

דו"ח מסכם לתכנית מחקר 20-07-0023  
שנת מחקר 2 (2020) מתוך שנתיים

## מערכת רובוטית רב-זרועית לאסיף מלונים- ניסויי שדה

### Multi-arm robotic melon harvester- field tests

מוגש לקרן המדען הראשי של משרד החקלאות ופיתוח הכפר

**על ידי:**

בעז ציון      הנדסה חקלאית, מנהל המחקר החקלאי, מרכז וולקני

ליעד רשף      הנדסה חקלאית, מנהל המחקר החקלאי, מרכז וולקני

Boaz Zion, Agricultural Engineering, ARO, Volcani Center, P.O. Box 15159,  
Rishon LeZion 7528809. [boazz@volcani.agri.gov.il](mailto:boazz@volcani.agri.gov.il)

Liad Reshef, Agricultural Engineering, ARO, Volcani Center, P.O. Box 15159,  
Rishon LeZion 7528809. [liad@volcani.agri.gov.il](mailto:liad@volcani.agri.gov.il)

## תקציר

במסגרת מיזם לחיסכון בכוח אדם מימן המדען הראשי של משרד החקלאות ופיתוח הכפר תכנית מחקר ופיתוח של רובוט לקטיפ מלונים וגידולים נוספים כגון אבטיח ודלעת המאופיינים כגידול דו-ממדי. במסגרת המחקר הקודם פותחה גישה חדשה לאסיף רובוטי המתבססת על מיפוי מוקדם של הפירות הבשלים לאסיף. נבנו דגמי מעבדה ופותרו אלגוריתמים לקביעת סדר אסיף הפירות ע"י מספר זרועות רובוטיות כך שיתקבל אסיף מיטבי במספר זרועות מינימלי. בהמשך למחקר ולאחר סיומו נמשך הפיתוח עד לרובוט בקנה-מידה מלא המדגים פעילות של זרוע אחת. תפקוד הרובוט נבדק והודגם עם כדורים אשר הונחו באופן אקראי בשטח פתוח, סומנו ע"י מערכת GPS ונאספו בהצלחה ע"י הרובוט.

במסגרת הנוכחית הוצע להרחיב את הרובוט לשתי זרועות, כולל בקרה ומסועים המובילים את המלונים מהזרוע האוספת אל יעד ולערוך ניסויי שדה בקנה מידה מסחרי. ועדת שיפוט הציעה שבשנת המחקר הראשונה יתוכנן, ייבנה וייבדק רובוט בעל זרוע אחת, על כל מרכיביו ובשנה השנייה ולאחר ההתנסות, יורחב הרובוט לשתי זרועות וייצא לניסויי שדה.

בשנה הראשונה נבנה רובוט חדש אשר תוכנן לנשיאה עתידית של שתי זרועות. על הרובוט הותקנה זרועה אחת, מסוע רוחבי המשרת את הזרוע בקבלת המלונים שנאספים על ידה ומעלית אורכית המעלה את המלונים אל משטח קבלה המיועד למיון ואריזה לקרטונים. בניגוד לדגם הקודם אשר היה מצויד במערכות הנעה חשמליות הוחלפה ההנעה האנכית בבוכנה פניאומטית. פותחה מערכת בקרה משוכללת המבוססת מיקרו-בקר ובעלת ממשק לטלפון נייד. בשנה השנייה חזרנו לתכנון באמצעות בוכנה חשמלית ונבנה הרובוט השלם בעל שתי זרועות איסוף. תספניות הזרועות הותאמו למלונים בעלי גודל וצורה שונים והבקרה הורחבה לשליטה בשתי הזרועות.

בעונת המלונים 2020 נערכו ניסויי שדה במקשות מלונים בנגב בהם נבדקה יכולת הרובוט לאסוף מלונים בתנאי שטח. בגלל מגפת הקורונה אשר גרמה לעיכובים בתחילת הניסויים לא הייתה אפשרות לשפר את הרובוט בעקבות ממצאי הניסויים ולשוב לבדוק אותה באותה עונה.

בשמונה ניסויים אחרונים, במהירות של כ 20 ס"מ לשנייה, נאספו 100 מלונים מתוך 116 (86%). בתשעה ניסויים במהירות 30 סמ"ש נאספו 91 מלונים מתוך 130 (70%). להערכתנו ניתן להגיע לשיעורי איסוף גדולים יותר בשתי המהירויות באמצעות שיפורים והתאמות המתוארים בסוף הדו"ח.

## **מבוא ותיאור הבעיה (כבהצעת המחקר)**

המוטיבציה להפחתת עבודת ידיים בחקלאות ידועה וברורה לכל. במסגרת קודמת (2011-2013) של מיזם חיסכון בכוח אדם מימן המדען הראשי של משרד החקלאות ופיתוח הכפר תכנית מחקר ופיתוח של רובוט רב-זרועות לקטיף גידולים כמלון, אבטיח ודלעת. במסגרת זו נבחנו גישות שונות לתכנון רובוט מבחינת דרגות חופש ופוטנציאל שיתוף פעולה בין הזרועות, פותחו אלגוריתמים לתכנון אסיף המלונים כך שיתקבל אסיף מיטבי עם מספר זרועות מינימלי ואף נבנו שני דגמים של אב טיפוס מעבדתי.

הגישה הבסיסית לפיתוח הייתה מיפוי מוקדם של מיקום המלונים שנועדו לאסיף, באמצעות מערכת GPS מדויקת. בהעדר יכולת טכנולוגית מוכחת לזיהוי אוטומטי של כל המלונים בשדה (למשל באמצעות מערכות ראייה ממוחשבת) ואבחנה בזמן אמת בין מלון בשל ומלון שאינו מוכן לקטיף, הוצע להתבסס על מיפוי מוקדם באמצעות פועל הצועד בשדה עם תרמיל קל המצויד במערכת GPS, מניח בקלות אנטנת GPS על מלון לקטיף, לוחץ על כפתור ומיקום המלון נרשם. עבודה זו קלה ומהירה יחסית ועובד יכול לכסות שטח נרחב בזמן קצר יחסית וללא מאמץ. הקואורדינטות של כלל המלונים אשר מיועדים לאסיף מוזנות למחשב אשר מתכנן את סדר האסיף המיטבי בתוך שניות ספורות וסדר זה מוזן לבקר הרובוט אשר מוכן לצאת לאסיף. הרובוט עצמו מצויד בשתי אנטנות GPS כך שמיקומו וכיוונו במרחב ידועים במדויק. מיקום זרועות הרובוט ידוע בכל זמן נתון כך שבקר הרובוט מכוון כל זרוע, תוך כדי תנועה, אל המלון הבא בתור לאיסוף. בעתיד, כאשר יפותחו אמצעים לזיהוי וודאי של מלונים, ניתן יהיה לשלבם באותו רובוט במאמץ פיתוח קטן מאד.

מאז סיומה של תכנית המחקר הנ"ל נמשך פיתוח הרובוט ונבנה רובוט בקנ"מ מלא המצויד בזרוע אסיף אחת, במערכת RTK-GPS עם שתי אנטנות ומערכת בקרה בחוג סגור. יכולות הרובוט על מרכיביו השונים נבדקו והודגמו. זמן המחזור של זרוע הרובוט מהרגע שהגיעה אל מלון ועד שהיא מוכנה לאסוף את המלון הבא - כ-5 שניות. לפני העברת הטכנולוגיה לפסים מסחריים היה צורך להשלים את תכנון הרובוט כך שיכלול מסועים המקבלים את המלונים הנקטפים ומעבירים אותם אל פלטפורמה עליה עומדים שני עובדים המקבלים אותם ומניחים אותם ישירות לקרטונים לשיווק, יש לבנות את הרובוט, להרחיב את מערכות הבקרה לשתי זרועות, להתאים את תפסנית האיסוף לגדלי וצורת המלונים ולבדוק את הביצועים של המערכות השונות. בשלב זה מתוכנן רובוט עם שתי זרועות בלבד אך השיטה והגישה מיועדות לרובוט רב זרועות, ככל שתהיינה נחוצות, על-פי גודל השטח, צפיפות היבול וכו'.

## **מטרות המחקר וחשיבותו (כפי שהוגדרו בהצעת המחקר)**

המטרה של העבודה המוצעת הייתה השלמת פיתוח רובוט לאסיף מלונים בקנה מידה מסחרי וביצוע ניסויי שדה לשם בדיקה מקיפה של ביצועיו והוכחת ייתכנות מסחרית. המטרות הספציפיות הן:

- השלמת תכנון מכאני של רובוט בעל שתי זרועות.
- תכנון מערכת בקרה לשתי זרועות.
- התאמת תפסנית לשני סוגי מלון (כדורי- כמו "גליה"; אליפסואידי- כמו "אננס")
- תכן מערכת של פלטפורמת האיסוף והאריזה.
- ניסויי שדה במשך שתי עונות קטיף

### פירוט עיקרי העבודה בשנה א' ותוצאותיה

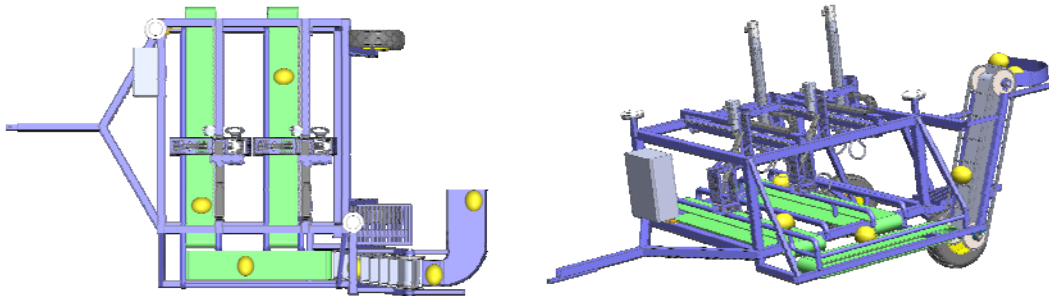
באיור מספר 1 מוצג רובוט אבטיפוס אשר נבנה ונוסה במסגרת המחקר הקודם. הרובוט נגרר ע"י טרקטור (כדי להימנע בשלב זה מעיסוק במשימה הנדסית גרידא של הנעה עצמית) והוא כולל זרוע קרטזית אחת. הזרוע מקובעת לשלדה ואין לה תנועה בכיוון התקדמות הטרקטור אלא בניצב לו ("שמאלה וימינה") כמו גם מעלה/מטה. בקצה הזרוע תפסנית אשר פותחה במכון להנדסה חקלאית לפני שנים רבות והוכחה יעילותה בתפיסת מלונים כדוריים. הזרוע מגיעה לכיוון המלון על-פי תכנון מוקדם ועל-פי מיקום המסגרת אליה היא רתומה) חובקת ואוספת את המלון ומרימה אותו אל מעל לגובה מסוע מקבל (באבטיפוס המוצג, המסוע המיועד הוחלף בסל רשת קבוע - אדום). כאשר הזרוע מגיעה לסוף מהלך ההרמה, מנגנון מקבילית מכניס תחת המלון טבעת המקבלת את המלון מהתפסנית ופורקת אותו בעדינות על המסוע המקבל. הרעיון מאחורי הפרדת המנגנונים הללו לשני מהלכים בא מן הצורך לקצר ככל שניתן את זמן מחזור איסוף פרי. ברגע שהזרוע משחררת את המלון אל הטבעת המקבלת, היא מוכנה לאסוף את המלון הבא בעוד המלון שנאסף משוחרר אל המסוע. שני המנגנונים הללו מחוברים אל אותה מערכת הנעה ועל כן נעים יחדיו. התאום היחיד הנדרש ביניהם הוא כניסת הטבעת אל מתחת לתפסנית אשר התרוממה לאחר איסוף מלון- תאום פשוט ביותר מבחינת בקרה.

השנה תוכנן המכלול המכאני המלא של רובוט בעל שתי זרועות (איור מספר 2). לכל זרוע צמוד מסוע רוחבי המקבל ממנה מלונים ומסיעם אל מסוע אורכי המובילם אל מעלית אשר מעלה אותם אל מעל למשטח המיון ואריזה. על המשטח יעמדו בעתיד שני עובדים אשר יסדרו את המלונים בקרטונים (או בכל אריזה נדרשת) אשר יועברו בסוף שורה אל עגלה מובילה. על פי הנחיית ועדת שיפוט, הרובוט החדש (איור מספר 3) צויד במנגנונים של זרוע אחת אך הוכן להתקנת זרוע נוספת בשנה השנייה. שינוי מכאני משמעותי שנעשה הוא החלפת מנגנון התנועה האנכית מבוכנה חשמלית לבוכנה פניאומטית. הסיבה המרכזית לשינוי הזה היא הפרשי מחיר משמעותיים בין שני המנגנונים (הפניאומטי זול מאד בהשוואה לחשמלי). המעברים ממסוע למסוע ומהמסוע האורכי למעלית תוכננו כך שתמנע פגיעה במלונים ש'מצטברים'.

כיוון שבשלב זה הרובוט אינו בעל הנעה עצמאית אלא נגרר ע"י טרקטור, למסגרת הנגרר תוכנן היגוי הידראולי אחורי אשר מאפשר סיבובים ותמרון במרחב מצומצם (איור 4).



איור מספר 1. תוצר המחקר הקודם- אבטיפוס רובוט אסיף מלונים.



איור מספר 2. תכנון הרובוט עם שתי זרועות. מסוע רחבי משרת כל זרוע ומסועים אורכיים מסייעים את המלונים אל פלטפורמה בירכתיי המכונה עליה עומדים שני פועלים המקבלים את המלונים ואורזים אותם. משמאל- מבט על. מימין- איזומטריה.



איור 3. הרובוט החדש בעל זרוע אחת פניאומטית. מבט מקיף ומבט מקרוב אל התפסנית ומנגנון קבלת המלון.



איור 4. מנגנון היגוי אחורי ברובוט החדש.

### מערכת הבקרה

מיקומו המדויק של הרובוט במרחב וכיוון הזרועות שלו אל מטרות האסיף מבוסס על מערכת בעלת שתי אנטנות RTK-GPS הממוקמות על מסגרת הרובוט. אנטנה אחת נותנת מיקום במרחב והאחרת נותנת את כיוונה ביחס לראשונה. יחד מתקבל מיקום מדויק וכיווניות הרובוט בקואורדינטות עולמיות. המערכת בעלת ממשק תקשורת RS-232 והיא מעבירה פלט מסוג GPGGA, GPHTD בקצב של 10 הרץ.

בשלב איסוף קואורדינטות של מלונים המיועדים לאסיף ("מטרות"), ה GPS מחובר

ליחידות שידור Bluetooth. ליחידה זו שלושה רכיבים עיקריים:

1. מתאם מתחים RS-232 to TTL

2. מיקרו- בקר מסוג ארדואינו

3. מודול Bluetooth

יחידה זו מקבלת את פלט ה GPS ומשדרת אותו כמו שהוא על Bluetooth. יישום אנדרואיד על טלפון נייד מתחבר אלחוטית אל יחידת השידור ומקבל את הודעות ה GPS. באפליקציה ניתן לראות את הפלט ולשמור אותו בזיכרון הטלפון. בשלב זה משתמשים רק בפלט מסוג GPGGA.

בקר הרובוט המנהל את הזרועות מבוסס על כרטיס פיתוח מיקרו-בקר של ST מסוג NUCLEO F091RC. הכרטיס נבחר בשל ריבוי ממשקי התקשורת הקיימים בו (8), יכולת עיבוד מהירה, ממשק USB לפיתוח ועלות נמוכה של \$30. סביב הכרטיס הזה נבנה מעגל אלקטרוני שיועד להעביר תקשורת מ TTL ל RS-232 (בשנה השנייה הוחלף ממשק

התקשורת ל CANOPEN over CABUS), יודע להמיר אותות דיגיטליים ממתח 24V ל 5V, מכיל טרמינלים לחיבורי כבלים, חיבור מודול BlueTooth, חיבור כרטיס זיכרון microSD וכו'. שליטה על מנועי סרוו (servo) מתבצעת ע"י מתן פקודות וקבלת משוב דרך תקשורת RS-232 לדרייברים של המנועים. שליטה על מפעילים פניאומטיים בצורה דיגיטלית דרך ברז חשמלי על הסלקטורים.

לאחר איסוף קואורדינטות של המלונים לאיסוף, המידע השמור בטלפון מועבר (אלחוטית BlueTooth) לבקר הרובוט ונשמר על כרטיס הזיכרון שלו. המידע המועבר כולל זוגות של קואורדינטות (latitude, longitude) בייצוג דצימאלי. כל זוג כזה הוא קואורדינטה של מלון בודד על פני כדור הארץ בדיוק של כ- 2 ס"מ.

מיקום מסגרת הרובוט (מיקום האנטנה הראשונה) וכיוונו של הרובוט (באמצעות הזווית בין שתי האנטנות) ידועים באמצעות ה GPS. הגיאומטריה המדויקת של מסגרת הרובוט ידועה ומיקום זרוע בכל זמן נתון ידועה באמצעות המשוב ממנוע צעד (step motor) המניע אותה בניצב לכיוון התנועה, הבקר יודע לשלוח את הזרוע אל המיקום המדויק של המלון אליו הרובוט מתקרב. עם כל קריאת ה GPS מחושב המרחק ממיקום הזרוע עד למלון הנבחר בשני צירים: בכיוון התקדמות הרובוט ובכיוון ניצב. הזרוע נעה לרוחב המכונה אל המיקום הנכון ע"פ החישוב הנ"ל וממתינה לפקודת "איסוף" כאשר המרחק בכיוון התקדמות הרובוט מגיע לאפס. טבעות התפסנית נסגרות על המלון, הזרוע עולה, מוסרת את המלון למנגנון מקבילי הנכנס תחתה ומעביר אותו אל המסוע. תוך כדי עליית הזרוע עם מלון שנאסף, היא מתחילה לנוע לכיוון המיקום של המלון הבא. מיד עם שחרור המלון מהתפסנית הזרוע יורדת ומוכנה שוב לאסוף המלון הבא.

על מנת להתמודד עם גובה משתנה של פני הקרקע ו/או התנגשויות עם רגבים, התפסנית עצמה מותקנת אל הבוכנה הפניאומטית באמצעות מנגנון מקבילית המאפשר לה חופש תנועה מוגבל כלפי מעלה. אם הזרוע נדחפת על ידי הקרקע, היא מגיעה אל גוש קרבה אשר פותח שסתום ומעלה מעט את הזרוע.

#### בדיקת מכלול מערכות הרובוט

עיכובים ברכישת ציוד ותקלות שגרתיות בהליכי פיתוח מן הסוג בו המחקר עוסק גרמו לכך ששלבי הפיתוח העיקריים הסתיימו לאחר שהסתיימה עונת קטיף המלונים. אשר על כן לא נוסה הרובוט בשטח חקלאי כמתוכנן. כדי לפצות על כך נעשו מספר בדיקות כלהלן.

מטרות בדמות חמישה מעגלים ממורכזים שורטטו על נייר והודבקו במיקומים אקראיים על מסלול בדיקה. המטרות סומנו ע"י מערכת ה GPS והרובוט נשלח להגיע אליהן בשלוש חזרות משני כיוונים הפוכים (המדמים איסוף משני כיווני נסיעה לאורך ערוגת מלונים). סטיות הגעת הזרוע אל כל מטרה נמדדו בדיוק של כחצי סנטימטר בשני כיוונים - כיוון הנסיעה ובניצב לו (טבלה 1). ממוצע הסטיות מצביע על סימון לא מדויק של המטרה ואילו הסטייה מהממוצע מצביעה על אי דיוק בהגעה אל המטרה. מן הניסוי ניכר כי סימון המטרות היה

מדויק מאד- בסטייה קטנה מ 2 ס"מ. הסטייה המרבית של זרוע הרובוט מהמטרות הייתה כ- 3 ס"מ וברוב המקרים כ- 1 ס"מ.

טבלה 1. תיעוד תוצאות ניסוי דיוק הגעה אל מטרות דמות. 5 מטרות, 3 חזרות, שני כיווני נסיעה הפוכים. סטייה מערבה בסימן + ומזרחה -; סטייה צפונה בסימן + ודרומה - . הסטייה המרבית מחושבת מהמוצע. יחידת מידה- ס"מ.

מזרח <<< מערב										כיוון נסיעה
ממוצע כולל		ממוצע		3		2		1		חזרה:
מע/מז	צפ/דר	מע/מז	צפ/דר	מע/מז	צפ/דר	מע/מז	צפ/דר	מע/מז	צפ/דר	כיוון סטייה:
0.7	0.5	-0.3	-2.0	0.0	-2.5	-1.0	-1.5	0.0	-2.0	מטרה
1.3	0.3	-0.3	-2.2	1.0	-2.5	-1.0	-2.0	-1.0	-2.0	1
1.0	0.3	1.0	-0.8	2.0	-1.0	1.0	-0.5	0.0	-1.0	2
0.3	0.7	3.8	0.3	3.5	0.0	4.0	0.0	4.0	1.0	3
1.3	0.5	2.3	0.0	3.5	0.0	2.5	-0.5	1.0	0.5	4
										5

מערב <<< מזרח										כיוון נסיעה				
ממוצע כולל		ממוצע		3		2		1		חזרה:				
מע/מז	צפ/דר	מע/מז	צפ/דר	מע/מז	צפ/דר	מע/מז	צפ/דר	מע/מז	צפ/דר	כיוון סטייה:				
2.1	1.8	0.4	-0.8							מטרה				
1.0	1.5	0.0	-1.0	1.3	0.0	1.2	0.5	0.5	0.5	2.5	0.5	0.5	0.5	1
3.2	1.0	0.2	-0.5	0.8	0.3	0.3	0.2	0.5	0.0	1.0	0.5	-0.5	0.0	2
2.7	1.0	1.7	0.0	2.3	1.3	-0.7	-0.2	-3.0	-1.5	1.0	0.5	0.0	0.5	3
2.2	0.7	1.3	-0.2	0.5	0.3	-0.5	-0.3	-1.0	0.0	-0.5	-0.5	0.0	-0.5	4
				0.7	0.3	0.3	-0.3	1.0	0.0	0.0	-0.5	0.0	-0.5	5

בהתחשב בעובדה שלזרוע היו חופשים מכאניים, הדיוק שהתקבל טוב מאד ומאפשר אסיף מלונים. יחד עם זאת התחלנו מיד בתכנון מחודש של מבנה הנעת הזרוע כדי להגדיל את יציבותה ולצמצם חופשים במטרה להגדיל את הדיוק.

בהמשך בוצע ניסוי באיסוף מלונים אשר הונחו על מסלול מדמה ערוגה. הם סומנו באמצעות ה GPS והרובוט נשלח לאוספם. כל המלונים נאספו במדויק כפי שניתן לראות בסרטון שבקישור הבא:

<https://www.facebook.com/VolcaniAgriEngi/videos/486568188864799/?t=85>

זמן המחזור של איסוף מלון הוא כ- 5 שניות (כלומר מרגע שנאסף מלון ועד לרגע שהתפסנית מוכנה לאיסוף נוסף). במהירות התקדמות של 10 ס"מ בשנייה, זרוע יכולה לאסוף מלונים המרוחקים חצי מ' אחד מהשני בכיוון הנסיעה. במהירות כפולה מזו המרחק המינימאלי בין מלונים הניתנים לאיסוף ע"י אותה זרוע מוכפל למטר בקירוב. בהתאם לצפיפות היבול אפשר להפעיל את הרובוט לאט/מהר יותר או לקבוע את מספר הזרועות הנדרש כדי לאסוף יותר פרי ביחידת זמן. המלונים שבניסוי זה היו קטנים יחסית ולמרות שנאספו כראוי ברור לנו כי יש לשנות את מבנה התפסנית כדי להתאימה למלונים כדוריים גדולים יותר ולמלונים שצורתם אליפסואידית.



## פירוט עיקרי העבודה בשנה ב' ותוצאותיה

בשנת המחקר השנייה והאחרונה הושלם תכנון הרובוט והושלמה בנייתו המלאה (איור 5). מתוך הניסיון בשנה הראשונה להחליף את תנועת זרוע הרובוט בכיוון האנכי מהנעה חשמלית לפניאומטית, נמצאו לשיטה מספר חסרונות אשר העיקריים שבהם היו בלימה חדה מאד בסוף מהלך התנועה (בשני הכיוונים) אשר מזיקה למנגנונים מכאניים והעובדה כי אין אפשרות לשנות את מיקום העצירה של התפסנית (כיוון שהבוכנה משלימה את מהלך התנועה עד לקצוות). על כן שבנו אל המנגנון החשמלי בשתי הזרועות אשר הותקנו. הושלמו מסועי הובלת המלונים הקטופים: מסוע רוחבי נוסף לשירות הזרוע הנוספת כמו גם מסוע ארכי אשר מקבל מלונים משני המסועים הרוחביים ומסיעם אל המעלית. התפסניות שובו כך שיוכלו להכיל מלונים קטנים וכדוריים ומלונים מאורכים בכל מני מידות. התפסניות החדשות מבוססות על אותה שיטה אחיזה שהייתה בתפסנית הקודמת (כליאה בין שתי טבעות), אך קוטר הטבעות הוגדל ל 230 מ"מ (איור 6).



איור 5. רובוט בעל שתי זרועות רתום לטרקטור. מסוע רוחבי צמוד לכל זרוע, מניע מלונים אל מסוע ארכי המעלה אותם אל משטח קבלה.



איור 6. התפסנית החדשה. טבעות אחיזה ראשיות בקוטר 230 מ"מ וטבעות

הגבלה/תמיכה צדיות.

מערכת הבקרה הורחבה לשליטה בשתי זרועות וחלוקת העבודה ביניהן. בשנה הקודמת (בה לא ניסינו את הרובוט בשדה אלא בתנאי מעבדה) התפסנית חזרה למיקום סמוך לקרקע מיד לאחר שסיימה לאסוף מלון. בשיטה זו כל שיש לעשות הוא לסגור את הטבעות כאשר התפסנית מגיעה אל מלון. ואולם בתנאי שדה תפסנית לא יכולה לנוע ממש סמוך לקרקע כיוון שהיא עלולה לגרור עלווה או לפגוע במלונים שבדרך. אשר על כן ובגלל ההנעה החשמלית בכיוון אנכי, זרוע שסיימה איסוף מלון הורדה עד מעל גובה העלווה ומשם ירדה לאסוף מלון כאשר נתנה לה פקודה. כיוון שנדרש זמן ירידה אל המלון, יש לשלוח את פקודת האיסוף לפני המטרה. לצורך כך נבחנו שתי גישות: כיוון שמהירות ההתקדמות הרובוט קבועה, ניתן לחשב את המרחק מהמטרה שיש לתת את פקודת האיסוף ולהסתמך על קריאות ה-GPS לקביעת המיקום; לחליפין, מתוך הנחה שמהירות ההתקדמות עשויה להשתנות בגלל תנאים משתנים, ניתן להתבסס על חישוב מהירות ההתקדמות של הרובוט מתוך קריאות ה-PGS ועל-פי מהירות זו לחשב את המיקום שבו יש לשלוח את פקודת האיסוף. שתי הגישות נבחנו.

ניסויי שדה באיסוף מלונים בוצעו בשטחי מלון סמוך למושבים מסלול ופטיש שבנגב עם מלונים מזנים שונים ובגדלים שונים, רובם ככולם אליפסואידים (מאורכים).

#### תוצאות ניסויי שדה

21.6.20 ניסוי מס' 1: בדיקה ראשונית של כיול מערכות. סומנו 6 מטרות על הדרך המרכזית (לא ערוגת מלונים) ובדקנו היכן מגיעות שתי הזרועות ביחס למטרה, כאשר פקודת התחלת הירידה ניתנת על-פי מרחק מהמטרה ("מוד מרחק"; קבוע לפי ניסיון ועל-פי מהירות הנסיעה), או באופן אוטומטי לפי מדידת המהירות מתוך ה GPS ("מוד מהירות"). במוד מרחק: בתחילת הבדיקות זרוע 1 ירדה אחרי המטרות (אחור) עד 20-25 ס"מ. זרוע מס 2 הקדימה עד 20 ס"מ. מוד מהירות:

במהירות נמוכה (הילוך 1 1100 סל"ד): הזרועות דייקו עם סטיות עד 2 ס"מ.  
במהירות גבוהה יותר (הילוך 2 1100 סל"ד): גם כן סטיות קטנות, עד 3 ס"מ.  
במהירות גבוהה יותר (הילוך 3 1100 סל"ד): סטיות עד 10 ס"מ. – סטיות גדולות.

25.6.20 ניסוי שדה מס' 2: ניסוי בשש מטרות דמה על הדרך הראשית- חזרת הזרועות אל המטרות בהתקרבות איטית עד כדי מהירות אפס, בניסיעה ממערב למזרח ולהיפך. הזרועות הגיעו די במדויק עם שתי סטיות של 4-5 ס"מ.  
בניסוי בתנועה ופקודת איסוף על-פי מוד מרחק, במהירות 20 ס"מ התקבלו סטיות של ירידה לפני המטרות עד 10 ס"מ. לאחר תיקוני פרמטרים לפקודת ירידה שתי הזרועות הגיעו במדויק מאד עם סטייה אחת בלבד של 7 ס"מ.  
במהירות 30 ס"מ ולאחר תיקוני כיוון: מאד מדויק עם שתי סטיות בלבד של 4 ס"מ/ש.  
במוד מהירות מ GPS במהירות 21-22 ס"מ הגענו לאחר תיקונים לדיוק טוב עם סטיות חריגות בודדות עד 5-6 ס"מ.  
ניסוי איסוף מלונים מערוגת גידול. גובה ירידת התפסניות כוון כך שלא ייכנסו לתוך הערוגה. במהירות 21-22 ס"מ נאספו 7 מתוך 10 מלונים. שינינו את גובה הירידה ב 2 ס"מ נוספים ונאספו 9 מתוך 10 מלונים. במהירות 30 האיסוף לא היה טוב.

יום ה' 29.6.20 ניסוי שדה מס' 3: סומנו 30 מלונים בגדלים וכיוונים שונים (מלונים אליפסואידיים). במהירות 21-22 ס"מ נאספו 26 מלונים מתוך 30. חזרה 2 במהירות 21-22 ס"מ/ש נאספו 19 מלונים מתוך 30. במהירות 30 ס"מ/ש תוצאות לא טובות.

יום ב' 6.7 ניסוי שדה 4: שינינו את אסטרטגיית התפיסה. עד כה הזרועות המתינו לפקודת איסוף בקצה העליון של מהלך הבוכנות. מכאן ואילך, זרוע שסיימה לאסוף מלון יורדת עד

מעל לעלווה וממתינה קרוב יותר אל הקרקע (מעמדה  $H=850$  של הבוכנה). כמו כן, במוד של פקודת איסוף על פי מרחק ממטרה, הפקודה ניתנת בפעם הראשונה שהמכונה מזהה שהמרחק מהמטרה קטן מהמרחק שנקבע, ולא פעמיים כפי שהיה עד כה. כילנו את המערכות שוב בבדיקת הגעה אל מטרות קבועות בקרקע במהירות 0. הזרועות הגיעו אל המטרות בסטיות קלות של 2-3 ס"מ.

ניסויי איסוף: סומנו 15 מלונים משני כיוונים, כדי לבחון סטיות בסימון וכן כדי לאפשר איסוף משני כיוונים.

ניסוי 1: במהירות 20-21 ס"מ נאספו 13 מתוך 15 מלונים. השניים שלא נאספו היו קטנים ושקועים.

ניסוי 2: בכיוון הפוך (דרום צפון) נאספו 11 מתוך 15. הזרועות קצת הקדימו את המטרות 2-3 פעמים מהפספוסים הזרוע ירדה במקום הנכון אך לא אספה כי המלון היה קטן ושקוע.

ניסוי 3: כמו בניסוי 2 אך שינינו את פקודת הירידה ל 20 ס"מ לפני המטרות במקום 23 כבניסוי 2. נאספו 10 מתוך 15. שני מלונים פוספסו ובשלושה מקרים הזרועות הגיעו למקום אך המלונים לא נאספו בגלל שהיו קטנים ושקועים בקרקע.

ניסוי 4: חזרה נוספת מצפון לדרום מהירות 20-21. אותן מטרות. נאספו 11/15.

ניסוי 5: חזרה נוספת, 11/15.

ניסוי 6: במהירות 30 ס"מ. נאספו 10/15. שני מלונים פוספסו במיקום, אל שני מלונים הזרוע הגיעה למיקום אך לא הרימה אותם, מלון אחד נפל בהרמה.

#### 9.7 ניסוי שדה מס' 5: בדקנו את עומק ירידת התפסניות.

בדקנו את דיוק סימון מטרות: בשהייה על מטרה מסוימת קריאות ה GPS משתנות ברמה של 1 ס"מ. הבדלי קביעת המיקומים של מטרות, מתוך ארבע חזרות (שתיים בסדר תנועה ממזרח ומערב ופעמיים ממערב למזרח) היו: ממוצע הסטיות (שלוש השוואות) 2 ס"מ; סטיית תקן 1.3 ס"מ סטייה מרבית: 4.7 ס"מ.

סימנו 15 מלונים על הערוגה, פעמיים הלך חזור משני כיוונים. ממוצע סטיית המרחק המוחלט בין מדידות היה כ 1.75 ס"מ וסטיית התקן של הפרשים הייתה 1.1 ס"מ. הסטייה המרבית שנרשמה הייתה 4.4 ס"מ. סטיות אלה הן שילוב של מיקום האנטנה על המלון ושגיאות/סטיות ה GPS.

צמצמנו את מפתח טבעות הגריפרים כדי שייסגרו צמוד יותר וישפרו אחיזה במלונים. ניסויי איסוף:

1. פקודת לקיחה ניתנת 20 ס"מ לפני מטרה. נאספו 11 מלונים מתוך 15. 2 פספוסים.

2 הזרוע הגיעה למקום אך לא הרימה.

2. נאספו 12 מתוך 15. שני מלונים לא נאספו למרות שתפסנית הגיעה למיקומם.

לקיחת מלון אחד שובשה ע"י עלווה.

3. שינינו כך שפקודת לקיחה ניתנת 23 ס"מ לפני מטרה. נאספו 12 מלונים מתוך 15. מלון אחד נפל מהתפסנית, שני מלונים לא נאספו למרות שתפסנית הגיעה למקום הנכון.
4. נאספו 14 מלונים מתוך 15. אל מלון אחד זרוע הקדימה לרדת ופספסה.
5. איסוף בכיוון הפוך (דרום לצפון). הזרועות הגיעו ימינה מהמטרות כנראה בגלל שיפוע הקרקע (שיפוע בירידה שמאלה).
6. עברנו למוד של פקודת איסוף מתוך חישוב מהירות הרובוט. מכפיל המהירות לחישוב מיקום מתן הפקודה = 1.25. מדידת המהירות לפי קריאות GPS במרווחים של 2 שניות. נאספו 15 מלונים מתוך 15.
7. שינינו מדידת מהירות לפי מיקום במרווחים בני 10 שניות (במקום 2 שניות). נאספו 14 מתוך 15.
8. כנ"ל: נאספו 13 מתוך 15.
9. עד כה המהירות הייתה 20-21 ס"מ ש ועברנו למהירות 30 ס"מ ש. מדידת מהירות מתוך מיקום 10 שניות אחורה. נאספו 13 מתוך 15 מלונים. אל שני המלונים הראשונים הזרועות הקדימו מאד.
10. כנ"ל: נאספו 14 מתוך 15.
11. כנ"ל: נאספו 10 מתוך 15. הזרוע הקדמית אחרה לאסוף.
12. כנ"ל: נאספו 12 מתוך 13.
13. במהירות גבוהה יותר (הילוך 4 2000 סל"ד). נאספו 10 מתוך 15. זרועות הגיעו למקום אך לא הצליחו לאסוף.
14. חזרה במוד מהירות, במהירות 20-21 ס"מ ש, מכיוון דרום לצפון. נאספו 9 מתוך 15. הזרועות הגיעו ימינה למטרות בגלל שיפוע השטח בירידה שמאלה. במקרה אחד היה גם פספוס קדימה/אחורה.

### 16.7 ניסוי שדה מס' 6:

- השטח בחלקה הצפונית בשטח שמדרום למושב פטיש, 'צעיר יותר' עם יותר עלווה. כמעט ללא שיפוע צדי ושיפוע קל מאד בכיוון הנסיעה (עליה מצפון לדרום).  
סומנו 16 מלונים משני כיוונים (דר-צפ' וצפ'-דר').  
ניסויי איסוף נעשו במוד מהירות:
1. מהירות 20-21 ס"מ ש נאספו 11/15. מלון אחד מפוספס קבוע במרחק רב שמאלה (מאחר יותר זיהינו בעיה בסימון מיקומו). תפסניות הגיעו למקום אך לא אספו, בגלל עלווה או בגלל שלא ירדו נמוך מספיק או בגלל מלון קטן ושקוע באדמה.
  2. כנ"ל. נאספו 10/15. תפסניות הגיעו למטרות אך לא אספו.
  3. מהירות 30 ס"מ ש. נאספו 7/15. חלק פספוסי מיקום וחלק הגיעו אך לא הרימו.

4. מהירות 30 סמ"ש . נאספו 10/14 . תפסניות הגיעו אך לא הרימו.
  5. מהירות 30 סמ"ש . נאספו 8/14 . הגיעו אך לא הרימו.
  6. 20 סמ"ש בכיוון הפוך (דרום לצפון). נאספו 12/14
  7. כנ"ל . נאספו 14/14
  8. כנ"ל . נאספו 12/14
  9. כנ"ל . נאספו 13/14.
  10. 30 סמ"ש מדרום לצפון נאספו 7/14 . קצת פספוסים מיקום וחלק הגיעו ולא הרימו.
  11. מהירות 20 מדרום לצפון. נאספו 15/16 אל מלון אחד התפסנית הגיעה אך לא אספה.
  12. כנ"ל. נאספו 15/15 (מלון אחד לא הונח במקום הנכון. מלון אחד נאסף אך נפל מהתפסנית.
  13. 30 סמ"ש מדרום לצפון נאספו 16/16 .
  14. כנ"ל. נאספו 11/12 .
  15. כנ"ל. נאספו 12/15 .
  16. 20 סמ"ש בכיוון הפוך (צפון דרום). נאספו 12/15 .
  17. כנ"ל. נאספו 15/15 .
  18. 30 סמ"ש מצפון לדרום. נאספו 9/15 . זרועות הגיעו באחור קל.
  19. כנ"ל. נאספו 11/15 .
- רטון וידאו של הליך איסוף ניתן לראות בקישור הבא:

<https://www.facebook.com/1863235950606600/videos/633552167258417>

## **דין**

### **א. דין בסוף שנת המחקר הראשונה**

השלב הראשון של פיתוח רובוט בקנה מסחרי ובעל זרוע אחת הושלם. הפיתוח הושלם באיחור מסיבות אובייקטיביות ועל כן התאפשרה בדיקתו במעבדה ולא בתנאי שדה כמתוכנן. הבדיקות הראו כי הרובוט מדייק כנדרש בהגעה אל מלונים (סטיות קטנות מ 3 ס"מ) וכי מערכת הבקרה שלו פועלת כראוי. נמצא שנדרשים כמה שיפורים והמשך פיתוח ומציאת פתרונות לקראת העונה הבאה בנושאים הבאים:

לזרוע הנוכחית מבנה מכאני אשר ייצר חופשים במנגנון המהדק את מערכת הנעת הזרוע אל המסלול עליו היא נעה. כיוון שהזרוע עולה ויורדת כ 1.2 מ', חופשים קטנים אלה יוצרים תנועה גדולה יותר בקצה הזרוע כאשר היא בנקודה התחתונה, בעת איסוף מלון. שיפור מערכת ההובלה כבר תוכנן ובזמן הקרוב תבנה ותיבדק.

עד כה נבדקו המערכות מבחינת תפקודן ודיוקן בהגעה אל נקודות מטרה. את הובלת הזרוע בניצב לכיוון התקדמות הרובוט ניתן לזרז (יש אפשרות להפעיל את המנוע צעד מהר

יותר והנושא ייבדק בהמשך. יחד עם זאת ייתכן ואין בכך צורך מעשי כיוון שככל הנראה זמן מחזור עליה וירידת הזרוע הוא הזמן המגביל את קצב האיסוף. בתוך שתי שניות בערך הזרוע יכולה לנוע מצד לצד על פני הערוגה ועל כן לא בהכרח יהיה צורך להגביר את המהירות.

הבוכנה הפניאומטית אשר מניעה את התפסנית בכיוון ניצב לקרקע יוצרת זעזוע (הלם) בקצות המהלך. כדי למתן את הגורם ההרסני הזה, יותקנו מעט לפני קצה המהלך חיישנים מגנטיים אשר יבלמו את תנועת הבוכנה מעט לפני קצה המהלך (כסנטימטר) וללא הלם. הבוכנה תשלים את המהלך מיד לאחר הבלימה הרכה וההלם ימותן באופן משמעותי. דרוש (כמתוכנן) המשך פיתוח של התפסנית אשר חובקת מלונים ואוספת אותם. המבנה הנוכחי מתאים למלונים כדוריים ומוגבל לכאלה אשר משקלם לא גדול (עד 1.5 ק"ג בערך). ואולם יש לתת מענה למלונים כדוריים גדולים יותר ולמלונים אליפסואידים. המשך הפיתוח בעיצומו כבר כעת ואנו מכוונים לנסות את הרובוט בעל שתי זרועות במעבדה בחודש אפריל ולצאת אתו לניסויי שדה מיד אח"כ.

### **ב. דיון מסכם בסוף שנת המחקר השנייה**

משימות המחקר והפיתוח הושלמו במלואן. נבנה רובוט לאסיף מלונים בעל שתי זרועות והוא נוסה בניסויי שדה. יחד עם זאת, בגלל אילוצי קורונה לא התאפשרה הסקת מסקנות מתוך סט ניסויים מקדים, תיקון ושיפור מערכות ועריכת סט נוסף של ניסויים לאחר השיפורים.

בשמונה ניסויים אחרונים, במהירות של כ 20 ס"מ לשנייה, נאספו 100 מלונים מתוך 116 (86%). בתשעה ניסויים במהירות 30 סמ"ש נאספו 91 מלונים מתוך 130 (70%). להערכתנו ניתן להגיע לשיעורי איסוף גדולים יותר בשתי המהירויות באמצעות שיפורים והתאמות כפי שיתוארו בהמשך.

שיעור הצלחת האיסוף בניסויים בודדים נע בין 100% ל 47%. הסיבות ל'פספוס' מלונים יכולות להיות שילובים שונים של אי דיוק בסימון מיקום המלון (בין בגלל הנחת האנטנה לא במרכז המלון או בגלל סטיות רגעיות במערכת GPS), אי דיוקים במיקום הרובוט במרחב (בגלל סטיות GPS רגעיות), שיפועי השטח (כיוון שאנטנות הרובוט ממוקמות ברום המסגרת, אם השטח משופע, הורדת תפסנית לאיסוף מלון במצב שהמסגרת בשיפוע, שולחת את התפסנית בכיוון משופע אשר עשוי להחטיא את המטרה), או חופשים מכאניים במערכות השונות. צמצום חופשים מכאניים, שימוש במערכות מודדות שיפועים או איזון דינמי ובזמן אמת של מסגרת הרובוט כך שתישאר מאוזנת גם כשהשטח משופע (שיפועים צדיים או אורכיים) יעלו את אחוזי הצלחת האיסוף. כמו כן יש לשקול את הצבת האנטנות קרוב יותר אל הקרקע (ברובוט הנוכחי הן בגובה של כ 1.8 מ') כדי להקטין השפעת שיפועי השטח ואולם ככל הנראה צריך יהיה להרחיק אותן ממסגרת הרובוט כדי לצמצם חסימת אותות ה-GPS.

קצב עדכון ה GPS בצידוד הקיים הוא 10 הרץ. במהירות 20 ס"מ/ש, הרובוט מתקדם 2 ס"מ בין עדכון לעדכון ובמהירות גדולה יותר המרחק הזה שונה בהתאם- 3 ס"מ במהירות 30 ס"מ/ש. יש מקום לכלול תיקון של מתן פקודת האיטוף (פקודת הבקר אשר מורה לזרוע לרדת ולאסוף מלון) כך שתתחשב בזמן החישוב של המיקום ומהירות התקדמות הרובוט.

התפסניות האוספות את המלונים הותאמו בהתאם לניסויים שנערכו בשנה הראשונה. שתי טבעות בקוטר 230 מ"מ חובקות את המלון הנאסף. המידה הזו מאפשרת "סלחנות" לאי דיוקים במיקום. כלומר, גם כאשר הטבעות נסגרות מספר ס"מ לפני או אחרי המלון, בגלל גודלן הן מצליחות לחבוק את המלון ולאסוף אותו.

בקרת הגובה של זרועות הרובוט התבססה על ירידה עד למגע עם הקרקע כך שטבעות התפסנית נלחצות כלפי מעלה ומנגנון של גשש קרבה מפעיל בבקר פקודת סגירת הטבעות והרמה. ואולם בגלל פני שטח שאינם אחידים (רגבים, שיפועי הגדודית, חלק מכוסה ביריעת פלסטיק וכו') המנגנון לא פעל ונאלצנו להגדיר לזרוע מרחק ירידה קבוע. במצב כזה, קשה לאסוף מלון שקצת שקוע בקרקע כיוון שהזרועות נסגרות גבוה מדי. זו הייתה הסיבה העיקרית לפספוס איטוף. יש פתרון תכנוני לבעיה זו והוא יבוצע בגרסה הבאה של הרובוט.

במהירות התקדמות של 20 ס"מ/ש הספק הקטיף כ 1.5 דונם בשעה. אם זמן מחזור איטוף הוא 5 שניות אזי זרוע יכולה לאסוף מלונים המרוחקים זה מזה 1 מ'. במהירות 30 ס"מ/ש הספק גדל לכ- 2 דונם לשעה וזרוע יכולות לאסוף מלונים המרוחקים זה מזה 1.5 מ'. במהלך הניסויים והפיתוח עלו רעיונות חדשים כיצד לקצר את זמן המחזור (לדוגמה, שיפור מנגנון הלקיחה של מלון שנאסף מהתפסנית- המנגנון המקבילי שקיים בתכנון הנוכחי. זה עשוי לפשט את המערכת ואף לקצר את מהלך הבוכנה האנכית).

יש לציין שבמחקר הנוכחי הצבנו כמטרה את הוכחת הייתכנות הטכנולוגית של איטוף רובוטי של מלונים תוך השענות על סימון מראש של מיקום מלונים המוכנים לאיטוף (מלונים נאספים באופן בררני- רק הבשלים נאספים בכמה גלי איטוף) ואף חיתוכם מהצמח על ידי האדם שמסמן אותם מראש. לא התמודדנו עם מכלול נושאים חשובים כגון: מידת הפגיעות במלונים, איטוף של מלונים צפופים מאד, השפעה אפשרית של הזזת מלונים סמוכים למלון שנאסף בגלל גרירת עלווה ועוד. הרובוט נע מעל ערוגה ממנה הוא אוסף את המלונים. בשיטת הגידול הנהוגה, כלי עיבוד שונים (בעיקר ריסוס) נעים מעל ערוגה אחת ומטפלים בארבע ערוגות מכל צד כדי להימנע מדריסת העלווה שבין ערוגות צמודות. ואולם, בעת האיטוף, פועלים הולכים על הערוגות ורומסים את הצמחים וככל הנראה פוגעים ביבול של גלי האיטוף העוקבים. אם רובוט איטוף ימומש בעתיד, הוא ינוע מעל כל ערוגה וידרוס את הצמחים שבשבילים שבין ערוגות. נושא זה ידרוש פינוי מלונים שצמחו על השבילים אל הערוגה (בעבר שיטה כזו נהגה בגידול עגבניות וישנם פתרונות מכאניים) ו/או בחינה השוואתית של ההשפעה של דריסת הצמחים בשבילים על ידי הרובוט לעומת דריסת הצמחים על ידי הפועלים באיטוף ידני.



אם וכאשר יהיה המשך לניסיון לפתח רובוט לאסיף מלונים תידרש עבודה על הנושאים אשר צוינו לעיל. יחד עם זאת אנו סבורים שפריצת דרך משמעותית תתאפשר אם תפותח מערכת חכמה המסוגלת לזהות מלונים בזמן אמת ולהבדיל בין המלון בשל למלון שעדיין לא. הרובוט שפותח בעבודה זו מוכן לשילוב מערכת זיהוי שכזו אשר תחסוך גם את עבודת סימון המלונים. לחליפין, אם יטופחו זני מלונים אשר הפירות מבשילים באופן אחיד, ניתן יהיה לפתח מערכות איסוף פשוטות יחסית.