

**משרד החקלאות - דו"ח לתוכניות מחקר
לקרן המדען הראשי**

קוד זיהוי	א. נושא המחקר (בעברית)
1 - 0566 - 838 2	פיתוח מערכת רובוטית רב זרועית למיכון חוסך כוח אדם בחקלאות

ג. כללי			
מוסד מחקר של החוקר הראשי			
הטכניון - המרכז למחקר בהנדסה חקלאית			
סוג הדו"ח		תאריכים	
מסכם	תקופת המחקר	עבודה מוגשת הדו"ח	
		התחלה	
	סיום	שנה חודש	
		שנה חודש	שנה חודש
		12 / 2013	02 / 2014

ב. צוות החוקרים		
שם פרטי	שם משפחה	
יצחק	שמואליץ	חוקר ראשי
חוקרים משניים		
בועז	ציון	1
אביטל	בכר	2
רפי	לינקר	3
דרור	רובינשטיין	4
ירון	פרנקו	5
רון	ברנשטין	6
רוני	הופמן	7

ד. מקורות מימון עבורם מיועד הדו"ח		
שם מקור המימון	קוד מקור מימון	סכום שאושר למחקר בשנת תיקצוב הדו"ח בשקלים
מדען ראשי		974,325

ה. תקציר שים לב - על התקציר להיכתב בעברית לפי סעיף ה' שבהנחיות לכתובת דיווחים במדינת ישראל כ- 150,000 דונם גידולי אבטיח ומלון. בגידולים אלו עובדים כ- 1,700 פועלים אשר 60% מהם זרים. מטרת המחקר הייתה לפתח מערכת רובוטית לאיסוף מלונים שתאושש על מספר מינימאלי של אנשי צוות ותפוקתה תהיה גדולה. במידה והמערכת תיושם ב- 30% משטחי הגידול בלבד ייחסכו כ- 300 עובדים זרים שעלותם השנתית הינה כ- 26,000,000 ₪. האתגר המחקרי לפתח מערכת רובוטית לאיסוף אופטימאלי מבחינת עלות ותפוקה של מילונים בשדה. בשנתו הראשונה של המחקר חקרו בטכניון ובמינהל המחקר החקלאי חלופות שונות לתצורות של הזרועות הרובוטיות עבור מערכת האיסוף. נבנו מודלים לאופטימיזציה של האיסוף ואבי-טיפוס מעבדתיים לאימות המודלים. הוכנו הכלים לאופטימיזציה דינמית של תצורת תנועה אופטימאלי של תהליך האיסוף, תכן אבי-טיפוס המעבדתיים והכנסת בקרים לתכנון התנועה של האב-טיפוס המעבדתי בשנה ב' של המחקר. ההתקדמות העיקרית של המחקר בשנתו השלישית הייתה בניית אלגוריתמים לחישוב אופטימאלי של משימות האיסוף של כל אחת ממספר זרועות רובוטיות. נושא זה היה ברמת סיבוך גדולה והאלגוריתמים שפותחו נותנים מענה אופטימאלי בזמני חישוב קצרים ביותר. באמצעות החישובים המתאפשרים כעת ניתן לגשת לתכנון פונקציונאלי של הרובוט (מבחינת מספר זרועות נדרש ויכולות קינמאטיות שלהן). באמצעות אבי הטיפוס המעבדתיים שנבנו נבחנו האלגוריתמים. כמו כן אומתו ביצועי תכן אב-טיפוס הכללי באמצעות מודל דינמי. תוכנן וניבנה אב הטיפוס מעבדתי ותפסן הפרי.
--

הנני מאשר שקראתי את ההנחיות להגשת דיווחים לקרן המדען הראשי והדו"ח המצ"ב מוגש לפיהן



תאריך 1-2-2014 (שנה) (חודש) (יום)	רשות המחקר	אמרכלות (רשות המחקר)	מנהל המכון (פקולטה)	מנהל המחלקה	חוקר ראשי
---	---------------	----------------------------	------------------------	----------------	-----------

דו"ח לתכנית מחקר מספר 838-0566-12

פיתוח מערכת רובוטית רב זרועית למיכון חוסך כוח אדם בחקלאות

A development of a multi-manipulator robotic system for automation and reducing of manpower in agriculture

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות לחסכון בידים עובדות 02-1082

ע"י

שמואל יצחק וצוותו המרכז למחקר בהנדסה חקלאית – הטכניון, חיפה

ציון בועז וצוותו המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי

Itzhak Shmulevich, et al. Agricultural Engineering Research Center, Technion, Haifa, 32000, E-mail: agshmilo@technion.ac.il

Boaz Zion, et al. Agricultural Engineering Institute, ARO, Ministry of Agriculture, P.O.B. 50250 Bet Dagan. E-mail: boazz@volcani.agri.gov.il

תקציר

במדינת ישראל כ- 150,000 דונם גידולי אבטיח ומלון. בגידולים אלו עובדים כ- 1,700 פועלים אשר 60% מהם זרים. מטרת המחקר הייתה לפתח מערכת רובוטית לאיסוף מלונים שתאויש על מספר מינימאלי של אנשי צוות ותפוקתה תהיה גדולה. במידה והמערכת תיושם ב- 30% משטחי הגידול בלבד ייחסכו כ- 300 עובדים זרים שעלותם השנתית הינה כ- 26,000,000 ₪. האתגר המחקרי לפתח מערכת רובוטית לאיסוף אופטימאלי מבחינת עלות ותפוקה של מילונים בשדה. בשנתו הראשונה של המחקר חקרו בטכניון ובמינהל המחקר החקלאי חלופות שונות לתצורות של הזרועות הרובוטיות עבור מערכת האיסוף. נבנו מודלים לאופטימיזציה של האיסוף ואבי-טיפוס מעבדתיים לאימות המודלים. הוכנו הכלים לאופטימיזציה דינמית של תצורת תנועה אופטימאלי של תהליך האיסוף, תכן אבי-טיפוס המעבדתיים והכנסת בקרים לתכנון התנועה של האב-טיפוס המעבדתי בשנה ב' של המחקר. ההתקדמות העיקרית של המחקר בשנתו השלישית הייתה בנית אלגוריתמים לחישוב אופטימאלי של משימות האיסוף של כל אחת ממספר זרועות רובוטיות. נושא זה היה ברמת סיבוך גדולה והאלגוריתמים שפותחו נותנים מענה אופטימאלי בזמני חישוב קצרים ביותר. באמצעות החישובים המתאפשרים כעת ניתן לגשת לתכנון פונקציונאלי של הרובוט (מבחינת מספר זרועות נדרש ויכולות קינמאטיות שלהן). באמצעות אבי הטיפוס

המעבדתיים שנבנו נבחנו האלגוריתמים. כמו כן אומתו ביצועי תכן אב-טיפוס הכללי באמצעות מודל דינמי. תוכנן וניבנה אב הטיפוס מעבדתי ותפסן הפרי.

הצהרת החוקר הראשי:

הממצאים בלוח זה הינם תוצאות תיאורטיים בלבד.

הניסויים מהווים המלצות לחקלאים: לא (מחקר את המיותר)

תאריך: 1-02-2014

חתימת החוקר

רשימת פרסומים שנבעו מהמחקר:

ראה דפים מצורפים

Conference Papers

1. M.P. Mann, Y. Shmulevich, D. Rubinstein. Optimal Kinematic Motion Planning of a Mobile Conveying Melon Harvesting Cartesian Robot Manipulator. *Israeli Conference on Technology in Agriculture*. Beit Dagan, Israel, July 2011.
2. M.P. Mann, I. Shmulevich, D. Rubinstein. Time optimal interpoint trajectory planning for a mobile melon harvesting Cartesian robot manipulator, *Graduate Students in Control*. Tel Aviv, Israel, April 30, 2012.
3. M.P. Mann, I. Shmulevich, D. Rubinstein, Boaz Zion. Combinatorial optimization of robotic melon harvesting, *Agritech 2012*. Tel Aviv, Israel, May 17, 2012.
4. M.P. Mann, I. Shmulevich, D. Rubinstein and. Optimal motion planning of a mobile conveying Cartesian manipulator for maximum melon harvesting, *International Conference of Agricultural Engineering*. Valencia, Spain, July 8-12, 2012.
5. M.P. Mann, I. Shmulevich, D. Rubinstein. Cost effective development of a mobile conveying melon harvesting robot, *ASABE Annual International Meeting*. Dallas, TX, July 29-August 1, 2012.
6. Zion B., Levin D. and Shilo A. A multi-arms robotic harvester for 2-D crops. The 3rd International Conference of Agricultural Engineering (CIGR-AgEng2012), Valencia, Spain, July 8-12, 2012.
7. M.P. Mann, I. Shmulevich, D. Rubinstein, R. Linker, B. Zion. Predicting the Harvest Percentage of Robotic Melon Harvesters: A Probabilistic Approach. *Submitted to XXXV CIOSTA & CIGR V Conference 2013*.
8. M.P. Mann, I. Shmulevich, D. Rubinstein, B. Zion. A Probabilistic Approach to Robotic melon harvesting efficiency. *Israeli Conference on Technology in Agriculture. Beit Dagan, Israel. May 2013*.
9. M.P. Mann, I. Shmulevich, D. Rubinstein. Infinite Horizon Dynamic Programming Applied to Robotic Melon Harvesting. *Graduate Students in Control. Haifa, Israel. May 2013*.

10. M.P. Mann, I. Shmulevich, D. Rubinstein, R. Linker, B. Zion. Predicting the Harvest Percentage of Robotic Melon Harvesters: A Probabilistic Approach. *CIOSTA. Billund, Denmark. July 2013.*
11. M.P. Mann, Boaz Zion, I. Shmulevich, D. Rubinstein, R. Linker. Multi-Manipulator Robotic Fruit Harvesting – Combinatorial Optimization and Performance Analysis. *The Israeli Conference on Robotics, 2013.*
12. M. Karagoden, A. Weinstock, M. Mann, A. Bechar, S. Katzman, V.Chernishev, G. Lidor, R. Finkelshtein, I. Shmulevich. PLC Control System for Automatic Melons Collection *The Israeli Conference on Robotics, 2013.*

Journal Papers

1. M.P. Mann, I. Shmulevich, D. Rubinstein, R. Linker, B. Zion, Motion planning of a mobile conveying Cartesian manipulator for maximum melon harvesting, *ASABE Journal*, Accepted for publication 2014.
2. M.P. Mann, I. Shmulevich, D. Rubinstein, Boaz Zion, Minimum Time Pick and Place Motions for Cartesian Mobile Manipulators of a Melon Harvesting Robot, *Accepted for publication in ASME Journal of Systems Dynamics and Control*. Accepted for publication 2014.
3. Boaz Zion, M.P. Mann, D. Levin, A. Shilo, D. Rubinstein, I. Shmulevich. Harvest-order planning for a multi-arm robotic harvester. Submitted to *Computers and Electronics in Agriculture*. Accepted for publication 2014.
4. M.P. Mann, Boaz Zion, I. Shmulevich, D. Rubinstein, R. Linker. Multi-Manipulator Robotic Fruit Harvesting – Combinatorial Optimization and Performance Analysis. Submitted to *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, In final preparation.
5. M.P. Mann, Boaz Zion, I. Shmulevich, D. Rubinstein. Determination of Robotic Melon Harvesting Efficiency: A Probabilistic Approach. Submitted to *Operational Research*. In final preparation.

פיתוח מערכת רובוטית רב זרועית למיכון חוסך כוח אדם בחקלאות

יצחק שמולביץ¹, בעז ציון², אבי שלו², אביטל בכר², רפי לינקר¹, דרור רובינשטיין¹, ירון פרנקו¹, רון ברנשטיין², אבי שילו², רוני הופמן², רפי רגב², יוסף גרינשפון², לביא רוזנפלד², משה קרגודין², אמיר רוני³, עומר שמשון³

¹ - המרכז למחקר חקלאי, המסלול להנדסה חקלאית הטכניון חיפה
² - המכון להנדסה חקלאית, מנהל המחקר החקלאי, משרד החקלאות
³ - שרות ההדרכה והמקצוע, משרד החקלאות

מוגש לצוות היגוי חיסכון בידיים עובדות 02-1082

מחקר מס' – 838-0566-12

שם החוקר	שטח פעולתו במסגרת הפרויקט
יצחק שמולביץ	- ריכוז הפרויקט –agshnilo@tx.technion.ac.il,
בעז ציון	- פיתוח מערכת מיפוי מטרות, אופטימיזציה של תהליך האיסוף
אבי שלו	- אופטימיזציה מערכת רבת זרועות
אביטל בכר	- ממשק רובוט/אדם ואלגוריתם לאיסוף אופטימאלי, חקר ביצועים, תכן ניסויים
רפי לינקר	- פיתוח מערכות הבקרה והחישה
דרור רובינשטיין	- פיתוח מודל דינמי של זרועות עזר, אופטימיזציה לחלופה מיטבית
משה מן	- דוקטורנט, אופטימיזציה בעלות המערכת ויעילות
אבי שילו	- תכן מערכות מכאניות ובקרה.
אריק וינשטיין	- מהנדס מערכת, אחראי לתכנון ובניית אבי הטיפוס המעבדתיים
ירון פרנקו	- פיתוח מודל דינמי של זרועות עזר, אינטגרציית הפלטפורמה וניסויים
יוסף גרינשפון	- פיתוח מערכות אלקטרוניות
לביא רוזנפלד	- פיתוח מערכות אלקטרוניות
רוני אמיר	- מיכון חקלאי היבטים אגרוטכניים
שמשון עומר	- מדריך ירקות –דלועיים סיוע בהיבטים הקשורים לגידול תיאום וסיוע בשטחי ניסוי
משה קרגודין	- פיתוח בקרה לאבי טיפוס מוקטנים

תקציר

במדינת ישראל כ- 150,000 דונם גידולי אבטיח ומלון. בגידולים אלו עובדים כ- 1,700 פועלים אשר 60% מהם זרים. מטרת המחקר הייתה לפתח מערכת רובוטית לאיסוף מלונים שתאושש על מספר מינימאלי של אנשי צוות ותפוקתה תהיה גדולה. במידה והמערכת תיושם ב- 30% משטחי הגידול בלבד ייחסכו כ- 300 עובדים זרים שעלותם השנתית הינה כ- 26,000,000 ₪. האתגר המחקרי לפתח מערכת רובוטית לאיסוף אופטימאלי מבחינת עלות ותפוקה של מלונים בשדה. בשנתו הראשונה של המחקר חקרו בטכניון ובמינהל המחקר החקלאי חלופות שונות לתצורות של הזרועות הרובוטיות עבור מערכת האיסוף. נבנו מודלים לאופטימיזציה של האיסוף ואבי-טיפוס מעבדתיים לאימות המודלים. הוכנו הכלים לאופטימיזציה דינמית של תצורת תנועה אופטימאלי של תהליך האיסוף, תכן אבי-טיפוס המעבדתיים והכנסת בקרים לתכנון התנועה של האב-טיפוס המעבדתי בשנה ב' של המחקר. ההתקדמות העיקרית של המחקר בשנתו השלישית הייתה בנית אלגוריתמים לחישוב אופטימאלי של משימות האיסוף של כל אחת ממספר זרועות רובוטיות. נושא זה היה ברמת סיבוך גדולה והאלגוריתמים שפותחו נותנים מענה אופטימאלי בזמני חישוב קצרים ביותר. באמצעות החישובים המתאפשרים כעת ניתן לגשת לתכנון פונקציונאלי של הרובוט (מבחינת מספר זרועות נדרש ויכולות קינמאטיות שלהן). באמצעות אבי הטיפוס

המעבדתיים שנבנו נבחנו האלגוריתמים. כמו כן אומתו ביצועי תכן אב-טיפוס הכללי באמצעות מודל דינמי. תוכן וניבנה אב הטיפוס מעבדתי ותפסן הפרי.

- I -

תוכן עניינים

2.	תקציר.....
2.	תקציר מורחב.....
3	2. מטרות המחקר.....
3	3. תוצאות.....
3	3.1 מאפייני השדה.....
4	3.2 . תכנון משימות לרובוטיקה רבת זרועות (YZ).....
4	3.2.1 אלגוריתם לתכנון סדר איסוף המלונים – בשיטה.....
6	3.2.2 אלגוריתם לתכנון סדר איסוף המלונים בעקרון קמבנטורי.....
7	3.3 בניית מודל אופטימיזציה לחישוב פעולת רובוט קרטזי-XYZ.....
7	3.3.1 שיפור אופטימיזציה האיסוף הרובוטי של קונפיגורציה XYZ.....
	3.3.2 שיפור אופטימיזציה האיסוף הרובוטי של קונפיגורציה XYZ
10	באמצעות שיטה קומבנטורית.....
	3.3.3 שיפור אופטימיזציה האיסוף הרובוטי של קונפיגורציה XYZ
11	באמצעות שיטה סטטיסטית.....
12	4. מיפוי מלונים ומיקום הרובוט בשדה.....
12	5 תכן הרובוט.....
13	5.1 תכן אב טיפוס מוקטן.....
13	5.1.1 תכן אב טיפוס מסוג XYZ.....
14	5.1.2 תכן אב טיפוס מסוג YZ.....
15	5.1.3 תכן בקרת תנועת רובוט XYZ.....
15	5.1.4 ניסויי ברובוט XYZ בתנאי מעבדה.....
16	5.2 תכן ובניית מכונת שדה בקנה מידה.....
16	5.2.1 תכן הרובוט מסוג YZ בעל זרוע אחת.....
17	5.2.2 תכן טפסנית הפרי.....
17	5.2.3 תכן באמצעות Multi-body-Dynamic.....
18	6. סיכום ומסקנות.....
18	מראי מקום.....

תקציר מורכב

על-פי ניסיון מצטבר בשנים האחרונות, מערכות רובוטיות מסחריות אינן כלכליות ליישומים חקלאיים. לכן, הצענו גישה חדשה בה מופרדת מערכת החישה ממערכת האיסוף. מיקום המלוניס ימופה ע"י מערכת GPS מדויקת (ברמות של ס"מ בודד) ונתוני מטרות האיסוף יוזנו לבקר הרובוט. גישה זו מאפשרת לעובד לסמן במדויק ובמהירות מלוניס בשלים לאיסוף ובכך הופכת מערכת האיסוף למהירה ויעילה יותר. שילוב נכון של אדם-רובוט יכול לבוא לידי ביטוי בזמני ביצוע בעלי תפוקות שדה גבוהות מזו של פעילות כוח אדם אנושי בלבד או של רובוט אוטונומי לחלוטין.

ממחקרים רבים עולה כי נדרש לצמצם את זמן המחזור של רובוטים לפעילות בגידולים שונים לשניות בודדות על מנת שרובוטיקה תשמש תחליף כלכלי לעובד לעבודת ידניים. המחקר הנוכחי עסק בעיקר בפיתוח שיטות לניווט הרובוט בהנחה שהפרי נותק ויש למצוא דרך אופטימאלית לאוספו. כמו כן, לחקור ולפתח שיטות לשילוב אדם ומערכת רובוטית מרובת זרועות לקטיף גידולי שדה שרועים.

המחקר בשלב הראשון התרכז בבחינה תיאורטית של טווחי ההישג אופטימאליים עבור תצורות זרועות שונות, מהיבטי דינאמיקה וביצועים של מערכת הזרועות ובתצורה רב-זרועית אשר תתאים ליישומים חקלאיים. על המערכות הנבחרות נערך לימוד אופטימיזציה מבחינת עלות המערכת ויעילותה. המחקר התרכז בפיתוח אלגוריתם לתנועת רובוט חד-זרועי ולהקצאת משימות איסוף למספר זרועות נדרש כך שיאספו מירב המלוניס. מאחר וחשוב אופטימאלי של משימה קומבינטורית זו, בשיטת חיפוש "פרימיטיבית" דורש זמן אינסופי, לחקלאי נדרשו אלגוריתמים חכמים לביצוע המשימה.

בשנה השנייה נבנו שני אבי טיפוס של פלטפורמות בגודל מוקטן בעלי מערכות זרועות קרטזיות. באחת לזרועות יש אפשרות תנועה בכיוון נסיעת הטרקטור הגורר את הרובוט והיא מצוידת בשני מסועים ארכיים לקבל הפרי שנאסף. באחרת הזרועות מקובעות ואינן יכולות לנוע בכיוון הנסיעה ולכל זרוע צמוד מסוע רוחבי אליו פורקת הזרוע את הפרי שאספה. בשלב זה ההנחה כי הפלטפורמות נעות במהירות קבועה לאורך ערוגת המלוניס (ובעתיד תתאפשר שליטה ובקרה של מהירות ההתקדמות). במקביל לבנית הפלטפורמות הועמק הפיתוח של אלגוריתם הניווט כך שבהינתן מקום הפירות ידע האלגוריתם האיסוף לכוון את הזרועות אל מטרות האיסוף. אלגוריתם הניווט הורחב תוך שימת דגש על חיסכון בזמן חישוב. בשנתו השלישית של המחקר שופרה יעילות החישוב ע"י אלגוריתמים קומבינטוריים וגישות הסתברותיות וחקר ביצועים. כמו כן, הושלמה בקרת התנועה במערכת אב טיפוס מוקטן ונערכו ניסויים במעבדה באיסוף כדורים תוך יישום בקרה תהליך האיסוף האופטימלי. האיסוף התנהל באמצעות האלגוריתם שפותחו ויעילותם נבחנה. כמו כן, תוכנן ונבנה אב הטיפוס מלא להדגמת יכולת המכונה כוללת זרוע ברוחב מלא נושאת התקן לאיסוף אוטומטי של הפרי. כרגע בקרת הכלי לא הושלמה דבר המונע מהדגמת עבודתה בשדה. המחקר הנוכחי הביא גישה גרנית לטיפול באיסוף אוטונומי של האריזה פירות מגידולים הניתנים למידול כדו-מימדיים. המחקר התרכז במלוניס כגידול מודל. מסקנות המחקר יכולות לשמש גם לגבי גידולים שרועים אחרים ואף בתהליכי מיון חומר חקלאי מעל מסועים. חשיבות וייחודיות הפרויקט בחיסכון בכוח אדם, הקטנת העומס הפיסי על העובד והפחתת התלות בזמינות כוח האדם. באמצעות המערכת שפותחה נקבל קיצור זמני התהליכים השונים באיסוף מלוניס ובעקבות זאת שיפור איכות המוצר, אפשרות לקטיף בשעות הערב או הלילה, הקטנת העלויות הכרוכות בתהליך הקטיף והגדלת רווחיות הגידול. המחקר הינו שלב מכריע בפיתוח הכנסת טכנולוגיות רובוטיקה בחקלאות ישראל ובעל פוטנציאל יישומי ריאלי.

1. מבוא ותיאור הבעיה

המוטיבציה להפחתת ידיים עובדות בשוק היצרני בכלל ובחקלאות בפרט הינה דרישה מתמשכת שבמהותה באה להקטין את עלויות המוצר מחד ומאידך להביא לרווחיות הגידול. התפתחויות טכנולוגיות באוטומציות היצור בתעשייה אתגרו את המחקר החקלאי לעסוק בהכנסת רובוטיקה לחקלאות בעיקר במטרה למצוא פתרון למיכון באיסוף התוצרת ובעישוב (Sakai et al. 2008). עם זאת, בניגוד לרובוטיקה תעשייתית, בחקלאות לא הצליחו להכניס מערכות רובוטיות באופן מסחרי מעבר לדגמי מחקר. ניתן להסביר עובדה זו בכך שלמיכון הרובוטי בחקלאות דרושים רכיבי תבונה מלאכותית שעדיין יקרות, תפקוד בתנאי סביבה קשים ובלתי מובנים, דינמיות של המשתנים השונים וחוסר ודאות. בשל כך עדיין קיים פער בין תפוקת רובוט בהשוואה לחלופה האנושית. קצבי העבודה, או בלשון חקלאית, ספיקות השדה ועלות הרובוט ותפעולו, חייבים לעמוד בתחרות כלכלית לעבודת אדם במטרה להביאו כפתרון מחליף ידיים עובדות בחקלאות. לכן, בראיית המחקר הנוכחי הכוונה להפריד בשלב ראשון את יכולות החישה מכוונת המשימה מהרובוט ולהיעזר בשילוב של אדם-רובוט כדי להקטין את מורכבות המערכות השונות ולייעלן. שילוב נכון של אדם-רובוט יכול לבוא לידי ביטוי בזמני ביצוע בעלי תפוקת שדה גבוהה מזו של פעילות כוח אדם אנושי בלבד ובמדדי יעילות גבוהים יותר.

החלפת כוח אדם בלתי מיומן עשויה להיות מיושמת, בתנאים מסוימים, באמצעות זרועות רובוטיות. מערכות נבונות בעלות זרועות רובוטיות עשויות להחליף כוח אדם במיוחד בפעילות שגרית פשוטה הדורשת מאמץ פיזי כגון איסוף מלונים, אבטיחים, דלעת וכד'. ברוב המקרים היבול נאסף באופן בררני על פי קריטריונים שונים כגון גודל, צבע, ריח ודורש מומחיות אדם.

במכון להנדסה חקלאית פותח רובוט לקטיפ מלונים (Edan et al. 2000, Edan & Muies 1994). הרובוט מבוסס על מסגרת נגררת, מערכת חישה לזיהוי המלונים באמצעות ראייה ממוחשבת וזרוע רובוטית אחת בעלת זרוע רב-פרקית החובקת את המלון, מנתקת אותו מהצמח ומניחה על מסוע איסוף. פיתוח הרובוט הסתיים בהצלחה. אולם, השימוש ברובוט מבחינה מעשית אינו אפשרי עקב אחוז זיהוי נמוך של מלונים על ידי המערכת (75-85% שיעור ההצלחה בזיהוי) והזיהוי לא היה סלקטיבי (מלון בשל/לא בשל). בפרויקט הרובוט הושקע כסף רב ופיתוח טכנולוגיה הממתינה לפתרונות זיהוי טובים יותר. לעת עתה אין בנמצא פתרונות לשיפור אחוזי ההצלחה בזיהוי המלונים בעיקר משום שחלק מהפירות מוסתרים ע"י עלווה. שימוש שנעשה במפוחים כדי להרחיק אותה מעל הפירות בעת הצילום ע"י מצלמות וידאו לא נחל הצלחה מלאה. זיהוי בשלות הפרי תוך תנועה, בקצב מהיר ובדיוק מתאים אינו בנמצא למרות שיש עבודות אשר עסקו/עוסקות בפיתוח חיישני ריח (אתילן בעיקר) לזיהוי בשלות פירות כמלון. זיהוי פירות (ובודאי באופן סלקטיבי) בסביבות חקלאיות טבעיות באופן אוטומטי כאמור עדיין בלתי ישים. מעבר לשיעור ההצלחה בזיהוי הפירות, ככל שאמצעי הזיהוי מורכבים יותר, הזמן הנדרש לעיבוד הנתונים והתמונות ארוך יותר. תנאי הסביבה (אור טבעי, אבק, לחות וכו') מקשים על הזיהוי, מחיר הרובוט העתידי עולה והפעלתו דורשת מיומנות מיוחדת בתנאים אלה. עד אשר תפותחנה טכנולוגיות חדשות, מדויקות, פשוטות להפעלה וזולות יחסית - נראה כי מימוש רובוטים עצמאיים לחלוטין לקטיפ גידולי שדה בשטחים פתוחים אינו ריאלי.

מבחינה מרחבית, קטיפ בשדה מלונים מהווה בקירוב טוב מקרה דו-ממדית (להבדיל מקטיפ במטע אשר הוא מקרה תלת-ממדי). על כן, אם ניתן יהיה לנתק הפרי הבשל ולמפות (מיפוי מוקדם ומנותק מהרובוט) את מיקומם של מלונים המוכנים לאיסוף באמצעות המערכת הרובוטית, לא יהיה צורך במערכות חישה מורכבות לזיהוי המלונים ועל כן מורכבותו ומחירו ירדו. תנאי הסביבה יהיו פחות מגבילים עד כדי כך שתתכן ביצוע פעולת האסיף בלילה. קצב האסיף יוכל לגדול בגלל יכולת תכנון הקטיפ האופטימאלי ובגלל היכולת

להרכיב יותר זרועות קטיפ על מסגרת אחת ולשלוט בהן באופן סימולטני. כלי רובוטי כזה יהפוך לכלי אסיף קונבנציונאלי מבחינת תפעולו ומחירו עשוי להתחרות עם מפעיל אנושי.

תכן פלטפורמה רובוטית ובמיוחד זרועות וארכיטקטורת-פעילות הרובוט, מבוסס על דינמיקה של הרובוט. האילוצים הדינמיים עשויים להכתיב את מרכיבי המערכת כגון ממדי הזרועות, מומנטי האינרציה ומאפייני המנועים והבוכנות. את אילוצי הזרועות והפלטפורמה הרובוטית ניתן להכליל במודל דינמי רב-גופים (multi-body dynamics) שבאמצעותו ניתן לבחון ספיקות איסוף התוצרת, ביצועי המערכת, השפעות הדדיות בין הפלטפורמה למערכת הזרועות, השפעת תנאי הסביבה וכן להעריך עלות המכונה. תכנון המתחשב באילוצים השונים בדומה לעבודת המכונה בפועל נקרא "תיכון וירטואלי" (Virtual design), גישת תכן זו יעילה בבחינת טווחי ההישג האופטימאליים של המערכת. השיטה שכיחה בתעשיות יצור מערכים ומכונות חקלאיות. התועלת אשר תצמח מהשגת יעדי המחקר המוצע תהיה בחיסכון בכוח אדם ובביסוס תשתית למחקר בתחום רובוטיקה חקלאית אשר יש לה פוטנציאל לעשות שינויים טכנולוגיים משמעותיים במספר גידולים.

2. מטרות המחקר

המטרה הכללית של המחקר הייתה פיתוח מערכת רובוטית רב זרועית לאסיף גידולים שרועים לשם חיסכון בכוח אדם בחקלאות.

המטרות הספציפיות של המחקר היו :

- 2.1. אפיון הגידול ופלטפורמת האיסוף ;
- 2.2. פיתוח מערכת מיפוי מדויק של פירות לאיסוף ;
- 2.3. בניית יכולת מידול דינאמי לזרועות רובוטיות ;
- 2.4. אפיון רכיבי הזרועה ומנגנון לתפיסת הפרי ללא נזק ;
- 2.5. אפיון מערכת רב-זרועית ותפקודן המתואם ;
- 2.6. פיתוח אלגוריתמים לתכנון אסיף מיטבי למערכת רב זרועית ;
- 2.7. בחינת המניפולאטור האופטימאלי ליישום ;
- 2.8. תכן מערכת של פלטפורמת האיסוף ;
- 2.9. ניסויים בתנאים מיטביים ובשדה.

3. תוצאות

3.1. מאפייני השדה

אם נניח שיבול מלונים לדונם הוא כ 4 טון ומלון לייצוא בשטח פתוח שוקל 1.5-2.5 ק"ג (מלון לשוק מקומי אף יותר) אזי מדובר בסדר גודל של 2000 מלונים לדונם או כ 2 מלונים למ"ר. בדרך כלל מלונים אלה נאספים בשלשה גלים כשבכל איסוף אוספים את המלונים הבשלים. כדי להיערך למצב של הכפלת יבול לדונם (לפחות במספר מלונים אם לא במשקל הכולל) אזי הרובוט אמור להתמודד עם כ 4000 מלונים לדונם (4 למ"ר). בהנחה שבגל המרכזי מתוך שלשת האיסופים אוספים מחצית מהמלונים, אזי הרובוט צריך להתמודד עם עומס מטרות של 2 מלונים למ"ר. בחישובים השונים שנעשו הנחנו עומס אפילו כפול מכך (זאת אומרת פי 4 למעשה מהמצב הקיים היום) כך שבבוא היום לתכנן ולבנות רובוט אמיתי, אפשר יהיה לתכננו הרבה פחות מסובך מאשר מכתובות הנחות אלה.

3.2. תכנון משימות לרובוטיקה רבת זרועות (YZ)

הנחת המוצא של תכנון סדר איסוף המטרות וחלוקתן למשימות לזרועות השונות היא כי יש לאסוף את כל המטרות, בעזרת מינימום של זרועות ומקסימום מהירות. בלהבדיל משנה קודמת בה מודל התנועה הרוחבית של הזרועות היה מהירות קבועה, עודכנה הגישה למצב אמיתי בו כלולות תאוצות ממצב נייח (איסוף מלון) למהירות מרבית ואחריה האטה למצב נייח (פריקת המלון על מסוע והכנה לאיסוף מלון נוסף). בהתאם ליכולת הדינמיות/קינמאטיות של הזרועות מוגדרת מטריצת קישוריות בין מלון למלון לאורך השדה- כלומר היכולת (או אי יכולת) של זרוע להגיע אל המלונים אשר לפנייה ממיקומה הנוכחי תוך כדי תנועה קדימה קבועה של הרובוט. קישוריות זו תלויה במהירות הנסיעה של הטרקטור, בתאוצות המותרות לזרוע ובזמן שלוקח לפרוק מלון על המסוע. נעשו סימולציות רבות על מנת לקבוע את הפרמטרים המיטביים (מספר זרועות, מהירות קדימה, תאוצות צדיות) לאיסוף כל המלונים מהשדה מבא בטבלה 1.

טבלה מס' 1: דוגמאות לשיעורי הצלחה של מספר זרועות (4 6 8) בתנאים קינמטיים שונים

מספר מהירות	תאוצת	זמן טיפול	מס' מלונים	צפיפות	שיעור סטיית זמן		
זרועות נסיעה מ/ש	זרוע מ/ש	במלון, ש		מלון/מ	איסוף	תקן	חישוב
4	0.04	1	3	1024	4	0.9876	0.0033 3269
4	0.04	1	4	1024	4	0.9703	0.0050 418
4	0.04	5	3	1024	4	0.9876	0.0033 3238
4	0.04	5	4	1024	4	0.9703	0.0050 402
4	0.03	1	3	1024	4	0.9961	0.0010 51267
6	0.15	5	3	1024	4	0.9143	0.0065 1217
6	0.15	5	4	1024	4	0.8271	0.0068 67
6	0.10	5	4	1024	4	0.9404	0.0047 6165
8	0.30	1	3	1024	4	0.8116	0.0072 1229

3.2.1. אלגוריתם לתכנון סדר איסוף המלונים

בהתאם למטריצת הקישוריות בין המלונים בשדה, נבדקות האפשרויות של כל הזרועות להגיע ממלון למלון (לפי סדר ההתקדמות לאורך השדה). את כל האפשרויות של התקדמות זרוע בודדת מפתחים מתחילת השדה ועד לסופו ומתקבלים סידורי עבודה רבים אפשריים לזרוע בודדת כלשהי. בהינתן מספר זרועות K כלשהו, יש לבחור מכל האפשרויות את השילוב של K סידורי עבודה לזרוע בודדת אשר יחד מניב את מירב היבול. ואולם בחירת השילוב של K סידורי עבודה על-ידי השוואת כל האפשרויות היא משימה קומבינטורית אשר לא ניתנת לחישוב בזמן סביר באמצעי המחשוב הקיימים כיום. לכן נדרש ניתוח של אלגוריתמים ייעודיים למשימה. בתנאים קינמאטיים מסוימים המתאימים לקצבים סבירים של אסיף מלונים, ולאחר ביצוע התמרות מסוימות, מצאנו כי ניתן לאמץ "אלגוריתם חמדן" (a greedy algorithm) המשמש לחישוב אופן צביעה של "גרף אינטרוואלים" על-יד מספר צבעים נתון כדי לתכנן את סדר האיסוף ע"י מספר זרועות נתון. באופן זה מתקבל איסוף אופטימאלי לאותם תנאים (נספח מאמר שכתבנו בנושא). תחת תנאים קינמאטיים אחרים (למשל, אם בעתיד אפשר יהיה להפעיל את הזרועות הרבה יותר מהר) נדרשו אלגוריתמים משלימים אשר פותחו בגישה יוריסטית.

כדי לצמצם את מספר סידורי העבודה הגדול המתפתח עם ההתקדמות בשדה ובכך להקטין את זמן החישוב, מופעל מנגנון סינון המשווה את מיקום הזרועות בכל אחד מסידורי העבודה המוצעים. אם המיקומים של הזרועות זהים עד כדי החלפה (כלומר הם מסוגלים לאסוף את אותם מלונים אך בסדר שונה ביניהם) הרי שמבחינת המשך האינסופיים אין לכך כל משמעות ואפשר להשמיט את סידורי העבודה הנחותים מבחינת מספר המלונים שאסף עד לאותה נקודה. בכך מצטמצם מאד מספר סידורי העבודה באופן משמעותי ומקטין משמעותית את זמן החישוב.

ואולם, כאשר מפעילים את הרובוט בתנאים קינמטיים המאפשרים איסוף הרבה מלונים, נוצרים סידורי עבודה רבים מאד וזמן החישוב של הקצאת משימות האיסוף ארוך מאד.

אשר על כן ומתוך מה שנלמד בשנה הקודמת של הפיתוח לגבי השפעת נקודות המיקום ההתחלתי של הזרועות על אחוזי האיסוף בהמשך הדרך (השפעה שולית רק בקרבת נקודות ההתחלה והתכנסות לאחוזי איסוף זהים בתוך מספר קטן של מלונים), הופעל מנגנון סינון נוסף לסידורי העבודה. בכל נקודת חישוב, ממוינים סידורי העבודה לפי "איכותם" – מספר המלונים שאספו. כל הסידורים מאיכות ירודה מהסידורים האיכותיים ביותר (אלה שאספו מספר מרבי של מלונים עד לאותה נקודה), מושמטים מהמשך החישוב. מצאנו שברוב רובם של המקרים הסינון הזה אינו פוגע באחוזי האיסוף של הסידורים המיטביים שמתקבלים בסוף השדה. זמן החישוב של אלגוריתם זה מצומצם יותר אך עדיין ארוך מדי (עלול להגיע לשעות). לכן ננקטת שיטה הסתברותית: כאשר מספר סידורי העבודה מקבוצת האיכות הראשונה גדל למספרים גדולים, נעשית בחירה אקראית של M סידורים מתוך כולם, ורק איתם נמשך החישוב. בשיטה זו עלולה להיות פגיעה קלה באחוזי האיסוף (מלון בודד מתוך אלף מלונים, או פחות מכך במוצא) אך זמן החישוב קצר ביותר.

שני האלגוריתמים השוו כדי לאמת את תוצאותיו של האלגוריתם המיועד לתנאים קינמטיים מהירים עם האלגוריתם הידוע כמחשב תוצאות אופטימאליות ונמצא כי תפקודו ותוצאותיו קרובות מאד לאופטימאליות (נספח מאמר כשתבנו בנושא).

לדוגמה: כדי להגיע לאיסוף מעל 99% מהמלונים אפשר לעבוד עם רובוט בן 4 זרועות במהירות של 0.025 מ/ש או רובוט בן 6 זרועות במהירות כפולה או רובוט בן 8 זרועות במהירות 0.10 מ/ש (טבלה 2). בשדה בן 1024 מלונים בצפיפות 4 מלונים/מ"ר, כאשר מגבילים את מטריצת סידורי עבודה ל 100 סידורים לכל היותר, זמן החישוב של סידור העבודה לאיסוף כל השדה קטן מ-15 דקות.

אלגוריתמים אלה מאפשרים מהירויות חישוב סידור העבודה האופטימאלי למספר זרועות בעבודה תחת כל סט של מספר זרועות, תנאים קינמטיים וצפיפויות מלונים וכן, את אחוזי האיסוף המתקבלים. באמצעות חישובים אלה ניתן לעשות אופטימיזציה אשר תכלול עלויות המרכיבים השונים (זרוע רובוטית, זמן עבודה וכו') כדי לקבל רובוט אופטימאלי לתנאים כלשהם).

טבלה מס' 2: דוגמאות לשיעורי איסוף גבוהים של רובוט עם 4, 6 או 8 זרועות בתנאים קינמטיים שונים כאשר האלגוריתם מגביל את מספר סידורי העבודה ולכן מצליח לחשב מהר את סדר האיסוף של שדה שלם
מספר זרועות מהירות מ/ש תאוצה מ/ש² זמן טיפול, ש' מס' מלונים צפיפות מלון/מ² שיעור איסוף זמן חישוב ש'.

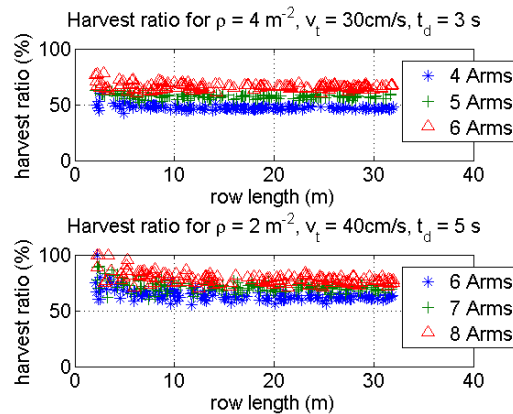
4	0.025	5	4	1024	4	0.9932	160
6	0.050	5	4	1024	4	0.9961	618
8	0.100	5	4	1024	4	0.9912	815

פירוט יתר מובא במאמר :

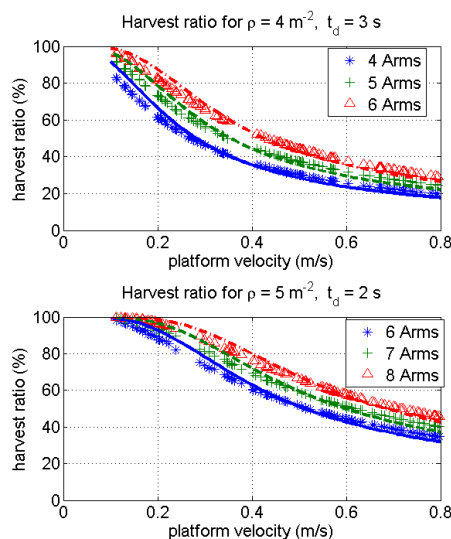
Boaz Zion, M.P. Mann, D. Levin, A. Shilo, D. Rubinstein, I. Shmulevich. Harvest-order planning for a multi-arm robotic harvester. Submitted to *Computers and Electronics in Agriculture*. Accepted for publication 2014.

3.2.2. אלגוריתם לתכנון סדר איסוף המלונים בעקרון קומבנטורי

הפירות המיועדים לאיסוף חייבים להיות מוקצים לכל מונפולטור (זרוע) מקסימום כך שיתקבל איסוף מרבי. בעבודה הנוכחית הוצע פתרון מקורי שניתן לפתור הבעיה כדוגמא לפתרון מקסימלי MKCSP הנהוג בשיטת צביעה של גרפים באמצעות K צבעים. (Maximum k -colorable sub graph problem). במאמר המצורף מפורט הפיתוח המראה כי עבור רוב הפרמטרים של הרובוט הבעיה עשויה להיות מיוצגת ע"י סוג מיוחד של גרף המכונה גרף מרווח עליו MKCSP יכול להיות מיוצג בזמן קצר (Polynomial time). באיור 1 רואים כי כאשר הופעל האלגוריתם- שיעור האיסוף לאורך השורה כמעט שאינו משתנה. לכן הופעל החישוב על מהירויות שונות (איור 2) לתרום בחינת שיפור האיסוף ע"י הוספת זרועות במהירות נסיעה קווית וצפיפות הגידול מסוימים.



איור 1 : אחוז האיסוף של רובוט רב זרועי כתלות באורך השורה עבור מספר זרועות, מהירות קווית וצפיפות הגידול .



איור 2 : אחוז האיסוף עבור רובוט רב זרועי עבור מצבים שונים של צפיפות המילונים ומהירות הרובוט.

פירוט יתר מובא במאמר :

M.P. Mann, Boaz Zion, I. Shmulevich, D. Rubinstein, R. Linker. Multi-Manipulator Robotic Fruit Harvesting – Combinatorial Optimization and Performance Analysis. *The Israeli Conference on Robotics*, 2013.

M.P. Mann, Boaz Zion, I. Shmulevich, D. Rubinstein, R. Linker. Multi-Manipulator Robotic Fruit Harvesting – Combinatorial Optimization and Performance Analysis. Submitted to IEEE Transactions on Robotics and Automation, In final preparation.

3.3 בניית מודל אופטימיזציה לחישוב פעולת רובוט קרטזי-XYZ

המחקר המהווה חלק מפעילותו של הדוקטורנט מר משה מן, התמקד בטכניון, באופטימיזציה של איסוף רובוטי עבור מלונים ממבט מערכתית, כך שיביא, לתשואה מכסימלית בעלויות מינימאליות. השלב הראשון של מטרה זו מושגת על ידי אלגוריתם יעיל לתכנון תנועה אופטימאלית של המוניפולטור הקרטזי-XYZ שנוג מנותקים ממלון למלון תוך חניית ביניים לפריקת המלון שנאסף. מטרת האלגוריתם לאסוף את המספר המרבי של המלונים. בהינתן: אילוצי מיקום, מהירויות, תאוצה, ואילוצי נקודות הקצה. נבנה מודל סימולציה בשפת Matlab להדגים את תוצאת החישוב.

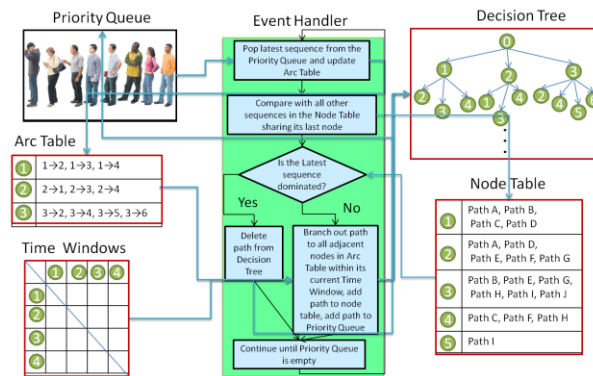
המחקר התמקד ב :

3.3.1 שיפור אופטימיזציה האיסוף הרובוטי של קונפיגורציה XYZ.

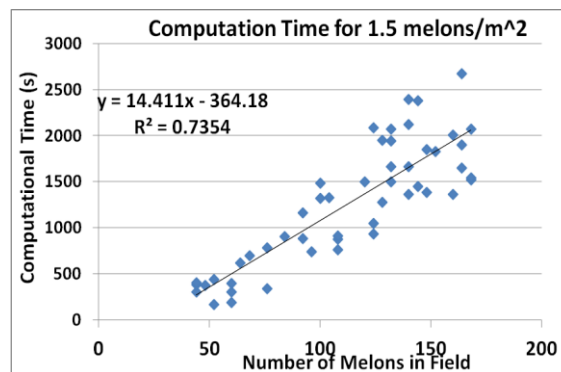
נבנתה שיטת בחירת מסלול באמצעות אלגוריתם מבוסס על תכנות דינאמי. לאלגוריתם שפותח אין מגבלה למספר המילונים עליהם מבוצעת האופטימיזציה. נושא שהווה מגבלה בולטת באלגוריתם שפותח בשנה א' של המחקר. ביצועי המחשוב שופרו ללא הכר כתוצאה מבחירת אופטימיזציה בתכנות דינאמי. האלגוריתם נמצא כטוב ביותר בהשוואה לשורת אלגוריתמים אחרים כגון: "שכן הקרוב ביותר" "אשכולות – Clustering" אלגוריתמים יוריסטים שונים ואלגוריתמי קירוב. אלגוריתם **Moving Branch and Prune** כאמור, השיג יעילות איסוף מכסימאלית (אבסולוטית) ביחס לשיטות שהוזכרו.

האלגוריתם שפותח (איור 3) מבוסס על עץ החלטות ומשווה כל מסלול עם מסלולים אלטרנטיביים שמסתיימים באותו פרי. ההחלטה לבחירת המסלול נעשתה משיקולים של זמן מינימאלי, תפוקה (מספר הפירות שנאספו) ותת-קבוצת הפירות הנגישים לאיסוף. יתרונו של האלגוריתם בכך שמאפשר ביצוע אופטימאלי גם אם לא כל מיקום המלונים ידוע מראש אלא רק מספר קטן יחסית של מלונים שבקרבת הרובוט. יתרון זה עשוי לאפשר איסוף אופטימאלי גם כשאר מערכת החישה נמצאת על הרובוט וממפה מלונים תוך כדי התקדמות.

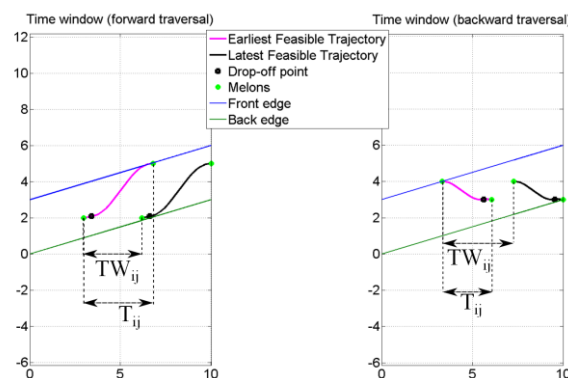
האלגוריתם נוסה על מספר רב של פירות. בצפיפות גדולה של מילונים זמן החישוב גדל באופן ליניארי (איור 4). תוצאה זו שונה מתוצאות אלגוריתם אחרים שהגידול בכמויות הפרי מעלה באופן דרמטי את החישוב. כמו כן פותחה שיטת חישוב המתחשבת במסגרת הפלטפורמה לחישוב טווחי זמן האיסוף האפשרי של המילונים. החישוב תלוי במהירות הנסיעה ומהירות ותאוצות זרועות הרובוט. באיור 5 ניתן לראות את זמן המעבר בין מלון למלון T_{ij} וחלון הזמן T_{wij} בו המעבר יכול להתחיל.



איור 3: סכמה של האלגוריתם "סעף וגזם" לאיסוף מירבי של מלונים.

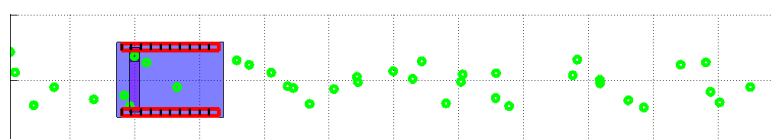


איור 4: זמן החישוב עבור מספר הולך וגודל של מילונים בצפיפות קבועה של 1.5 מילונים למטר מרובע.

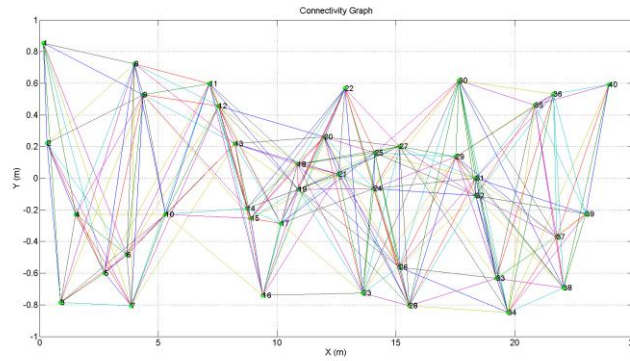


איור 5 זמני מעבר בין מלון למלון וחלונות זמן בהן המעבר הוא פיזיבילי.

דוגמא אופיינית של סימולציית האיסוף מודגם במבט על של הרובוט והשדה (ראה איור 6). גרף קישוריות לתכנון מסלול האיסוף על כל האפשרויות מובא באיור 7.

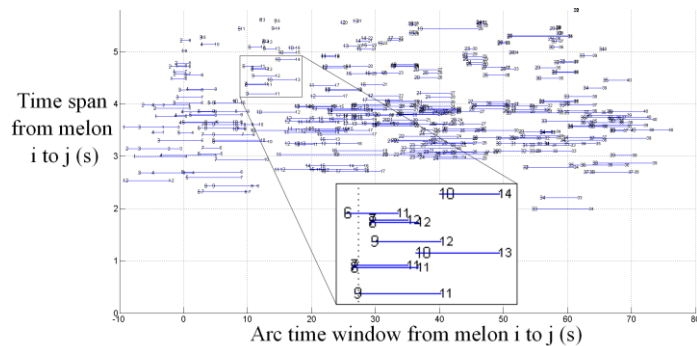


איור 6 : מבט מעל של הרובוט והשדה מלונים

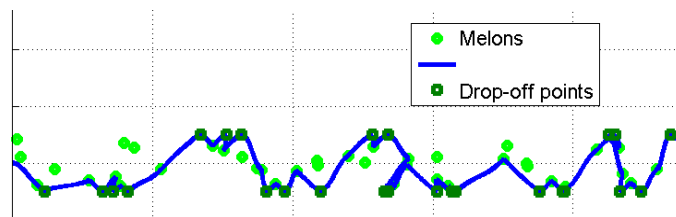


איור 7 : גרף קישוריות של המלונים. לכל זוג מלונים שמחוברים עם קו, יש אפשרות לזרוע הרובוטי לעבור בין אחד לשני באיזשהו חלון זמן.

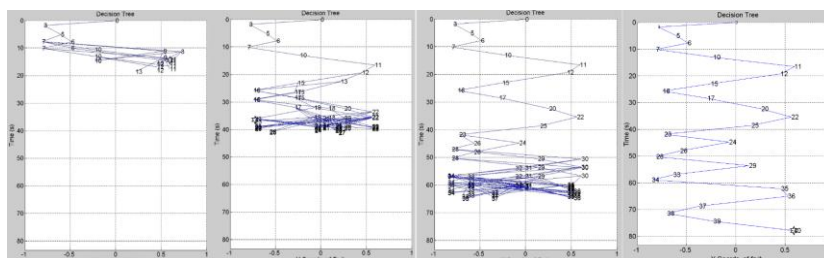
באיור 8 מודגמים חלונות הזמן לאיסוף כל המילונים ובאיור 9 תוצאות איסוף באמצעות סימולציה. ערכי המהירות והתאוצה מובאים באיור 10.



איור 8 : זמני מעבר (ציר האנכי) בין מלון הראשון לשני על הקו וחלון הזמן (ציר האופקי) בה המעבר יכול להיבצע.



איור 9 : מסלול הזרוע הרובוטי בשדה (קו מלא). המילונים מופעים בירוק והמלונים שנאספו (בירוק כהה).



איור 10 : עץ ההחלטות בשלבים שונים מהתחלת החיפוש (שמאל) עד סוף החיפוש (ימין).

העמודה הימנית מהווה מסלול אופטימאלי. יש לשים לב שבכל שלב, קיים מסלול אופטימלי חלקי מנקודת ההתחלה ("ס" מלמעלה) עד לאיזשהו מילון (למרות שהחיפוש עדיין לא הסתיים).

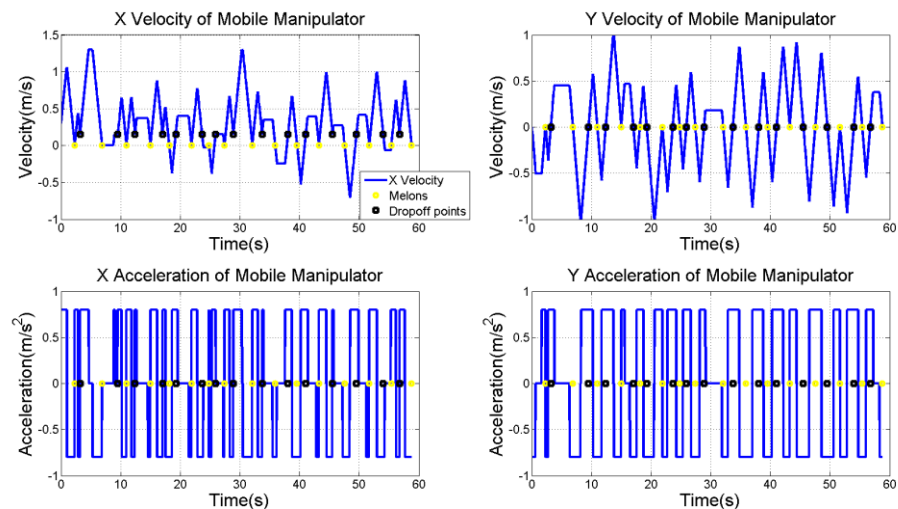
דוגמה לתוצאות המהירות והתאוצות למקרה מסוים מובא באיור 11.

בבחינת אחוזי איסוף כתלות במהירות הנסיעה של הפלטפורמה הושגו התוצאות הבאות:

At 30 cm/s: 26 out of 40 melons;

At 20 cm/s: 42 out of 48 melons;

At 18 cm/s: 90 out of 98 melons.



איור 11: תוצאות הסימולציה: מהירויות (למעלה) ותאוצות (למטה) של חוליה ה-X (משמאל) וה-Y (מימין) בהתאמה.

פירוט יתר מובא במאמרים:

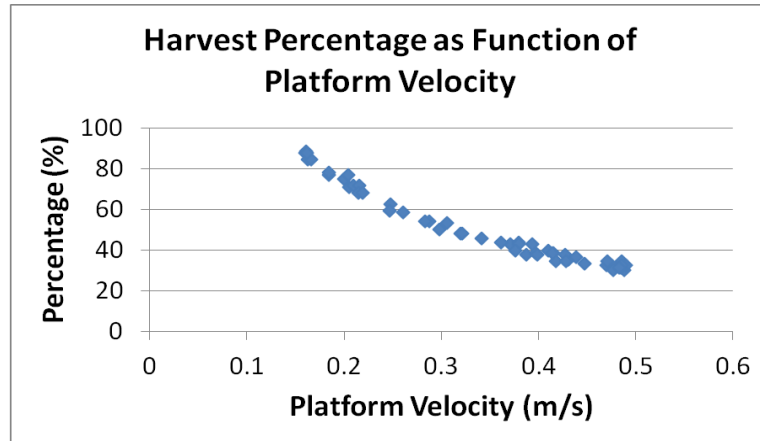
M.P. Mann, I. Shmulevich, D. Rubinstein, R. Linker, B. Zion, Motion planning of a mobile conveying Cartesian manipulator for maximum melon harvesting, *ASABE Journal*, Accepted for publication 2014.

M.P. Mann, I. Shmulevich, D. Rubinstein, R. Linker, Boaz Zion, Minimum Time Pick and Place Motions for Cartesian Mobile Manipulators of a Melon Harvesting Robot, *Accepted for publication in ASME Journal of Systems Dynamics and Control*. Accepted for publication 2014.

3.3.2. שיפור אופטימיזציה האיסוף הרובוטי של קונפיגורציה XYZ באמצעות שיטה סטוכסטית

נבנתה שיטה לחיזוי אחוז האיסוף של הרובוט עבור פרמטרי רובוט והתפלגות מלוניים נתונים. הנושא דומה לזה שנעשה על רובוט בעל מספר זרועות. סימולציות רבות שבוצעו הצביעו על כך שהאחוז של מלוניים שנאספו לצפיפות מלוניים נתונה, תצורת רובוט, מהירות פלטפורמה נתונה, הוא כמעט קבוע למרות האקראיות של מיקומי המלוניים. לכן, פיתחנו מודל סטוכסטי של תהליך האיסוף הרובוטי לחיזוי יעילות של האיסוף. הפיתוח העמיד כלי מהיר להערכת יעילות עבור תצורות שונות של רובוט לטווח רחב של התפלגויות מילוניים ובמיוחד עבור מהירויות התקדמות הפלטפורמה. שלב זה הגיע לסיום הפיתוח ונקבלה משוואה סגורה לאחוז האיסוף

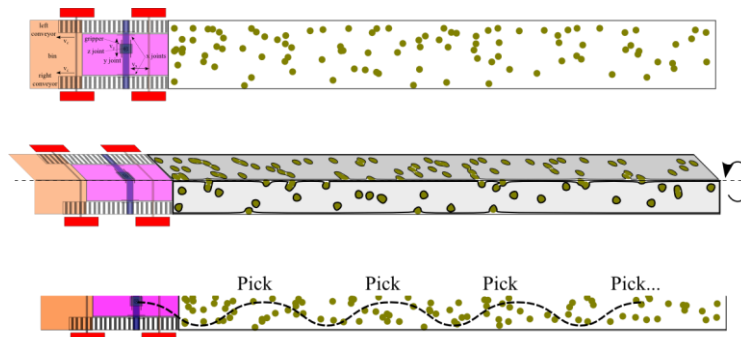
כתלות בפרמטרים שהוזכרו לעיל ללא צורך בסימולציות. פיתוח זה יכול לשמש ככלי חיוני לתכנון רובוט אופטימאלי לאיסוף מלונים. באיור 12 מובאות תוצאות של השפעת מהירות הנסיעה על אחוז האיסוף. התוצאות מתייחסות לצפיפות מלונים של 1.5 מילון למטר מרובע. בדוגמה נאספו 96 מלונים.



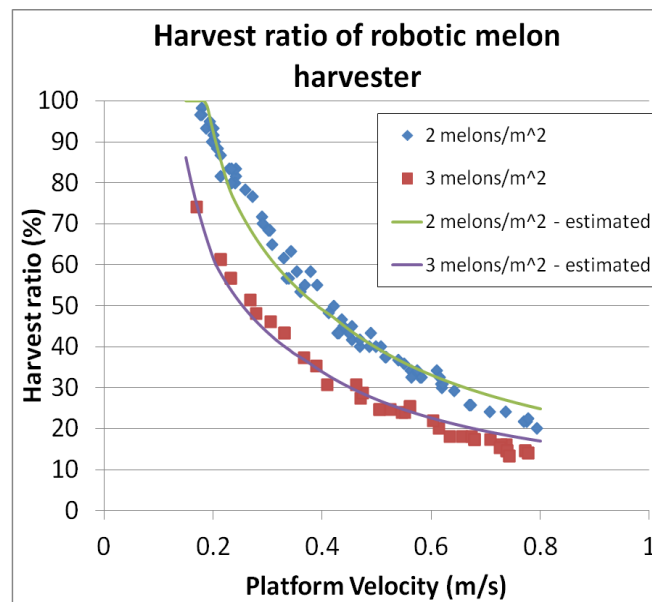
איור 12 : תוצאת חישוב אחוז האיסוף כתלות במהירות ההתקדמות.

3.3.3. שיפור אופטימיזציה האיסוף הרבובטי של קונפיגורציה XYZ באמצעות שיטה סטטיסטית.

נבנה מתכנן תנועה של זרוע רובוטית עבור פיזור אקראי של מלונים שתוצאתו אחוז איסוף כמעט זהים. תוצאה זו נתקבלה על פני טווח רחב של ממדי רובוט ויכולות דינמיות, כגון : מהירות קווית וצפיפות המילונים. בעבודה המוצגת נעשה שימוש בשיטות הסתברותיות. אם רואים את דוגמאות תהליך האיסוף כתהליך סטוכסטי ניתן לתארו ע"י מודל פשוט (איור 13) בו יחס האיסוף ניתן לחזות בצורה אנליטית באמצעות פירוס גיאומטרי פואסוני. מודל זה דומה למודל שרשרת מרקוב וניתן לנסח באמצעותו נוסחה החוזה את אחוז האיסוף. נמצא שאחוז זה מתאים למספר רב של סימולציות (ראה איור 14). חשיבות הגישה מוצגת בשני יישומים : ניתן לבחור לרובוט פרמטרים אופטימאליים לביצוע העבודה, וכן ניתן לקבוע את מהירות התקדמות הרובוט הדרושה לשדה בעל צפיפות יבול משתנה. כך ניתן להשוות בין רובוטים שונים כפי שמודגם במאמר.



איור 13 : הדגמת המודל הפשוט שנוצר ע"י כיפול התפלגות המילונים לאורך השדה פועלת זרועה אחת וצפיפות המילונים כפולה.



איור 14: הדגמת השיטה. הנקודות מתוצאות סימולציה והקווים מחיזוי באמצעות השיטה שפותחה.

למידע מפורט יותר יש לפנות למאמר:

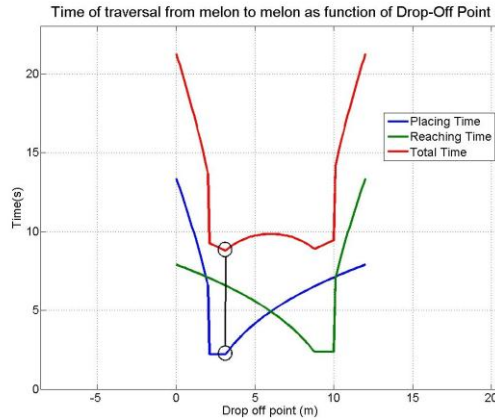
M.P. Mann, Boaz Zion, I. Shmulevich, D. Rubinstein. Determination of Robotic Melon Harvesting Efficiency: A Probabilistic Approach. Submitted to Operational Research. In final preparation.

4. מיפוי מלונים ומיקום הרובוט בשדה

מערכת המיפוי שנבחרה היא מטיפוס RTK-GPS אשר מדייקת ברמות של ס"מ בודד. כדי לייעל את השימוש במערכת המיפוי היא תשמש למיפוי המלונים בשדה וגם למיפוי מיקומו המדויק של הרובוט בשדה. נבחרה מערכת בעלת יכולת למדידת כיוון (Heading) ולא רק מיקום. בשלב ראשון נרכוש שירותי תחנות בסיס של ספקי שירותים לתיקון שגיאות מדידה של מערכות GPS (מפ"י או חברות פרטיות בעלות תחנות בסיס) ובהמשך תישקל אפשרות לרכוש תחנת בסיס ולייתר את התלות בספקים. במקביל לבניית אבטיפוס של הרובוט לזרוע אחת, אנו נערכים לעריכת מכרז למערכות GPS מהסוג הנ"ל ובהמשך נרכוש מערכת ונחברה לרובוט.

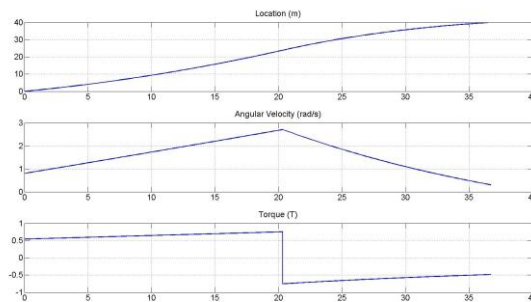
5. תכנון הרובוט

במהלך הפרויקט נבנה תחילה דגם מוקטן של הרובוט במטרה לבחון את אלגוריתמי הניווט והבקרה. הדגמים המוקטנים הציגו רובוט XYZ ורובוט רב זרועות YZ. במקביל תוכנן ונבנה דגם בקנה מידה מלא. האלגוריתמים שפותחו העריכו את אפקט המהירות המסות וגודלי המפעילים הדרושים. באיור 15 מובא תוצאת הזמן הדרוש לאיסוף בין מילון למילון (תצוגה א') תוך התחשבות במקום הנחת המילון על המסוע (קו כחול) ובין המסוע למילון החדש (קו ירוק). הקו האדום הינו סיכום הזמן הדרוש. הערה: דוגמת החישוב במקרה זה באה להדגים אפקט המהירות ולכן נלקח מרחק גדול בין המילונים.



איור 15: השפעות האינרציה, מסות ואופיין מנוע על התנועה בין מילון למילון.

באיור 16 מבואת תוצאת חישוב המיקום, המהירות והמומנט הדרוש בתהליך הנחת הפרי כאשר ניתן אופיין מנוע של זרוע הרובוטית המניעה את תפסנית הפרי ע"י רצועה משוננת.



איור 16 תוצאת חישוב המיקום, המהירות והמומנט הדרוש בתהליך הנחת הפרי.

5.1 תכן אב טיפוס מוקטן.

לצורך ביצוע ניסויי אימות הוחלט בסוף שנה א' על בניה של שני דגמי אבטיפוס של המערכות, גם עבור תצורת XYZ וגם עבור תצורת YZ. דגמי אבטיפוס מיועדים להדגים את פעולת המערכת בתנאי חדר ולאסוף כדורי ספוג המדמים את המלונים. לשם כך בנינו שתי פלטפורמות ניידות על גלגלים במידות של 80 ס"מ רוחב ו-180 ס"מ אורך. בכל פלטפורמה מסגרת אשר בתוכה נעות זרועות ליניאריות לצורך איסוף הפרי, כאשר על כל זרוע ישנה בוכנה פניאומטית עם פטמת ואקום המרימה את הפרי ומעבירה אותו אל מסוע איסוף. נרכש בקר למערכת והוכנה תוכנת הפעלתו. לבקר יכולת שליטה על מספר זרועות בו זמנית והמשלב גם יכולת הפעלת הפניאומטיקה של המערכת וקריאת חיישני המיקום. הזרועות הן זרועות חשמליות מופעלות ע"י מתח 24V ומקבלות הזנה מספקי מתח של 10A הנמצאים על לוח הבקרה של הדגם.

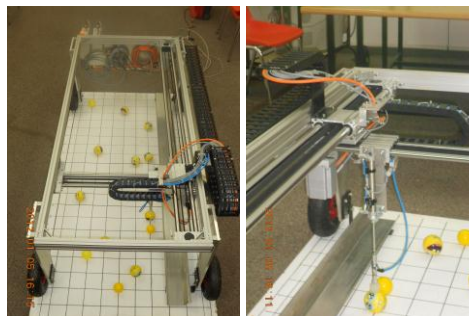
5.1.1 תכן אב טיפוס מסוג XYZ

בתצורה זו קיימות שתי זרועות, אחת בכיוון X בעלת מהלך של 1500 מ"מ ועליה הורכבה זרוע בכיוון Y בעלת מהלך של 580 מ"מ. שתי הזרועות בעלות המאפיינים הבאים (איור 17):

- יכולת תנועה במהירות של עד 800 מ"מ לשנייה;

- אפשרות קביעת מספר פרופילי תנועה עם מהירויות תאוצות ותאוצות שונות;
- שליטה בבוכנות והפעלת הזרועות באמצעות בקר החברה CPX-CEC- C1 ;
- דיוק מיקום ברמה של 1 מ"מ ומטה;
- סגירת חוג בקרה על המיקום או המהירות ע"י אנקודר.

על גבי הזרוע הנעה בכיוון Y הורכבה בוכנה פניאומטית בעלת פיטמת ואקום בקצה ומחולל ואקום הממוקם על גבי הזרוע. הבוכנות בפניאומטיות מצוידות בצמצמי אויר המאפשרים שליטה על מהירות ירידה אל המלון ומהירות עליה שונה עם המלון, דבר המונע זעזוע של הפרי ונפילתו בעת התנועה. לצורך פעולתם הבוכנה והמחולל מקבלים הזנת לחץ אויר ממדחס נייד. למערכת הפניאומאטיקה פיקוד חשמלי 24V המגיע ממחשב הבקרה (CPX-CEC- C1).



איור 17. תצורת XYZ א' בוכנה פניאומאטית (ימין), מבט מלמעלה (שמאל).

עקרי המערכת נבנו בסוף שנה א' של הפרויקט ושופרו בשנה ב' ע"י הכנסת בקר CPX-CEC- C1. תוכנה ייחודית נכתבה לבקר ונוסתה בשנה ג' של המחקר.

5.1.2 תכן אב טיפוס מסוג YZ

דגם שני נבנה על מנת לבצע ניסויים בעבודה במקביל עם שתי זרועות. לצורך בנייתו השתמשנו בפלטפורמה ניידת במידות 80 ס"מ רוחב ו-180 ס"מ אורך. כאן מודגמות שתי זרועות העובדות במקביל אשר איסוף הפירת מתחלק בין שתיהן (איור 18). מחשב הבקרה (CPX-CEC- C1) בשילוב עם רשת הבקרה (CAN-Open) יחלק את משימת האיסוף בין שתי הזרועות שתעבודנה באופן עצמאי תוך הקצאת מטרות מראש לכל זרוע.



איור 18. תצורת YZ, שתי זרועות עובדה במקביל, מבט כללי.

בשתי התצורות המתוארות לעיל אופן הפעולה יתבצע כדלקמן: מיקום המערכת במרחב בנקודת התחלה ובאוריינטציה מתאימה ביחס לפיזור הפרי בשטח. טעינת טבלת הקואורדינטות של פיזור הפרי והמתנה לפקודת תנועה. קידום הפלטפורמה יעשה בשלב ראשון ע"י גורם חיצוני שמאלץ את המערכת לנוע במהירות קבועה לאורך מסלול האיסוף. בשלב מאוחר יותר תתאפשר הוספת מנועי סרוו על גלגלי הפלטפורמה, ומהירות ההתקדמות תקבע

ע"י מחשב הבקרה ותוכל להוות פרמטר נוסף. נעשה שימוש ברשת בקרה המאפשרת לנוע בפרופילי תנועה שונים ומקנה יכולת לשלב תנועה מהירה אל המטרה לאיסוף הפרי ותנועה זהירה עם הפרי אל כיוון המסוע תוך התחשבות בעומסים המותרים על הפרי ומניעת הפגיעה בו.

5.1.3 תכן בקרת תנועת רובוט XYZ

בשנה השנייה נבנה הבקר לדגם XYZ ונערכו ניסויים לביצועיו בשנה ג' של המחקר.
פירוט נמצא במאמר ב"תלם" ובכנס :

M. Karagoden, A. Weinstock, M. Mann, A. Bechar, S. Katzman, V. Chernishev, G. Lidor, R. Finkelshtein, I. Shmulevich. PLC Control System for Automatic Melons Collection The Israeli Conference on Robotics, 2013.

5.1.4 ניסויי רובוט XYZ בתנאי מעבדה

מכשירי הניסוי כללו את החלקים הבאים (איור 19): מערכת זרוע רובוטית אלקטרו-מכאני, מערכת בקרת PLC לאיסוף מלונים אוטומטי, חיישן מרחק לייזר (DT50 SICK) לתיקון הקואורדינטות הגלובליות עם טווח מדידה של 200 - 10,000 מ"מ, רזולוציה 1.0 מ"מ, קצב תפוקה: 2 ms, פלט אנלוגי: 4-20 mA, עם אור לייזר אדום נראה לעין ליישור מהיר ומדויק; גלגלת למשיכת הפלטפורמה במהירות מבוקרת; מסילות מתכת - כדי לספק תנועה ישרה קדימה, מרזבי החלקה - להעביר את המוצר כדורי הגומי - המייצג את המלונים. נקודות מיקום הכדורים (הפירות) ניתן למחשב ומנקודת זמן זאת נגשת הזרוע למעל הכדור בוכנת אויר עם פיה בקצה מושכת בוואקום את הכדור לפיה ומובילה את הכדור למגלש הצמוד לזרוע האופקית. המגלש מוציא את הכדורים הפירות לאזור האיסוף.



איור 19 : מצבים שונים בתהליך האיסוף האוטונומי.

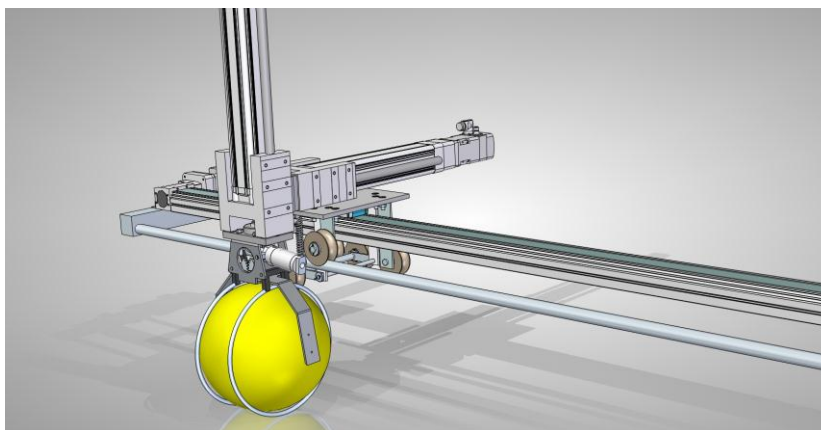
כאשר הזרוע מגיעה למיקום המדויק של המילון, היא צריכה לנוע אחורה כדי להישאר בדיוק מעל המלון למשך זמן המספיק לזרוע לרדת ולאסוף את המלון באמצעות תפסן הוואקום. עם האיסוף המילון מועבר למשטח

החלקה ומשוחרר. ניסוי מצב הדינמי כלל 20 ניסויים, עם 3 - 7 כדורים שנאספו בכל ניסוי במשטח 4000x500 מ"מ, מהירות זרוע רובוטית הייתה 800 מ"מ / שנייה, האצת זרוע רובוטית של 2.50 m/sec, ומהירות גלגלת לקביעת מהירות קווית של הפלטפורמה 5.1 ס"מ / שנייה. המסלולים האופטימאליים שמשו לניווט הרובוט. תוצאות הניסויים מראות יתרון ברור לאלגוריתם שפותחו ביחס לקריטריון השכן הקרוב (NN) אך לא באופן משמעותי. ניתן ליחס זאת לרוחב הצר של הפלטפורמה ולקצבי נסיעה איטיים.

5.2 תכן ובניית מכונת שדה

5.2.1 תכן הרובוט מסוג YZ בעל זרוע אחת

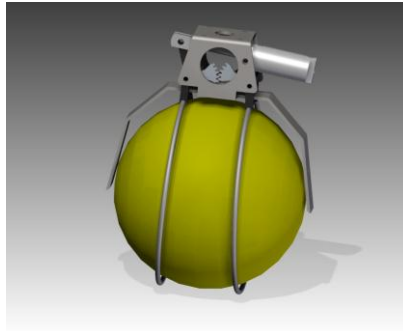
תיאור עקרוני של מבנה הרובוט הוצג בדו"ח מסכם של שנת 2011. בשנה הנוכחית תוכנן הרובוט ברמת תכנון הפרט ולאחר הליך מכרז נרכשו (ינואר 2013) רכיבי הנעה לזרוע אחת. אבטיפוס של זרוע אחת נבנה. בגישה החדשה של הרובוט הוא מורכב ממסגרת מלבנית הנגררת קדימה (ע"י טרקטור בתנועה קבועה או עצמאית ובמהירות משתנה בעתיד. זרועות הרובוט קבועות למסגרת ויכולות לנוע רק בכיוון ניצב לתנועת הרובוט (לרוחב הערוגה מעליה נגרר הרובוט). בעת התנועה קדימה של הרובוט, הזרועות יכולות לנוע ימינה או שמאלה (בתנועת סריקה) ולהגיע אל המטרות אותן הן מתוכננות לאסוף (איור 20). התנועה הצדית (רוחבית) של הזרוע מבוססת על הנעה לינארית חשמלית, באמצעות מנוע סרוו המפעיל רצועת תזמון המחוברת לעגלה קטנה נירוסטה המונעת למקום הרצוי. אל העגלה מחוברת הטפסנית באמצעות בוכנה חשמלית המיועדת להרים ולהוריד את הזרוע על-פי צורך, כדי להגיע אל מלון, לאסוף אותו ולהרימו לגובה המסוע הרחב. לאחר הרמת המלון, נדחפת הזרוע אל מעל המסוע ומשחררת את המלון מעליו. זמן המחזור המחושב מרגע תפיסת המלון ועד לרגע בו הזרוע מוכנה לתפיסת מלון נוסף הוא כ 3-4 שניות.



איור 20. מבנה זרוע רובוטית ומערכות ההנעה בשלשה צירים.

5.2.2 תכן טפסנית הפרי

תכן הטפסנית אשר פותחה במכון להנדסה חקלאית לפני שנים רבות שונה מעט כדי לעשותה קלה יותר, בעיקר לאור העובדה שבתחילת הדרך היא אינה אמורה לחתוך את המלון מהצמח אלא רק לאסוף אותו (איור 21). אשר על כן היא תכלול בוכנת אוויר אחת בלבד, ובסיס קל יותר כדי להפחית את המסה הכללית שלה.

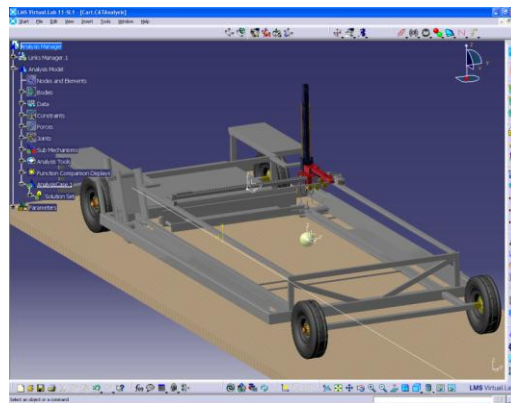


איור 21. מבנה הטפסנית לאיסוף מלונים

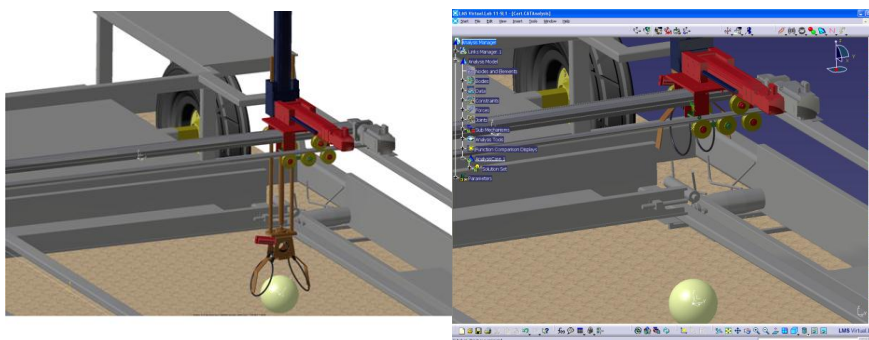
5.2.3 תכנן באמצעות Multi-body-Dynamic

במהלך תכנון אב הטיפוס של הרובוט, נבנה באמצעות תוכנה לסימולציה דינמית By LMS באמצעות Virtual Lab של מכונות שדה. איור 22. מראה את מודל הסימולציה שנבנה. איור 23 מביא פרטי קרבה של זרוע הרובוט בכיוון רוחבי, מעלה ומטה. ומנגנון תפיסת המילון.

פיתוח שלב הסימולציה חשוב לתכנון הבקרה ותוכנית עבודת הרובוט באופן עצמאי.



איור 22: מראה כללי של אנליזת Multi-Body Dynamic של מכונה לאיסוף מלונים בשדה באמצעות Virtual Lab.



איור 23: מראה מנגנון התפיסה במכונה לאיסוף מלונים בשדה באמצעות Virtual Lab.

סימולציות הראו ששטייה רוחבית של עד 5 ס"מ עדיין מאפשרת איסוף המילון.

החלק שיש להשלים בפרויקט הינו פיתוח בקרה למכונה שתגדיר את ספי הפעילות. באופן אופטימאלי וליישמו במכונה הנבנית.

יעדי התוכנית הושגו. נוספו משימות שלא הוצהרו בהצעת המחקר כהשלמת בניית 2 אבי טיפוס מעבדתיים כולל מערכת בקרה עבורם בחינה ואימות האלגוריתמים לתכנון מסלול. בוצעה העמקה בנושאי אופטימיזציה של מבנה הרובוט ואופטימיזציה של יעילות חישוב האיסוף תוך פתרונות לאיסוף מספר גדול של פירות במספר אלגוריתם ובאופן מיטבי. בוצע ניתוח דינמי של המניפולאטורים: XYZ תוך הכנסת אופייני המנוע ואינרציות של אביזרי המניפולאטור. תרומתו המרכזית של המחקר הנוכחי בפיתוח אמצעי חישוב יעילים לניווט אוטונומי של רובוט בעל מספר זרועות רב רובוט קרטיזי XYZ כתלות בממדי הרובוט מהירות נסיעתו וצפיפות הגידול. תרומתו המדעית של המחקר עשויה להיות חיונית להמשך פיתוח רובוטיקה שדה ובמערכות מיון תוצרת חקלאית בבתי אריזה ובכך להגברת החיסכון בידיים עובדות.

רשימת ספרות

Edan Y. & Miles G.E., " Systems Engineering of Agricultural Robot Design", **IEEE Transactions On Systems, Man., And Cybernetics**, Vol. 24, No. 8, August (1994).

Edan Y., Rogozin D., Flash T. & Miles G.E., "Robotic Melon Harvesting", **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, Vol. 16, No. 6, December (2000).

Mann, M.P., Boaz Zion, I. Shmulevich, D. Rubinstein, R. Linker. "Multi-Manipulator Robotic Fruit Harvesting – Combinatorial Optimization and Performance Analysis". **The Israeli Conference on Robotics**, 2013.

Mann, M.P., Boaz Zion, I. Shmulevich, D. Rubinstein, R. Linker. Multi-Manipulator Robotic Fruit Harvesting – Combinatorial Optimization and Performance Analysis. Submitted to IEEE Transactions on Robotics and Automation, **In final preparation**.

Mann, M.P., I. Shmulevich, D. Rubinstein, R. Linker, B. Zion, "Motion planning of a mobile conveying Cartesian manipulator for maximum melon harvesting", **ASABE Journal**, Accepted for publication 2014.

Mann, M.P., I. Shmulevich, D. Rubinstein, R. Linker, Boaz Zion, "Minimum Time Pick and Place Motions for Cartesian Mobile Manipulators of a Melon Harvesting Robot", Accepted for publication in **ASME Journal of Systems Dynamics and Control**. Accepted for publication 2014.

Mann, M.P., Boaz Zion, I. Shmulevich, D. Rubinstein. "Determination of Robotic Melon Harvesting Efficiency: A Probabilistic Approach". Submitted to **Operational Research**.

Karagoden, M., A. Weinstock, M. Mann, A. Bechar, S. Katzman, V. Chernishev, G. Lidor, R. Finkelshtein, I. Shmulevich. "PLC Control System for Automatic Melons Collection" **The Israeli Conference on Robotics**, 2013.

Sakai S., Iida M., Osuka K. & Umeda M., "Design and control of a heavy material handling manipulator for agricultural robots", **Auton Robot**, 25: 189–204, 2008.

Zion, B., M.P. Mann, D. Levin, A. Shilo, D. Rubinstein, I. Shmulevich. "Harvest-order planning for a multi-arm robotic harvester". Submitted to **Computers and Electronics in Agriculture**. Accepted for publication 2014.

סיכום עם שאלות מנחות

נא להתייחס לכל השאלות בקצרה ולעניין, ב-3 עד 4 שורות לכל שאלה (לא תובא בחשבון חריגה מגבולות המסגרת המודפסת).

שיתוף הפעולה שלך יסייע לתהליך ההערכה של תוצאות המחקר.

הערה: נא לציין הפנייה לדו"ח אם נכללו בו נקודות נוספות לאלה שבסיכום.

מטרות המחקר תוך התייחסות לתוכנית העבודה.
בניית רובוט לאיסוף מלונים בשדה באופן אופטימאלי מבחינת עלות הרובוט ויעילות העבודה. על המחקר לבחון בדרכים כמותיות חלופות של קונפיגורציות שונות עבור הרובוט, לתכנן ולבנות אב טיפוס למערכת רובוטית בשדה. החלק העיקרי הראשון במחקר הוגדר: העמדת מודלים סימולטיביים המכמת באופן אופטימאלי את יעילות ועלות הפתרון.
עיקרי התוצאות.
בניית מודל לתכנון תנועה עבור 2 תצוגות של מערכות רובוטיות לאיסוף מלונים, בחירת קונפיגורציות הערכת בכלים כמותיים, שיפור בניית 2 אבי טיפוס לבחינת מודלים סימולטיביים לחלופות המערכות. בתנאי מעבדה תוך הכנסת מערכת בקרה, בניית מודל אופטימאלי דינמי מתקדם ללא הגבלות למספר הפירות. צומצמו נפחי החישוב של תכנון המסלול. המודל לוקח בחשבון אפקטים שונים כלכליים, גיאומטריים, מהירויות הטרקטור בקונפיגורציית המכונה.
מסקנות מדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר לתקופת הדו"ח?
בפרויקט הושגו הישגים ברורים בפיתוח המודלים הסימולטיביים המבוססים על אופטימיזציה הפתרון. כלי המחקר שפותחו בשנה השנייה והשלישית הביאו לבחירה מקצועית טובה באוסף החלופות בבניית מערכת איסוף רובוטית למלונים. אולם, לא כל מטרות היישומיות של המחקר מולאו. לא הסתיימה בניית אב הטיפוס בעיקר בגלל קשיים במימוש הבקר שכן נבחן על גבי אב טיפוס מוקטן.
בעיות שונות לפתרון ואו שינויים (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים) שחלו במהלך העבודה; התייחסות המשך המחקר יש מקום ליישום והדגמת הפתרון בקנה מידה מלא בתנאי שדה תוך פיתוח בקרת הכלי בהתאם לפתרון המסלול האופטימאלי. הנחיות לתכנון מסלול אופטימאלי לרובוט רב זרועות ולרובוט קרטזי נחקרו ואומתו באמצעות אב-טיפוס.
הפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח: פרסומים בכתב - ציטט ביבליוגרפי כמקובל בפרסום מאמר מדעי;
הנושא הוצג בכנס האגודה הישראלית להנדסה חקלאית בפני חקלאים וחוקרים, בכנס סטודנטים לתוארם גבוהים בנושא בקרה באוניברסיטת תל-אביב ובטכניון. כמו-כן הוגשו 2 מאמרים בכנס הבינלאומי החקלאי CIGR שיתקיים בוולנסיה שבספרד בחודש יולי 2012 וכנס האגודה האמריקאית להנדסה חקלאית - ASABE בדאלאס בחודש אוגוסט 2012.
פרסום הדו"ח: אני ממליץ לפרסם את הדו"ח: (סמן אחת מהאופציות)
☒ ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט) ☐
☒ חסוי – לא לפרסום: יש לצרף אישור ומידע ממוסד המחקר ☐
האם בכוונתך להגיש תוכנית המשך בתום תקופת המחקר הנוכחי? כן* - -
זאת שנתו השלישית של המחקר יש מקום לבנות ולהדגים בקנה מידה מלא את המכונה. לחוקר הראשי אין כוונה להגיש תוכנית המשך, להשלמת המחקר יש צורך בתוכנית המשך בתום תקופת המחקר שעשוי להיות מוגש ע"י שותפי המחקר ממכון להנדסה חקלאית.

*יש לענות על שאלה זו רק בדו"ח שנה ראשונה במחקר שאושר לשנתיים, או בדו"ח שנה שניה במחקר שאושר לשלוש שנים