיהוי צבע, או מאפיינים אחרים של הרובוט בתמונה ואו זיהוי השינויים מפריים לפריים בווידאו. מומלץ להשתמש בספרייט עיבוד תמונה וראייה ממוחשבת דוגמת OpenCV או כלים של MATLAB. בהן נמצאת תשתית לביצוע משימות הזיהוי והעקיבה.

גיאוטריות הזירה כפי שנראית במצלמה שונה מהגיאוטריות של הזירה האמיתית. התמונה המתקבלת היא הטלה דו ממדית של הזירה ובה עיוותים 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) ומיוצגת על ידי מטריצה  $3 \times 3$  בשם H. אפשר להשתמש בהומוגרפיה כזו כקירוב להטלה של הזירה התלת ממדית אל מישור התמונה כיוון שהפרשי הגובה בזירה קטנים ביחס למרחק של הזירה מן המצלמה, ולגודל הזירה.

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

נקודה בתמונה והנקודה המתאימה לה בזירה נקראות זוג נקודות תואמות (למשל פינה מסוימת בזירה שקל לזהות בתמונה). זוג כזה מספק 2 משוואות מתוך ה 8. לכן מספיקות 4 זוגות נקודות תואמות בין התמונה לבין הזירה למציאת המטריצה.

אנו משתמשים בקואורדינטות הומוגניות בהן נקודה במרחב הדו ממדי מתוארת על ידי וקטור הקואורדינטות  $[x, y, 1]^T$ . המרה מנקודה במצלמה לנקודה במישור הזירה תתואר על ידי המכפלה

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

כאשר  $H$  היא מטריצה  $3 \times 3$ ,  $w$  מסמן זירה (עולם), ו  $c$  מסמן מצלמה. אפשר להרחיב את המשוואה הזו, המתארת זוג יחיד של נקודות תואמות, ולכלול יותר זוגות. כאמור צריך לפחות 4 זוגות למציאת המטריצה. מציאת המטריצה מתבצעת מתמטית על ידי פתרון משוואה מטריציונית במונחי משיטות ידועות. אפשר להשתמש ביותר זוגות, ואז הפתרון המתקבל יהיה הטוב ביותר במונחי מינימום שגיאה ריבועית.

מאין לוקחים את 4 זוגות נקודות תואמות? אפשר להשתמש במידות הזירה האמיתיות לחישוב מיקום הפינות בעולם, ולהן להתאים את מיקום הפינות במצלמה (שנמצאו ידנית או אוטומטית). כפי שכתוב קודם לכן, חישוב  $H$  בעזרת ידע על המידות האמיתיות של הזירה **מוריד 5 נקודות**. לקבלת מלוא הנקודות בחישוב ההומוגרפיה יש להשתמש במסלול הרובוט המחושב בעזרת אודומטריה ובמסלול המחושב בעזרת עקיבה. כיצד? הרי עקיבה אחר הרובוט המתבצעת במישור התמונה מספקת מסלול בזמן, המוטל גם הוא בעזרת אותה ההומוגרפיה. לכן לאחר קבלת האודומטריה של הרובוט אפשר להשתמש במסלול הנצפה (מן התמונה) ובמסלול המחושב על ידי הרובוט ולבצע ביניהם התאמה (matching). בעזרת ההתאמה אפשר למצוא את מטריצת ההומוגרפיה.

## סיכום סעיף 6

לקבלת הבונוס המקסימלי (40 נקודות) יש לבצע בהצלחה:

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

שימו לב

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

ההורדות בניקוד לסעיף זה:

- 10 נקודות - זיהוי ידני של הזירה,
- 5 נקודות - חישוב ההומוגרפיה בעזרת מידע על מידות הזירה האמיתיות,
- 10 נקודות – ויתור על אודומטריה של הרובוט והסתפקות במסלול הנוצר מן העקיבה בוידאו.

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

### הוראות הצגה והגשה:

1. בדיקה במעבדה החל מיום שישי ה 30.1.26.  
אפשר לתאם מועדים אחרים לבדיקת מעבדה והגשה בתוך תקופת המבחנים.
2. הגשת הדו"ח הכתוב ביום שלישי שאחרי ההצגה לתיקיית ההגשה ב Moodle על ידי אחד מחברי הצוות.
3. קל יותר לפתור את התרגיל בקבוצה גדולה ולכן יתבצע תיקון הציון של התרגיל על פי גודל הקבוצה:

גודל צוות	תוספת לציון
1	+10
2 , 3	0
4	-5

4. מותר להשתמש במקורות חיצוניים (תיעוד, מאמרים, הדגמות, קוד, כלי AI). חובה לציין כל מקור.

5. יש לרשום שם ות"ז של כל חברי הצוות בראשית כל קובץ או מסמך.

6. הדו"ח הכתוב יוגש כקובץ Word, ובו:
  - a) תיאור מפורט של הרובוט ושל תהליך הבניה והפיתוח, כולל צילומים רלוונטיים.
  - b) הסבר מפורט של שיטת חישוב האודומטריה.
  - c) הסבר מפורט של אסטרטגית פתרון הSLAM ובמיוחד סגירת הלולאה.

- (d) הסבר מפורט של כל שיטה או אלגוריתם אותם פיתחתם ובהם השתמשתם לפתרון התרגיל (או הפניה למקורות אם זו קופסה שחורה בה השתמשתם).
- (e) תיאור מפורט של התוצאות.
- (f) דיון ענייני וביקורתי בתוצאות. הדיון צריך לכלול הערכת איכות של התוצאות, ובמיוחד אבל לא רק השוואת המפה המתקבלת לנתוני הגודל והזוויות שידועים לכם.
- (g) הפנייה לתיקיית שיתוף ובה צילומים וסרטונים המתעדים את השלבי השונים והתוצאות.
- (h) סיכום: מסקנות והצעות להמשך.
- (i) רשימת מקורות. יש להפנות לרשימה זו מתוך הטקסט הראשי.

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

8. הגישו את הקוד בתיקייה דחוסה או הפנו לתיקיית שיתוף. הקפידו על סטנדרטים של כתיבת קוד: ארגון, שמות משמעותיים, תיעוד. הוסיפו קובץ `readme.txt` המסביר את הפעלת הקוד, ואת הספריות וההתקנות הנדרשות להפעלתו.

## קישורים:

### דוגמאות לרובוטי לגו, ובהם 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](#)

## SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)

- [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](#)

בהצלחה!