	תקופת המחקר: 1999-2001	קוד מחקר: 463-0183-01
Subject: DETERMINATION OF OPTIMAL OPERATING PARAMETERS OF PLANTERS BY MACHINE VISION		שם המחקר: קביעת תנאי הפעלה מיטביים של מכונות זריעה בעזרת ראייה ממוחשבת
Principal investigator: VICTOR ALCHANATI		חוקר ראשי: ויקטור אלחנטי
Cooperative investigator:		חוקרים שותפים:
Institute:		מוסד:

תקציר

מטרת המחקר: לפתח מערכת אמינה ומהירה לקביעה של תנאי ההפעלה המיטביים של מכונות זריעה. דבר זה יביא לעליה בפרודוקציה היבול בשדה הנזרע במכונות זריעה וחיסכון במספר הזרעים. תנאי ההפעלה המיטביים נקבעים על סמך מאפיינים סטטיסטיים של פיזור הזרעים.

מהלך המחקר והתוצאות: פותחה מערכת אופטית אשר מאפשרת מדידה של מאפייני פיזור הזרעים. נבנתה מערכת של ראייה ממוחשבת המתאימה לצילום של זרעים בגדלים שונים תוך כדי יציאתם ממכונת הזריעה. כמו כן, פותחה מערכת אופטית ייחודית אשר מאפשרת לאפיין את הפיזור המרחבי של הזרעים, כלומר לאורך השורה וגם בניצב לשורה. תוכנן ונבנה מתקן ייעודי לאחיות מצלמה ותאורת רקע מתאימה בגובה פולח המזרע. צלליות הזרעים הנופלים, נרשמו על יד מצלמת קו והועברו למחשב. נבדקו מספר מקורות אור לתאורת הרקע (הלוגו, LED, וניאון) ולבסוף נקבע שמקור האור של ניאון הפועל בתדר גבוה הוא המתאים ביותר. פותחו אלגוריתמים של עיבוד תמונה לזיהוי זרעים מגדלים שונים ופותר מודל מתמטי לחישוב מיקום הזרעים על סמך עקבותיהם בתמונה הדיגיטלית. נערכו ניסויים השוואתיים בין המערכת האופטית לבין המערכת הידנית עבור סוגי זרעים שונים כגון חמניות, כותנה ותירס ונמצאה התאמה מלאה בקביעת מיקום הזרעים על ידי שתי השיטות. מערכת זו נבדקה גם עם זרעים קטנים של ירקות כדוגמת שמיר. לבסוף, פותח מודל סטטיסטי לקביעת הפרמטרים הסטטיסטיים של פיזור הזרעים הן בצורת דווח בטבלה והן בצורה גרפית במהלך הבדיקה. התקן הבינלאומי של ISO לאפיון מזרעות שולב לתוך המערכת והפרמטרים הסטטיסטיים מחושבים לפיו. פותחה תוכנה ייעודית להפעלה של המצלמה, עיבוד התמונה וניתוח הנתונים. התוכנה שפותחה כוללת ממשק להפעלת המערכת ותצוגה של תוצאות הבדיקה בצורה גרפית. בעזרת המערכת שפותחה, ניתן לקבוע בצורה מהירה את התנאים המיטביים להפעלת מכונת הזריעה על סמך סימולציה של זריעה עם מספר גדול של זרעים.

דו"ח לתכנית מחקר מספר 463-0183-01

קביעת תנאי הפעלה מיטביים של מכונות זריעה בעזרת ראייה ממוחשבת**Determination of optimal operating parameters of planters by machine vision**

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות

ע"י

ויקטור אלחנטי המכון להנדסה חקלאית - מינהל המחקר החקלאי
 יוסי קשתי המכון להנדסה חקלאית - מינהל המחקר החקלאי
 יצחק ניר אגף מיכון - שה"ם
 בריקמו רומן המכון להנדסה חקלאית - מינהל המחקר החקלאי

Victor Alchanatis, Institute of Agricultural Engineering, ARO, POBox 6, Bet Dagan 50250. E-mail:

victor@volcani.agri.gov.il

Yosi Kashti, Institute of Agricultural Engineering, ARO, POBox 6, Bet Dagan 50250. E-mail:

ykashti@volcani.agri.gov.il

Itshak Nir, The Agricultural Extension Service, POB 28, Bet Dagan 50250

Roman Brikman, Institute of Agricultural Engineering, ARO, POBox 6, Bet Dagan 50250.

אוגוסט 2002


אב תשס"ב

מחק את המיותר

כ"ל/לא-

האם הנך מאשר את ציון הפסקה הבאה בדף הפתיחה לדו"ח

הממצאים בדו"ח זה הנם תוצאות ניסויים ואינם מהווים המלצות לחקלאים

 חתימת החוקר *

תקציר

המטרה הכללית של המחקר הינה לפתח מערכת אמינה ומחירה לקביעה של תנאי ההפעלה המיטביים של מכונות זריעה. דבר זה יביא לעליה בפוטנציאל היבול בשדה הנזרע במכונות זריעה וחסכון במספר הזרעים. תנאי ההפעלה המיטביים נקבעים על סמך מאפיינים סטטיסטיים של פיזור הזרעים. במהלך המחקר פותחה מערכת אוטומטית אשר מאפשרת מדידה של מאפייני פיזור הזרעים. נבנתה מערכת של ראייה ממוחשבת המתאימה לצילום של זרעים בגדלים שונים תוך כדי יציאתם ממכונת הזריעה. כמו כן, פותחה מערכת אוטומטית ייחודית אשר מאפשרת לאפיין את הפיזור המרחבי של הזרעים, כלומר לאורך השורה וגם בניצב לשורה. תוכנן ונבנה מתקן ייעודי לאחיזת מצלמה ותאורת רקע מתאימה בגובה פולח המזרע. צלליות הזרעים הנופלים, נרשמו על יד מצלמת קו

והועברו למחשב. נבדקו מספר מקורות אור לתאורת הרקע (חלון, LED, וניאון) ולבסוף נקבע שמקור האור של ניאון הפועל בתדר גבוה הוא המתאים ביותר. פותחו אלגוריתמים של עיבוד תמונה לזיהוי זרעים מגדלים שונים ופותח מודל מתמטי לחישוב מיקום הזרעים על סמך עקבותיהם בתמונה הדיגיטלית. נערכו ניסויים השוואתיים בין המערכת האופטית לבין המערכת הידנית עבור סוגי זרעים שונים כגון חמניות, כותנה ותירס ונמצאה התאמה מלאה בקביעת מיקום הזרעים על ידי שתי השיטות. מערכת זו נבדקה גם עם זרעים קטנים של ירקות כדוגמת שמיר. לבסוף, פותח מודל סטטיסטי לקביעת הפרמטרים הסטטיסטיים של פיזור הזרעים הן בצורת דווח בטבלה והן בצורה גרפית במהלך הבדיקה. התקן הבינלאומי של ISO לאפיון מזרעות שולב לתוך המערכת והפרמטרים הסטטיסטיים מחושבים לפיו. פותחה תוכנה ייעודית להפעלה של המצלמה, עיבוד התמונה וניווט הנתונים. התוכנה שפותחה כוללת ממשק להפעלת המערכת ותצוגה של תוצאות הבדיקה בצורה גרפית. בעזרת המערכת שפותחה, ניתן לקבוע בצורה מהירה את התנאים המיטביים להפעלת מכונת הזריעה על סמך סימולציה של זריעה עם מספר גדול של זרעים.

רשימת פרסומים

פרסום בעתונות בין לאומית מבוקרת:

Alchanatis, V. , Kashti, Y. and Brikman, R. (2002). A machine vision system for evaluation of planter seed spatial distribution. Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development. Manuscript IT 01 005. Vol. IV. April, 2002.

הצגה ופרסום ב- Proceedings של כנס בין לאומי

Alchanatis, V. and Kashti, Y. (2000). A machine vision system for evaluation of planter seed spatial distribution. The XIV Memorial CIGR World Congress 2000, November 28 – December 1, 2000, Tsukuba, Japan.

פורסם בעיתון בעברית:

פיתוח מתקן לבדיקת מכונות זריעה בעזרת ראייה ממוחשבת, 2000. מיכון והנדסה בחקלאות, יוני 2000, עמ' 28-26.

הצגת המערכת בתערוכות וימים פתוחים:

תערוכות משוב 2000, מרץ 2000, מרכז הירידים, תל אביב

יום פתוח של המכון להנדסה חקלאית, אוקטובר 2001, מרכז וולקני

מבוא ותיאור הבעיה

לחתפלגות הזרעים בשדה השפעה על התפתחות הצמח הבודד, על כמות היבול ואיכותו. בשנים האחרונות חלה התפתחות טכנולוגית בתחום מכונות הזריעה. לאחרונה פותחו מנגנוני זריעה מדויקים גם לזריעה של זרעים קטנים. המנגנונים פועלים על עיקרון פניאומאטי המבוסס על דסקת כימות מחוררת ותת לחץ. מנגנונים אלה מטפלים בזרעים ברמת הזרע הבודד. על מנת לקבוע את התנאים המיטביים להפעלת מכונות הזריעה (תת לחץ, מהירות סיבוב וכיו) יש צורך לאפיין ולבדוק את פעולת המכונה בתנאים שונים.

בדיקת מכונת זריעה כוללת בדיקה במעבדה ובשדה. במעבדה, מכונת הזריעה הנבדקת מותקנת על מסגרת ריתום ומופעלת בתנאי הפעלה שונים, כגון: מהירויות התקדמות, סוגים של צלחות כימות, מספר רמות של תת לחץ וכיו.

כמו כן, תנאי ההפעלה נבדקים עם מספר סוגים שונים של זרעים. בעזרת בדיקות אלו ניתן לקבוע את התנאים המיטביים לזריעת סוג זרע מסוים וניתן לאתר תקלות במנגנוני הכימות. תנאי ההפעלה המיטביים שנמצאו במעבדה נבחנים בשדה

בדיקות המזרעות מתבצעות היום באופן ידני או חצי אוטומטי. זהו תהליך ארוך ומייגע, ולכן מספר הבדיקות ומשך כל בדיקה קצרים. כתוצאה מכך, תנאי ההפעלה המומלצים של המזרעות, מבוססים על מידע חלקי (בלי לבדוק את כל האפשרויות והפעלות קצרות). על מנת לאפיין את ביצועי המזרעות בצורה מעמיקה יותר, ולקבוע את תנאי ההפעלה המיטביים, יש צורך בפיתוח מערכת מהירה, קלה ואמינה למדידת וניתוח פיזור הזרעים ממזרעות.

רקע

קביעת תנאי ההפעלה של מכונות הזריעה נעשית היום על ידי פיזור הזרעים על מסוע נע, ומדידה ידנית או חצי אוטומטית של מיקום הזרעים על המסוע בצורה נייחת, לאחר הפסקת פעולתו. מסוע זה מדמה את התנועה של מכונת הזריעה על פני הקרקע (ניר וקשתי 1996, Kelly and Palmer 1996). לצורך ביצוע המדידה יש צורך בהפסקת פעולת המערכת, ומדידת מיקום הזרעים על המסוע. שיטה זו מכתיבה אורך מקסימאלי לבדיקת הפיזור כאורך המסוע (היום כ-6 מ' לערך). בנוסף לכך, הפעלה נוספת של המערכת מחייבת ניקוי הזרעים המודבקים על שכבת הגריז של המסוע, שהוא תהליך ארוך ומייגע, בעיקר עבור זרעים קטנים שמימדיהם אינם יותר מ-1.5-3 מ"מ לעיתים קרובות (פטרוזיליה, שמיר, גור). לשיטה זו חסרונות בולטים. מספר החזרות שניתן לבצע בבדיקות קטן בגלל עבודת הידיים הרבה הנדרשת להפעלת המערכת (בעיקר להכנת המערכת להפעלה ולניקוי לאחר המדידה). לפיכך, פעולתה של כל מכונת זריעה נבדקת לאורך מטרים ספורים (20-10 מטר). מתוך מרחק קטן זה קובעים פרמטרים להפעלה אשר ישמשו לזריעת שטחים רבים. מערכת המדידה הזו אינה מתאימה לזרעים קטנים בגלל רמת הדיוק של המדידות (דיוק של ± 2 מ"מ בערך, המושפע במידה רבה על ידי המפעיל). יתר על כן, אין היום מערכת מדידה הנותנת מידע על פיזור הזרעים לרוחב השורה. פיזור הזרעים לרוחב השורה חשוב עבור זרעים קטנים.

לאחרונה יש נטייה בעולם להחליף את מערכת המסוע עם מערכת חישה אופטית הממוקמת בגובה המסוע של היום, ומודדת את מיקומם ותזמונם של הזרעים העוברים דרכה. המידע הנאסף שקול למדידת מיקום הזרעים על גבי המסוע. מספר קבוצות של חוקרים ניסו לפתור בעיה זו. גישת כל קבוצות החוקרים הייתה בניה של מערכת הכוללת מקורות אור המשולבים עם חיישני אור, היוצרים מסך של קרני אור. קרני האור נשברות על ידי הזרעים העוברים דרכו. מיקום ותזמון שבירת קרני האור נותנים מידע על מיקום הזרע שעבר. המשמעות המעשית של גישה זו היא ניסיון לבנות מצלמה פשוטה על כל מרכיביה: חיישנים, מעגלי קריאת האותות, מעגלי תזמון וכו' (Muller et al. 1994, Kocher et al. 1996, 1998, Lan et al. 1999). לדעתנו הטכנולוגיה של מצלמות וידאו מאד מפותחת ואין צורך בבניה של כל המערכת מחדש אלא, יש מקום בהגדרת הדרישות ומציאת הרכיב המתאים מוכן על המדף. יתר על כן, מערכות אופטיות אלה מוגבלות בזיהוי של זרעים גדולים מ-3 מ"מ, ולכן לא ניתן להשתמש בהן עבור זרעים קטנים.

מטרת המחקר

מטרת המחקר הינה לפתח מערך בדיקה מתקדם אשר בעזרתו יקבעו הפרמטרים המיטביים להפעלת מכונות זריעה פניאומטיות מדויקות. המטרות הספציפיות היו:

1. הגדרה של פרמטרים כמותיים לאיפיון פיזור זרעים ממכונת זריעה, הן בכיוון הנסיעה והן בניצב לו.

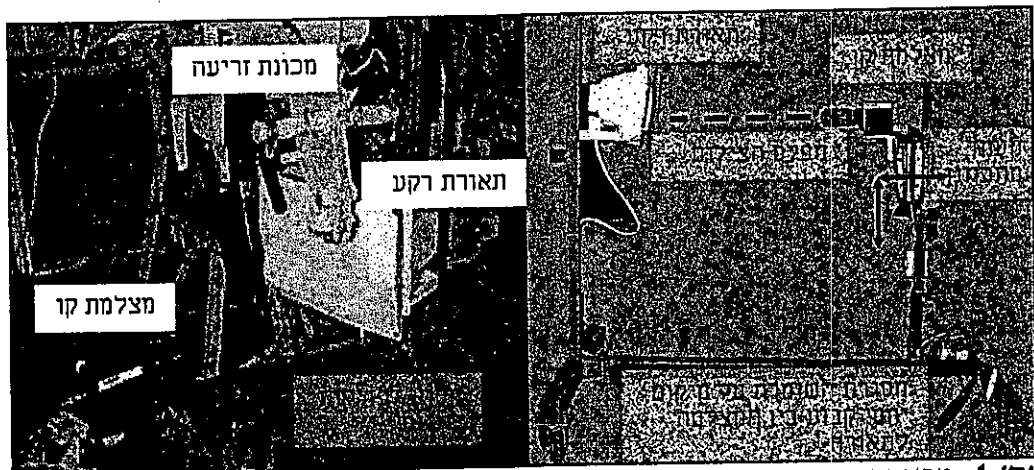
2. פיתוח מערכת אופטית בשילוב עם חמרה של לכידת ועיבוד תמונה לחישה של זרעים בזמן אמת, תוך כדי נפילתם ממכונת הזריעה. פיתוח מערך לצילום זרם הזרעים משני כיוונים כאשר הוא יוצא ממכונת הזריעה.
3. פיתוח ויישום אלגוריתמים של ראייה ממוחשבת למדידת מיקום הזרעים במישור הזריעה.
4. קביעה של האפיון הסטטיסטי של פיזור הזרעים על פי תקן ISO בין לאומי, ושילוב הקביעה במערכת on-line.
5. פיתוח שיטות לקביעת הפרמטרים המיטביים להפעלת מכונת הזריעה, על סמך מתקן הבדיקה שיבנה.

מערכת ראייה ממוחשבת, אלגוריתמים ותוצאות

פיתוח מערכת לצילום מביון אחד

במהלך המחקר פותחה מערכת עיבוד תמונה יעודית למטרה זו. המערכת כללה:

1. מצלמת קו (LineScan) אנלוגית (Dalsa CL256) בעלת 256 פיקסלים. המצלמה מסוגלת לצלם 36,000 שורות בשניה ולהעביר את המידע למחשב.
2. כרטיס עיבוד תמונה בסיסי (Mutech-MV1000) עם תוספת של כרטיס לקליטת תמונות ממצלמה דיגיטלית ומצלמת קו (Mutech-MV1100).
3. מחשב אישי ותכנה יעודית שנכתבה לקליטת ועיבוד התמונה.
4. מתקן ייעודי לאחזקת המצלמה ותאורת רקע מתאימה בגובה הרצוי.



ציור מס' 1: מראה את המערכת נבנתה. מסגרת קשיחה מחברת בין מעמד המצלמה לבין מעמד תאורת הרקע. מעמד המצלמה ניתן כיוון בכיוון האופקי (להתקרב או להתרחק ממקור האור) וגם בכיוון האנכי.

שדה הראייה של המצלמה נקבע ל-12 ס"מ, וכוון על ידי שינוי באורך המוקד של העדשה. במצב זה, הרזולוציה המרחבית של התמונות (לאורך השורה) היתה 0.46 מ"מ לפיקסל. אוסף של 512 שורות קובצו ביחד ליצירת תמונה אחת. הרזולוציה של התמונה בכיוון שני נקבעת על ידי שני גורמים: 1. קצב הסריקה של המצלמה ו-2. מהירות תנועת הזרעים מול המצלמה.

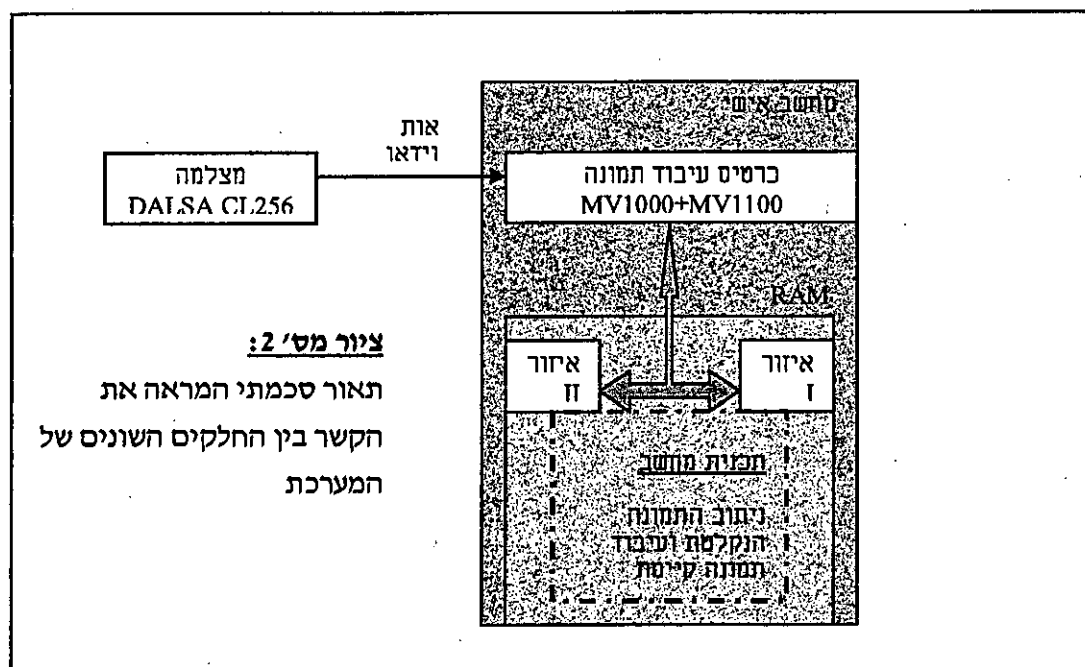
במקביל למערכת האופטית, הופעלה מערכת חצי-אוטומטית עם מסוע גרזי להשוואה וכויל.

אלגוריתמים

בניגוד לרוב מערכות ראייה הממוחשבת שבזמן פיתוח האלגוריתמים ניתן לשמור תמונות וליצור בסיס נתונים של תמונות טיפוסיות, במערכת זו הקצב הגבוה של זרימת הזרעים לא מאפשר זאת. יתר על כן, מכיוון שלא ניתן

לשמור תמונות בצורה רציפה, יש צורך בביצוע זיהוי הזרעים, וקביעת מיקם בתמונה, תוך כדי הצילום. לכן, כל האלגוריתמים פותחו עבור המערכת שפעלה on-line ובזמן אמת. האלגוריתמים שפותחו מתחלקים לשלוש קבוצות:

1. הפעלה של המצלמה ובקרה של קליטת התמונה. צילום התמונות התבצע בזמן אמת עם העיבוד. לכן, אופן הסנכרון של קליטת התמונה עם ביצוע הזיהוי הוא חשוב וקריטי. חוסר סנכרון בין שני התהליכים יכול לגרום לאיבוד של מידע בתמונות שלא עובדו בזמן. הושקע מאמץ רב בכתיבת פרוטוקול תקשורת בין המצלמה וכרטיס עיבוד התמונה לבין אלגוריתמי העיבוד וזיהוי הזרעים. פרוטוקול התקשורת התבסס על פסיקות בחמרה. הוגדרו שני אזורי זיכרון במחשב האישי אשר נועדו לאחסון של תמונה אחת בכל אזור. בכל רגע, אחד האזורים שימש לקליטת התמונה החדשה והאזור השני שימש לעיבוד של התמונה הקודמת. ניתוב הייעוד של כל אזור נעשה על ידי התכנית ששלטה על התהליך. בסוף כל תמונה, המצלמה אותתה לתכנית על ידי פסקת חמרה, והתכנית ניתבה את התמונה לאלגוריתם העיבוד תוך הקצאת האזור השני לקליטת התמונה הבאה. פרוטוקול זה מאפשר עיבוד מקבילי. עקרון הפעולה של עיבוד מקבילי זה מחייב איפה, שפעולת העיבוד והזיהוי תהיה מהירה יותר מפעולת הצילום. קצב הדגימה של המצלמה כוון כך שתנאי זה מתקיים. קצב העיבוד תלוי בעוצמת החישוב של המחשב עליו רצה תכנית הזיהוי. בניסויים שנערכו, נעשה שימוש במחשב פנטיום II, 350 MHz בעל 128Mb זכרון RAM, וקצב הסריקה נקבע ל-13,000 שורות לשניה. ציור מס' 2 מראה באופן סכמתי את הקשר בין החלקים השונים של המערכת.



2. עיבוד התמונה וזיהוי הזרעים

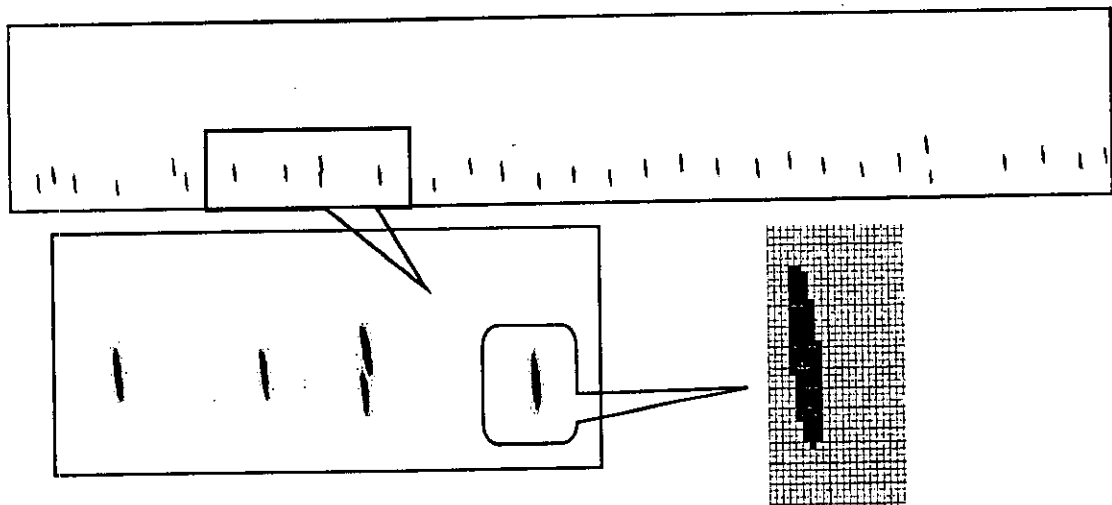
תאורת רקע גורמת לכך שהרקע של התמונה הוא נהיר מאד והזרעים נראים ככתמים כהים. לכן, קל להפריד בין רקע לזרעים על ידי ערך סף קבוע. ביצוע ה-threshold נעשה בזמן אמת על ידי שימוש ב-LookUPTables של כרטיס עיבוד התמונה. הטבלה הוכנה מראש והוטענה אל הכרטיס בתחילת ההפעלה. זיהוי הזרעים וקביעת מיקומו בתוך התמונה נעשה על ידי אלגוריתם של Connected Components אשר הותאם ומומש עבור הזרעים. עיקרון האלגוריתם הוא חיפוש של אוסף נקודות אשר מחוברות ביחד, והגדרה

של גופים בהתאם. מכיוון שבמקרה של מצלמת קו אין לתמונה התחלה וסוף טבעיים (החלוקה לתמונה כל 512 שורות היא שרירותית מבחינת מיקום הזרעים בתמונה), אלגוריתם החיפוש הותאם לחיפוש לפי שורות במעבר יחיד. כל שורה מטפלת לחוד. ראשית, נקבע האם קיימות בשורה נקודות ששייכות לזרע. במידה ונמצאו נקודות כאלה, הן מקובצות בקטעים רציפים, ומסומנים התחלותיהם וסופם. לאחר מכן, מתבצע חיפוש למציאת להתאמת הקטעים שהוגדרו, כהמשך של הגופים הקיימים. במידה ונמצאו כאלה, מימדי הגופים מעודכנים על מנת לכלול את הקטע החדש השייך להם. במידה ולא נמצאו גופים קיימים מתאימים, נוצר גוף חדש.

התהליך הנ"ל מתבצע באופן רציף מרגע תחילת הדגימה, עד שהמפעיל עוצר אותה.

3. חישוב הקואורדינטות של הזרעים בתמונה. אלגוריתם הזיהוי מחשב את הקואורדינטות של כל זרע בתמונה ושומר אותם בקובץ רישום. הקואורדינטה בתוך השורה מייצגת את התזוזה של הזרע יחסית לתחילת השורה, כאשר הקואורדינטה השניה מייצגת את הזמן. כאשר קצב סריקת השורות ידוע, ניתן לחשב את הזמן המדויק שהזרע חצה את מישור הצילום.

ציור מס' 3 מראה דוגמה של תמונה בינארית של זרעי חמניות.



ציור מס' 3: דוגמה של תמונה בינארית של זרעי חמניות.

הנתונים של מיקום הזרע בתוך השורה וזמן הופעתו שימשו כקלט במודל לחיזוי מיקום הזרעים על הקרקע או על מסוע דימוני הנע מתחת למכונת הזריעה. לפי המודל שפותח, מיקום הזרע נתון על ידי:

$$X = -\frac{(X_1 + X_2)}{2} * X_{res} + \frac{(Y_1 + Y_2)}{2} * LineRate * Speed$$

כאשר

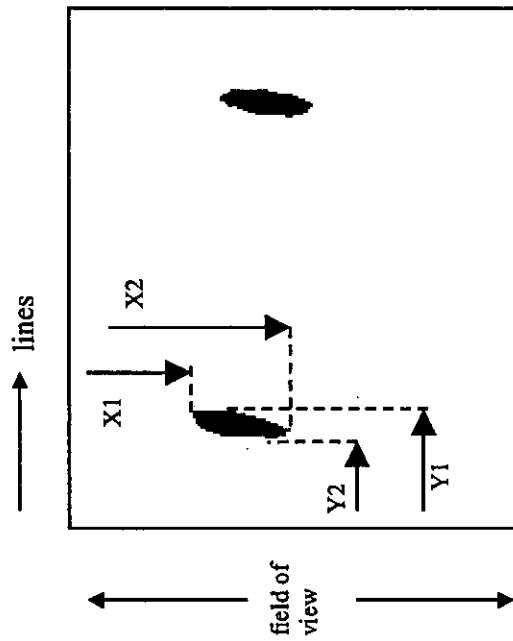
X – המיקום המחושב של הזרע

X1, X2 – מיקום הנקודה הראשונה והאחרונה של הזרע בתוך השורה

Xres – הרזולוציה של הצילום

Y1, Y2 – מספר השורה של החלק העליון והחלק התחתון של הזרע

LineRate – מספר השורות שהמצלמה דוגמת בשניה
 Speed – המהירות הקווית של המסוע או המהירות הקווית של התקדמות מכונת הזריעה



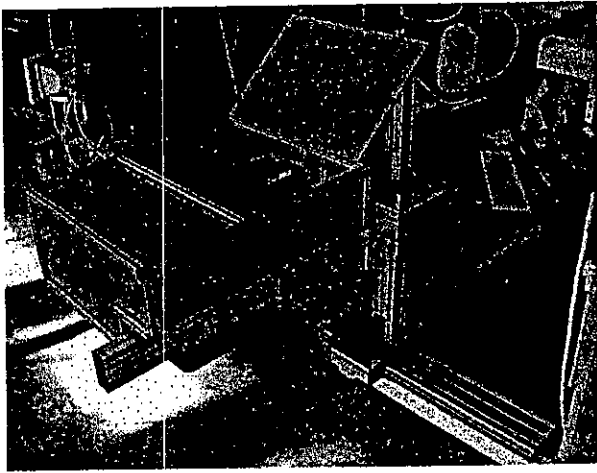
צור מס' 4: קואורדינטות לחישוב מיקום בורע

פיתוח מערכת לצילום משני כיוונים

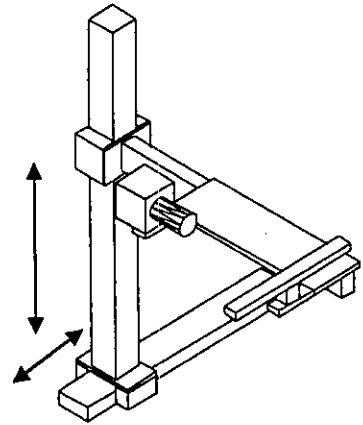
מערכת הדגימה

על מנת לאפשר צילום משני כיוונים בוצעו שינויים במתקן שנבנה לצילום מכיוון אחד. השינוי נעשו במערכת המכנית שנושאת את המצלמה ובסוג התאורה:

1. מערכת מכנית: מתקן נשיאת מערכת הצילום אשר נבנה לצילום מכיוון אחד היה גוף עצמאי, ומיקומו יחסית למכונת הזריעה נקבע על ידי הזזה יחסית של שני מתקנים. על מנת לאפשר צילום משני כיוונים ומיקום מדויק של מערכת הצילום ביחס למזרע תוכנן ונבנה מתקן חדש לנשיאת המצלמה והתאורה. המתקן החדש הוצמד באופן קבוע על מתקן נשיאת המזרעה. קביעת המיקום המדויק של מערכת הצילום נעשה על ידי תווזה בשני צירים. כפי

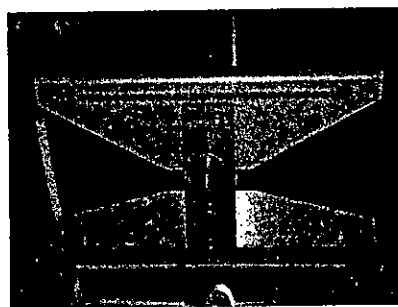


ציור מס' 6: מתקן נשיאת מערכת הצילום



ציור מס' 5: תאור סכמטי של מערכת קביעת מיקום מערכת הצילום

2. מערכת התאורה: צילום הזרעים התבצע בעזרת תאורת רקע. מערכת תאורת הרקע לצילום מכיוון אחד מורכבת ממקור אור הלוגן, בעל עוצמה גבוהה וחוט להט ארוך (על מנת לקבל שדה תאורה אחיד ככל האפשר בשדה הראייה). חסרונה העיקרי של המערכת שנבנתה היא פליטה גבוהה של חום מנורת ההלוגן (1000 וואט). בנוסף לכך, אורך השדה האחיד הינו מוגבל. לקבלת שדה תאורה ארוך יותר יש צורך בנורות הלוגן בעלות חוט להט ארוך יותר וכתוצאה מזה עוצמה גבוהה יותר. יתר על כן, צילום משני כיוונים מחייב חכפלה של מערכת תאורת הרקע. על מנת להסיר את החום הנפלט ממערכת התאורה ולהאריך את שדה התאורה, נעשה ניסיון לבנות פס תאורה בנורות LED. הן דיודות הפולטות אור באורכי גל מסוימים ואינן פולטות חום כלל. עוצמת האור הינה חזקה מספיק לתאורת רקע. נבחר נורת LED המאירה בתחום ה-NIR - 880 ננומטר מכיון שעוצמתן של נורות אלה גבוהה ומצלמת ה-CCD הינה רגישה לאור בתחום זה. על מנת ליצור שדה ראייה רחב, נבנה מתקן המצמיד 30 דיודות בשורה אחת, כפי שמתואר באיור מס' 7. מתקן זה מוקם מול המצלמה. לאחר מספר ניסיונות התברר שהתאורה הנוצרת מנורות ה-LED אינה אחידה מספיק ולכן אינה מתאימה לתאורת רקע לצילום הזרעים.

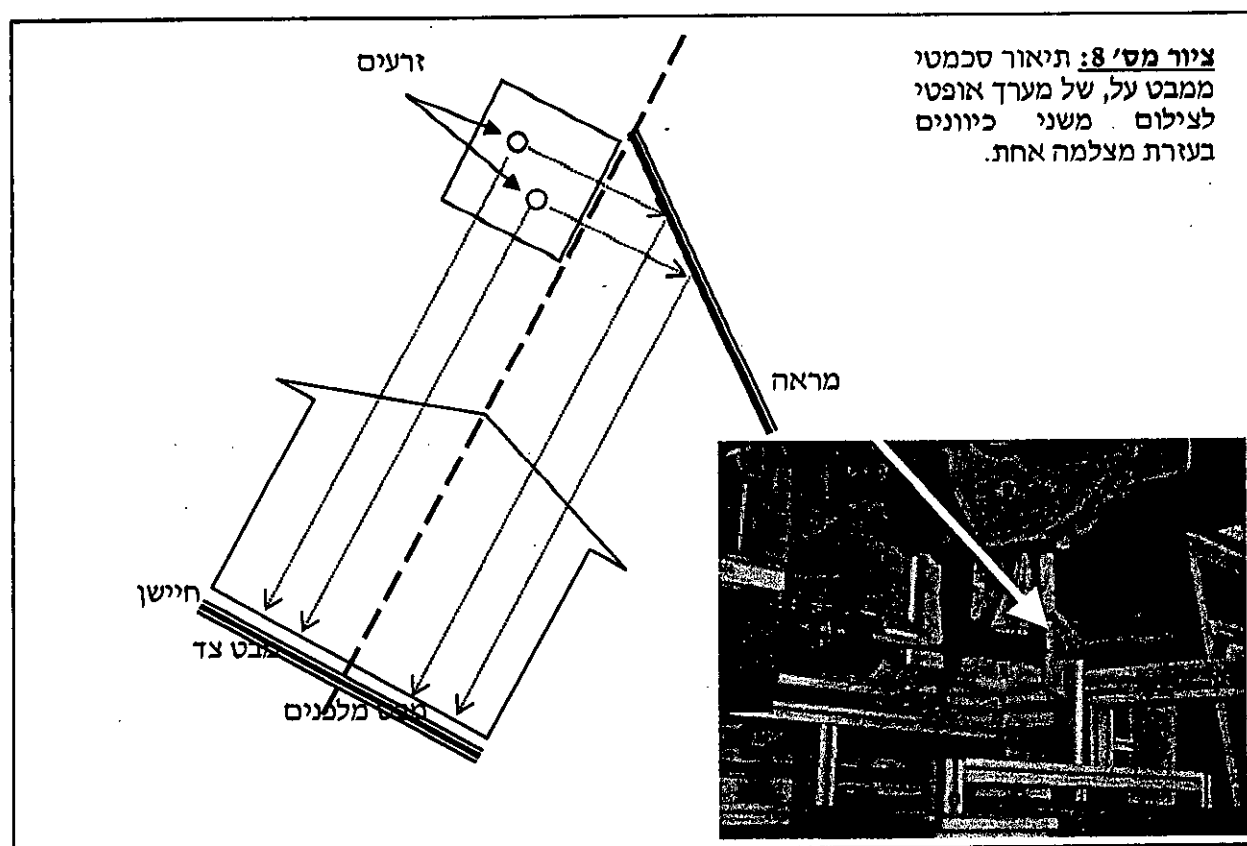


ציור מס' 7: תאורת רקע המורכב מ-30 LED מוצמדות בשורה אחת

נורות נאון מספקות אור אחיד מאוד אך חסרונם הוא ההבהוב התדר 50 Hz. בניסיון נוסף לחחליף את נורת ההלוגן אותרו נורות נאון אשר הותאם להם שני המפעיל את הנורות בתדר גבוה - 25 KHz. קצב הצילום של מצלמת הקו הוא כ-3000 שורות לשניה, ולכן ניתן להשתמש בתאורה זו. לאחר ניסיון ראשוני אשר אומתה התאמתה של תאורת הנאון בתדר גבוהה, שולבה התאורה במתקן צילום החדש.

צילום משני כיוונים

על מנת לאפיין את פיזור הזרעים גם בכיוון ניצב לכיוון ההתקדמות נבנתה מערכת אופטית המאשרת התבוננות על זרם הזרעים משני הכיוונים בעת ובעונה אחת. ציור מס' 8 מראה באופן סכמאטי את עקרון התכנון האופטי ואת המערכת שנבנתה על פי העיקרון הזה. במצב כזה, התמונה שמתקבלת מתחלקת לשני אזורים נפרדים, כפי שמתואר בציור 9. אזור A שמתאר את פיזור הזרעים בכיוון ההתקדמות ואזור B שמתאר את פיזור הזרעים בניצב לכיוון ההתקדמות. כל זרע מופיע פעמיים בתמונה: פעם ביזור A ופעם באזור B. ניתוח התמונה באזור A זהה לניתוח שנעשה עבור צילום מכיוון אחד בלבד. ניתוח התמונה באזור B מתבסס על העובדה שמחירות ההתקדמות בכיוון זה היא אפס, ולכן מיקום הזרעים נקבע רק על ידי הרכיב הכולל את קואורדינטות הזרע בתמונה. באזור זה נבדקה מזרעת ירקות הזורעת בשתי שורות נפרדות. באזור B ניתן לראות בבירור את שתי השורות שנזרעות ולאפיין את פיזור הזרעים בכל אחת מהשורות בנפרד.

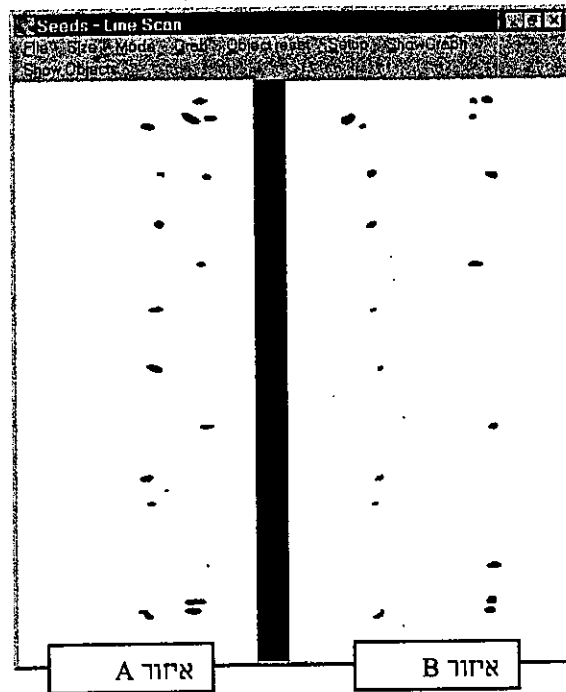


ניתן לחשב את הקואורדינטות בשני הכיוונים של כל זרע בנפרד על ידי טריאנגולציה פשוטה. לשם כך יש לזהות את אותו זרע בשני האזורים של התמונה. דמות אותו זרע נמצאת באותו קו אופקי בתמונה, אך במיקום שונה בתוך התמונה. קביעת שורת ההתחלה והסוף של כל זרע, יכולים לשמש כאינדיקציה למציאת זוגות הדמויות של אותו זרע בשני המבטים. מכיוון ששמימה זו היא דורשת כוח חישוב רב אינה מתאימה ליישום במערכת הנוכחית ולא מומשה on-line.

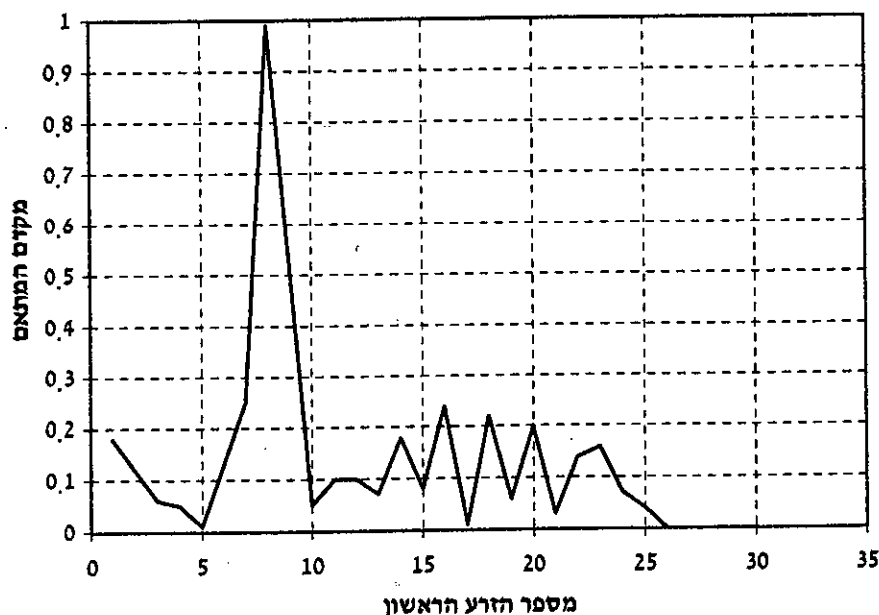
בתום תהליך פיתוח האלגוריתמים ובדיקתם נערכו ניסויים לבחינת דיוק קביעת המיקום של זרעים בעזרת המערכת האופטית. המערכת הופעלה עם זרעי כותנה וחמניות בתנאים שונים. במקביל להשוואה הופעלה מערכת הבדיקה המקובלת, מערכת המסוע. איתור הזרע הראשון בקבוצת הזרעים המשותפת לבדיקה במערכת האופטית

ולבדיקה עם מערכת המסוע נעשה ע"י בדיקת המתאם בין מרווחי הזרעים בשתי הבדיקות. ציור 10 מראה את מקדם המתאם בין המרווחים בשתי הבדיקות כתלות במיקום הזרע הראשון. כאשר ערכו של מקדם המתאם קרוב ל-1 יש התאמה חד - חד ערכית בין מרווחי הזרעים בשתי השיטות. ציור 11 מראה את מרווחי הזרעים בשתי השיטות לאחר קביעת מיקום הזרע הראשון המשותף לשתי הבדיקות.

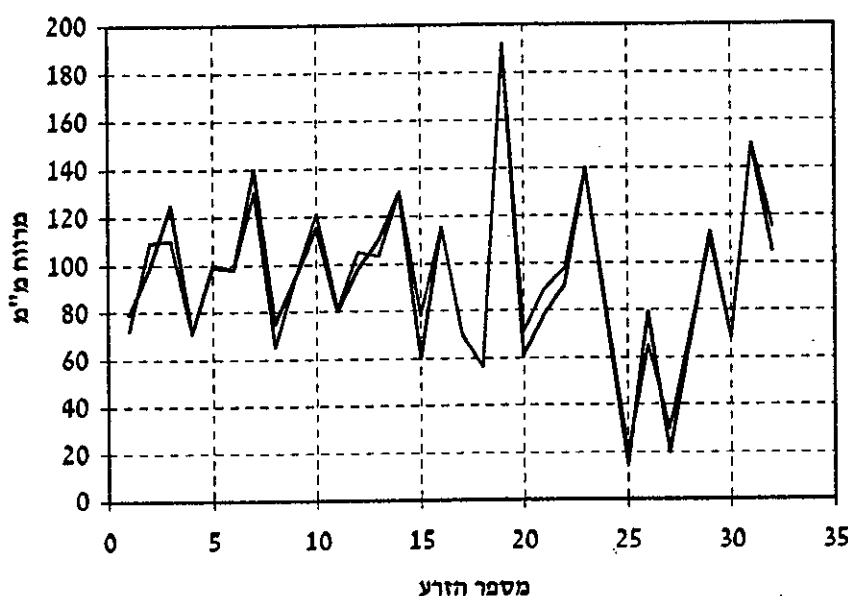
ציור מס' 9: תמונה של המערכת האופטית בצילום משני כיוונים בעזרת מצלמה אחת. אזור A: פיזור הזרעים לאורך כוון ההתקדמות. אזור B: ניזור הזרעים בניצב לכיוון ההתקדמות.



בנוסף חושבו מדדים סטטיסטיים, מקדם השונות של המרווחים ומקדם ההזנה לפי תקן ISO 7256/1 המתארים את אחידות פיזור הזרעים, טבלה 1. ניתן לראות שיש התאמה טובה בין תוצאות שתי השיטות. משך זמן הבדיקה האופטית היה כ-40 שניות לעומת כ-10 דקות בשיטה הידנית.



ציור מס' 10: מקדם המתאם בין המרווחים בשתי הבדיקות כתלות במיקום הזרע הראשון



ציור מס' 11: המרווחים בין הזרעים בשיטה האופטית ובשיטה הידנית

טבלה מס' 1: השוואה של מאפייני פיזור הזרעים כפי שנמדדו בשיטה ידנית ובשיטה אופטית.

	מקדם הזנה [%]		מקדם שונות [%]		מרווח ממוצע [מ"מ]		זרעים כפולים מספר	
	אופטי	ידני	אופטי	ידני	אופטי	ידני	אופטי	ידני
כותרת 1	90	91	28	31	100	98	2	2
כותרת 2	88	89	43	42	106	106	1	1

לאחר אימות ביצועי המערכת, הרחב ושופר ממשק המשתמש ואפשרויות ההפעלה. נוספו אפשרויות שליטה נוספות תוך כדי העבודה, כגון קביעת עוצמת תאורת הרקע, התחלה וסיום של ניסוי ועוד. הוספה הצגה גרפית אינטרקטיבית של מחלק הניסוי. המפעיל יכול לפתוח על המסך חלונות המתארים בצורה מספרית את תוצאת הניסוי, למשל מספר הזרעים שעברו עד כה, ממוצע ושונות של המרווח בין הזרעים עד כה ועוד. בנוסף לכך ניתן להציג את התפלגות של המרווחים בין הזרעים, תוך כדי הניסוי.

לבסוף, שלבו on-line האלגוריתמים לאפיון סטטיסטי של פיזור הזרעים. הניתוח הסטטיסטי של מרווחי הזרעים מוגדר של ידי תקן ISO 7256/1-1984(E) (תקן בין לאומי). חלק של התקן ניתן ליישום on-line ושולב לתכנה. חלק אחר של הניתוח דורש עיבוד רקורסיבי של הנתונים, ולכן זה לא ניתן לחישוב תוך כדי הניסוי, והניתוח נעשה לאחר סיומו.

עבור זרעים קטנים, אין אפשרות למדוד את המרווח ביניהם בצורה ידנית. הדיוק של המדידה הידנית ($\pm 3\text{mm}$) הוא גדול יותר מהמימדים של הזרעים (1.2mm) וקרוב למרווח בין הזרעים בפועל (5mm). במערכת האופטית ניתן לאפיין את המרווחים בצורה זהה לזרעים גדולים. על מנת לחשוות את הביצועים של המערכת האופטית עם מערכת הידנית, הוערך מספר הזרעים שהוזן דרך מכונת הזריעה (על ידי שקילה) ונספרו מספר הזרעים במערכת האופטית. טבלה מס' 2 מראה את תוצאות שהתקבלו במספר בדיקות. ההבדל בין מספר הזרעים המוערך למדוד נע בין 0.8% לבין 7.2% .

טבלה מס' 2: השוואה של תוצאות מדידה בשיטה ידנית ובשיטה אופטית עבור זרעים קטנים.

מספר זרעים מדוד במערכת האופטית	מספר זרעים מוערך לפי משקל	משקל [גרי]	הפרש בין מוערך לבין מדוד
8705	8623	16.67	0.9
4810	4511	8.72	6.2
8846	8210	15.87	7.2
9723	9803	18.95	0.8

סיכום

לסיכום, פותחה מערכת ראייה ממוחשבת למדידת מרווחי הזרעים תוך כדי נפילתם ממכונת הזריעה. נבנתה מערכת עיבוד תמונה המבוססת על מצלמת קו ופותחה תכנת זיהוי הזרעים הפועלת on-line. בהמשך פותח מודל לחישוב מיקום הזרעים על מסוע דימוני. פותחו אלגוריתמים של עיבוד תמונה, ממשק משתמש ותצוגות גרפיות של מהלך הניסוי. כמוכן, מומשו ושולבו אלגוריתמים לאפיון סטטיסטי של פיזור הזרעים לפי התקן הבין לאומי. נערכה השוואה בין דיוק הקביעה של מרווחי הזרעים והאפיון הסטטיסטי של הפיזור, עבור בדיקה ידנית ועבור בדיקה בעזרת המערכת שפותחה. נמצא שדיוק המערכת החדשה הוא לפחות כמו זה של המערכת הידנית. קונפיגורציה אופטית משופרת, מאפשרת אפיון פיזור הזרעים לאורך כיוון ההתקדמות של המזרעה וכמו כן בניצב לו. מערכת זו מיועדת לזרעים קטנים אשר מנגנון יחיד זורע מספר שורות במקביל.

סיכום עם שאלות מנחות**1. מטרת המחקר לתקופת הדו"ח תוך התייחסות לתוכנית העבודה**

מטרת המחקר הינה לפתח מערך בדיקה מתקדם אשר בעזרתו יקבעו הפרמטרים המיטביים להפעלת מכונות זריעה פניאומטיות מדויקות. המטרות הספציפיות היו: פיתוח של מערכת של ראייה ממוחשבת למדידת מיקום הזרעים תוך כדי נפילתם ממכונת הזריעה, שילוב אלגוריתמים לאיפיון סטטיסטי של פיזור הזרעים, ופיתוח מערכת לצילום זרם הזרעים משני כיוונים.

2. עיקרי הניסויים והתוצאות שהושגו בתקופת אליה מתייחס הדו"ח

נבנה מתקן למיקום מדויק ועקבי של מערכת הצילום ביחס למזרעה תוך בחירה של תאורת הרקע המתאימה לשדה צילום רחב ותאורה אחידה. פותחו ומומשו אלגוריתמים של ראייה ממוחשבת למדידת המאפיינים הסטטיסטיים של פיזור הזרעים לפי דרישות התקן הבין לאומי ונערכו ניסויים לאפיון הפרמטרים הסטטיסטיים של פיזור הזרעים עם מספר סוגי זרעים גדולים וקטנים.

3. המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו

נמצא שניתן לאפין את שהפרמטרים הסטטיסטיים של פיזור הזרעים on-line. יתר על כן, הפרמטרים הסטטיסטיים הוגדרו לפי דרישות של תקן ISO בין לאומי, המאפשר הגדרה כמותית של ביצועי המכונה.

4. הבעיות שנתקו לפתור ו/או השינויים שחלו במהלך העבודה

על מנת לאמץ את השיטה האופטית כשיטה סטנדרטית לקביעת תנאי ההפעלה של המזרעות יש לערוך פרוטוקולים לכיול והפעלה של המערך האופטי והצגת המערכת למפעלים יצרני מזרעות ומוסדות חקלאיים.

5. האם הוחל בהפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח

Alchanatis, V., Kashti, Y. and Brikman, R. (2002). A machine vision system for evaluation of planter seed spatial distribution. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development. Manuscript IT 01 005. Vol. IV. April, 2002.*

Alchanatis, V. and Kashti, Y. (2000). A machine vision system for evaluation of planter seed spatial distribution. *The XIV Memorial CIGR World Congress 2000, November 28 – December 1, 2000, Tsukuba, Japan.*

פיתוח מתקן לבדיקת מכונות זריעה בעזרת ראייה ממוחשבת, 2000. מיכון והנדסה חקלאות, יוני 2000, עמ' 26-28.

רשימת ספרות מצוטטת

י. ניר, י. קשתי, 1996. בדיקת מזרעה פנאומטית מדייקת לירקות, תוצרת סטנה, דגם 785. דו"ח בדיקה מס' 804, מחלקת בדיקות, המכון להנדסה חקלאית, מרכז וולקני.

Lan Y., Kocher M.F. and Smith J.A., 1999. Opto-electronic sensor system for laboratory measurement of planter seed spacing with small seeds. *J. Agric. Engng. Res.*, 72:119-127

- Kelly P.J. and Palmer A.L., 1995. A system for the measurement and analysis of the spatial distribution of seeds from seed meters. *Agricultural Engineering Australia*, 25(1):36-42.
- Kocher M.F., Lan Y., Chen C. and Smith J.A., 1996. Opto-electronic sensor system for rapid evaluation of planter seed spacing uniformity. 1996 ASAE Annual International Meeting, Phoenix, Arizona. ASAE paper 96-1025.
- Kocher M.F., Lan Y., Chen C. and Smith J.A., 1998. Opto-electronic sensor system for rapid evaluation of planter seed spacing uniformity. *Trans. ASAE*, 41(1):237-245
- Muller J.G., Rodriguez G., and Koller K., 1994. Optoelectronic measurement system for evaluation of seed spacing. *Agricultural Engineering Milano 1994*, Report No. 94-D-053.