

מערכת הפעלה מיטבית לצינון רפת פרות באמצעות זיהוי אוטומטי של התגודדות

פרות ושינויי זרימת אויר

Optimal operation of cows cooling system based on automatic crowding detection and air flow

ויקטור אלחנתי¹, אילן הלחמי¹, יפית כהן¹, אהרון אנטלר¹, יוסף גרינשפון¹, אוסטרובסקי
וואצסלב¹, ישראל פלמנבאום², עזרא שושני²
1- המכון להנדסה חקלאית, מרכז וולקני 2- שה"ם, משרד החקלאות

מחקר מס' 458-0331-04

דו"ח סופי

תקציר

לצינון פרות בקיץ ישראלי השפעה על (1) יעילות הכלכלית של הרפת, (2) איכות וכמות החלב המיוצר בקיץ, (3) רווחת הפרה ובריאותה. כיום מערכת צינון הרפת מופעלת ומופסקת על-פי זמן. מדדי עוצמת רוח והתנהגות הפרות אינם משמשים כקלט לבקרת מערכת הצינון, למרות זמינות החיישנים ולמרות העלות הגבוהה של הפעלת צינון ואוורור באופן עודף. נושא המחקר המוצע הוא ניהול מיטבי של הפעלת מערכת הצינון ברפת.

במהלך המחקר הוגדר שמקום הצינון הסלקטיבי יהיה באזור ההאבסה והוצבו צלמות לצילום אזור זה בהתאם. נלקחו תמונות בזוויות שונות על מנת לכסות שטח רחב ככל האפשר. פותחו אלגוריתמים של עיבוד תמונה לתיקון גיאומטרי של התמונות ולחיבור התמונות לפסיפס גדול המתאר את שטח הרפת. נבנה מתקן כיול מלבני במימדים 4x2 מ' ופותח הליך כיול גיאומטרי המבוסס על צילום מלבן הכיול. בנוסף לכך, פותחו אלגוריתמים של עיבוד תמונה להפרדה בין הפרות לבין הרקע ולכימות מספר הפרות הנמצאות בשדה הראייה. הפרדת הפרות מהרקע התבססה על פרמטר הגוון (Hue) אשר חושב מהתמונות הצבעוניות ועל מדד דמוי NDVI המתבסס על ערוצים בתחום הנראה. נמצא כי מדד דמוי NDVI הוא היעיל ביותר לבידוד הפרות מהסביבה. שיערוך של מספר הפרות בתמונה נעשה אחרי החלקת התמונות באמצעות פילטרים מרחביים. פותחה שיטה לשיערוך של מספר הפרות בתמונה ונמצאה התאמה טובה מאוד בין ספירה ידנית לבין ספירה אוטומטית של הפרות. לסיכום, הושלם הפיתוח של שיטת הצילום, עיבוד התמונות ואלגוריתמים לניתוח התמונות להערכה אוטומטית ובזמן אמת של מספר הפרות באזור המנוטר.

מבוא

מערכות הצינון ברפתות מסחריות מבוססות על התזה של טיפות מים קטנות בקוטר עשרות מיקרונים, תוך כדי אוורור בעזרת מאווררים. מערכת הצינון פועלת בתקופת הקיץ בכל חלל הרפת על פי זמנים שנקבעו מראש. לרוב, מופעל אוורור מאולץ בסככות במשך כל שעות היום. בנוסף, מופעל צינון, המשלב הרטבה ואוורור מאולץ, למשך כ- 7 שעות ביממה. הצינון המשולב מתבצע בחצר ההמתנה, לפני ובין חליבות, ובאבוס לאחר החזרה מחצר ההמתנה. טמפרטורת הגוף של הפרה הוא פרמטר חשוב המשפיע על התנהגות הפרה ויעילות תנובת החלב. עבודות שנעשו בעבר הראו שמספר שעות של צינון מעלה את תנובת החלב של הפרות (פלמנבאום וחבי 2003).

זיהוי של פרות ברפת באמצעות עיבוד תמונה אוטומטי אינו טריוויאלי. האדם מבחין בין פרות ובין שאר מרכיבי הרפת באמצעות הראיה התלת-מימדית והבינה האנושית, המשלבות אלמנטים של צבע, צורה, גודל, תנועה והקשר (context). בעיבוד תמונה האלמנטים הזמינים הינם מוגבלים. התמונה היא דו-מימדית ועל-כן האלמנט העיקרי לזיהוי ראשוני הינו הצבע או ההחזרה הספקטראלית בתחום הנראה. מכל מקום, צבע הכתמים הכהים של הפרה והחותמת הספקטראלית שלהם דומים לאלו של הקרקע המרפדת את הרפת. הדמיון גדול יותר כאשר הקרקע מוצלת ופחות כאשר הקרקע מוארת. במקרים מיוחדים, כאשר נדבק בפרה בוץ, קיימת זהות בין חלק מן הפרה והקרקע. הכתמים הבהירים של הפרה והחותמת הספקטראלית שלהם דומים מאוד למתקני הרפת כמו העמודים ולוחות הקירוי הבהירים. מכיוון שמתקני הרפת הינם קבועים ניתן למסך אותם בתהליך הזיהוי, לעומתם כתמי הקרקע משתנים בין השאר בהתאם לתנועת הפרות ברפת. לכן, יש צורך בפיתוח שיטות המתאימות לזיהוי אוטומטי של פרות בתמונות של הרפת.

מטרה

המטרה הכללית של מחקר זה היא פיתוח תשתית של חישה להפעלה מיטבית של האוורור והצינון ברפת על-פי שילוב של מדדים אקלימיים (טמפרטורה, לחות ורוח) וזיהוי אוטומטי של מיקום הפרות. המטרות הספציפיות שהוגדרו במסגרת עבודה זו הן:

- (1) פיתוח מערכת צינון המאפשרת הפעלה פרטנית בחלקים שונים של הרפת,
- (2) פיתוח של מערכת ראייה ממוחשבת לצילום חלל הרפת וזיהוי הימצאות וואו התגודדות פרות במקטעים שונים של אזורי צינון לשם הפעלתם סלקטיבית.

מהלך העבודה

מערכת צילום ברפת

במטרה לזהות את מיקום הפרות בחלל הרפת, מוקמו מצלמות ברפת כך שתמונותיהן כיסו את מרחב הרפת באזורים של האבוס. מערכת הצילום כללה את הרכיבים הבאים:

1. **מצלמות:** נבחרה מצלמה דיגיטאלית צבעונית פשוטה. ברזולוציה של 3 מגה פיקסל. יתרונה של המצלמה דיגיטאלית היא הרזולוציה מרחבית גדולה (2048x1536 נקודות). מצד שני, העברת התמונות למרכז העיבוד נעשה באופן מרוכז בתום מהלך המדידות. בעתיד, מצלמות אלה יוכלו להעביר את המידע למרכז העיבוד בקצב לש תמונה כל מספר שניות או דקות. קצב זה הוא בהחלט מספיק לבקרה של מערכת צינון. ממשק התקשורת

של המצלמות הוא USB 2.0. בעתיד ניתן לבדוק אפשרות לבניית רשת אל-חוטית לשידור התמונות.

2. **אלגוריתמים של עיבוד תמונה:** התמונות הועברו מהמצלמות אל מחשב אישי, אשר שישמש כתחנת העיבוד, לצורך עיבוד, ניתוח ושמירה.

3. ראשית פותחו אלגוריתמים לסינון הרעשים (חלקי מבנה ועצמים שלא שייכים לחלל הסככה), תיקון גיאומטרי (בהתאם לזווית הצילום והעדשה) והפרדה בין פרות וקרקע.

a. התיקון הגיאומטרי של גבולות הרפת בתמונה התבצע באמצעות מתקן כיוול שנבנה במיוחד למטרה זו.

b. הפרדה בין הפרות ובין שאר רכיבי הרפת באמצעות אינדקסים של החזרה המתבסס על הבדלים בהרכב הספקטראלי של האור החוזר מפרות ומעצמים אחרים (בתחום האור הנראה, בעזרת צילומים בצבע).

c. יעילות האלגוריתמים הוערכה על ידי השוואה בין תוצאות תהליך העיבוד האוטומטי לבין ביצוע אותה משימה באופן ידני על ידי אחד החוקרים.

d. שיערוך מספר הפרות בתמונה על ידי אפיון כתמים של התגודדות על-פי מאפיינים של גודל, צורה, צפיפות מרווחים וכד'

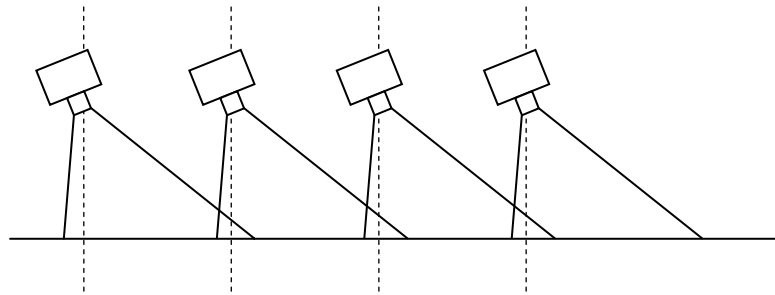
האלגוריתמים של עיבוד התמונה פותחו ב-Matlab. התכנה מקבלת כקלט תמונות מהמצלמות ברפת ומחשבת את מקום הימצאותן ורמת ההתגודדות של הפרות בחלל הרפת. מידע זה יכול לשמש למערכת הבקרה של הרפת על מנת להפעיל את מערכת הצינון באופן פרטני. חלק מאוד קריטי בעבודה היה שילוב של התמונות מארבע מצלמות שונות ומיפוי הימצאות הפרות במרחב. על מנת לבצע משימה זו היה צורך בכיול מרחבי של כל המצלמות. בהתאם לכך, נוסו מספר שיטות לכיול: סימון נקודות קבועות בחלל הרפת בגבהים שונים, בנייה של מסגרת קבועה בגובה אחיד לביצוע הכיול. בוצעו מספר סדרות של ניסוי צילום עם המערך של ארבע המצלמות.

למרות שהוגדר בתכנית העבודה, לא נעשתה בדיקה של אסטרטגיות להפעלה של מערכת הצינון המשתנה במרחב מאחר ופיתוח מערכת הזיהוי (והכיול הגיאומטרי של המצלמות) ערך יותר מהצפוי וצרך את כל משאבי המחקר.

תוצאות

הצבת המצלמות: ארבע המצלמות הוצבו בגובה של כ-5 מטר מעל פני הקרקע, סמוך לתקרת הרפת, מעל עמדות האבוס, כפי שמתואר באיור מס 1.

העדשה של כל מצלמה הייתה 28 מ"מ אשר אפשרה צילום של כ-5 עמדות אבוס בעת ובעונה אחת. מכיוון שזה לא הספיק על מנת ליצור רצף וחפיפה של תמונות ממצלמות סמוכות, המצלמות הוטו כ-20 מעלות מהאנך ואיזור האבוס צולם בפרספקטיבה. איור מס' 1 מראה באופן סכמטי את אופן הצבת המצלמות והשטח שכוסה באמצעות כל מצלמה. המצלמות מוספרו מ-1 ל-4 ובהמשך חוברו לפסיפס של איזור האבוס.



איור מס' 1: תאור סכמאטי את אופן הצבת המצלמות והשטח שכוסה באמצעות כל מצלמה והצבת המצלמות בפועל ברפת

תיקון גיאומטרי של התמונות: הערכה נכונה של מספר הפרות בכל תמונה וצירוף התמונות מכל המצלמות בפסיפס אחד, מחייבים תיקון גיאומטרי של כל תמונה, כך שכל נקודה בתמונה תייצג את אותו שטח בפועל. לשם כך פותח הליך המבוסס על טרנספורמציה המאפשרת הזזה, סיבוב וגזירה של התמונה. תיקון זה מאפשר יישור של תמונות המצלמות בפרספקטיבה. הליך התיקון מחייב ידיעה של מיקומן של שלוש נקודות לפחות, בתמונה ובפועל. לדיוק מדידת מיקום נקודות אלה, המכונות נקודות בקרה, ולדיוק קביעתן בתמונה, השפעה מכרעת על תהליך תיקון התמונה. במהלך העבודה נעשו מספר ניסיונות כאשר נבחרו נקודות בקרה שונות. איור מס' 2א הוא דוגמא של תמונה אשר צולמה באמצעות מצלמה מייצגת ואיור מס' 2ב מתאר את אותו תצלום אחרי התיקון הגיאומטרי ללא גוף כיוול ייעודי. בצילום המקורי (איור 2א) ניתן להבחין שהפרות הרחוקות מהמצלמה נראות קטנות יותר. בתמונה לאחר התיקון הגיאומטרי, ניתן לראות שהשטח שכל פרה תופסת השתנה. לכאורה, אחרי התיקון כל פרה הייתה אמורה לתפוס מספר נקודות דומה בתמונה. התיקון הנוכחי אינו עונה על הדרישות עדיין מכיוון שקיימת הגזמה בהערכה של שטח הפרות הנמצאות רחוק מהמצלמה. על מנת לתקן את העיוות הזה נקטנו בפעולות הבאות:

1. בחירה של נקודות בקרה אפקטיביות יותר, כלומר קרובות יותר לפרות תוך הקפדה על גובה אחיד של הנקודות, ו-2) צילום בזווית קרובה יותר לאנך, על מנת לצמצם את העיוות הגיאומטרי שבתמונה המקורית. תיקון זה יאפשר ספירה של מספר הנקודות השייכות לפרות והערכה של מספר הפרות המופיעות בתמונה.



(ב)



(א)

איור מס' 2 דוגמא של תמונה אשר צולמה באמצעות מצלמה מייצגת: (א) תמונה מקורית, לפני תיקון גיאומטרי, (ב) אותו תצלום אחרי התיקון הגיאומטרי.

הבעיה העיקרית שעמדה לפנינו הייתה העובדה שגוף הפרות לא נמצא בגובה אחיד. גב הפרה נמצא בגובה של כ-1.5 מ' בזמן שבטנה ורגליה (אשר נראים גם בתמונה עקב הצילום האלכסוני) נמצאים בגובה נמוך יותר. אילו ידענו על איזה חלק מגוף הפרה אנו מסתכלים, ניתן היה לבצע תיקון גיאומטרי שונה לכל חלק בנפרד. מכיוון שזה לא אפשרי, הונח שטח הגוף של הפרה הנראה במצלמה נמצא בגובה ממוצע של 1.5 מ' והתיקון הגיאומטרי נעשה בהתאם לכך. לשם כך, נבנתה מסגרת קשיחה העומדת בגובה 1.5 מ' ועליה סומנו נקודות במרחקים ידועים ביניהן. איור 3 מראה את מיתקן הכיול כפי שהוא הונח בתוך הרפת סמוך לזמן הניסוי.



(ב)



(א)

איור מס' 3 תמונה אשר צולמה באמצעות מצלמה ברפת כאשר מתקן הכיול בשדה הראיה: (א) תמונה מקורית, לפני תיקון גיאומטרי, (ב) אותו תצלום אחרי התיקון הגיאומטרי.

על מנת לעדן את התיקון הגיאומטרי לאחר יישור התמונה (תיקון הפרספקטיבה במישור האופקי בו מונח מתקן הכיול) חושב תיקון נוסף המתחשב בעובדה שעצמים בגבהים שונים נראים בגדלים שונים, בהתאם למרחקים מהמצלמה. תיקון זה משמעותי בעיקר עבור נקודות הרחוקות מהמצלמה בהן זווית הראיה רחוקה יותר מהאנך. בתיקון זה גודלה לשל כל נקודה תוקנה באמצעות:

$$A_{\text{new}} = A_{\text{old}} * \cos(\alpha)$$

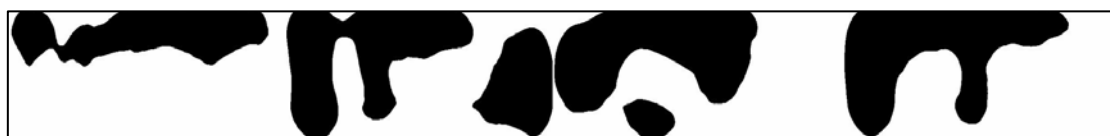
כאשר A_{new} הוא השטח אחרי התיקון, A_{old} הוא השטח לפני התיקון ו- α היא הזווית לאנך של הקו המחבר את הנקודה הנידונה למצלמה.

בחירה של נקודות בקרה אפקטיביות אלה, כלומר קרובות יותר לפרות תוך הקפדה על גובה אחיד של הנקודות, והתיקון הנוסף הניב לתוצאות טובות המאפשרות הפעלת אלגוריתמים לספירת הפרות בתמונות.

לאחר התיקון הגיאומטרי, הופעלו האלגוריתמים שפותחו בשנה הראשונה על מנת לאחד את ארבע התמונות לתמונה אחת ולהפריד את הרקע מהפרות. איור מס' 4 מראה דוגמה של ארבע תמונות לאחר התיקון והחיבור ביחד. תיקון זה יאפשר ספירה של מספר הנקודות השייכות לפרות והערכה של מספר הפרות המופיעות בתמונה. האזורים המסומנים בכתום (אזורים מלבניים בשתי התמונות המרכזיות) מסמנות ממסכים אמבטיות של מים שהן קבועות בתמונות.



(א)



(ב)

איור מס' 4: דוגמה של ארבע תמונות לאחר התיקון והחיבור ביחד: (א) לפני עיבוד לזיהוי פרות, (ב) לאחר זיהוי איזורים בהם שוהות פרות. איזור בשחור מסמן רקע ואיזור לבן מסמן זיהוי פרות.

הפרדה בין פרות לבין רקע: ההפרדה בין הפרות לבין רקע נעשה מספר שלבים:

1. תיחום של אזור האבוס באופן ידני. אזור זה הוא לא משתנה מתמונה לתמונה.
 2. חישוב אינדקס הצבע לכל פיקסל, בהתבסס על שלושת הערוצים RGB, אדום, ירוק וכחול. חושבו מספר אינדקסים של צבע:
 - a. גוון: לפי הטרנספורמציה הסטנדרטית של מרחב RGB למרחב HSI. הרכיב H נלקח כמאפיין של הצבע
 - b. מדד דמוי NDVI המבוסס על שני ערוצים: הערוץ הירוק (G) והערוץ האדום (R). מדד זה נתון באמצעות הנוסחה: $NDVI = (R - G) / (R + G)$.
 - c. מדד אבסולוטי דמוי NDVI המבוסס על שני ערוצים: הערוץ הירוק (G) והערוץ האדום (R). מדד זה נתון באמצעות הנוסחה: $ANDVI = |R - G| / (R + G)$.
 3. מעבר לתמונה בינארית באמצעות הפעלת ערך סף על התמונה של מדד הצבע. ערך הסף נקבע באופן אמפירי על ידי התבוננות על מספר תמונות ונשאר קבוע עבור יתר התמונות.
 4. החלקה של התמונה הבינארית לקבלת אזורים
- באיור מס' 5 מובאות דוגמאות של תוצאות העיבוד בכל אחד מהשלבים הנ"ל.



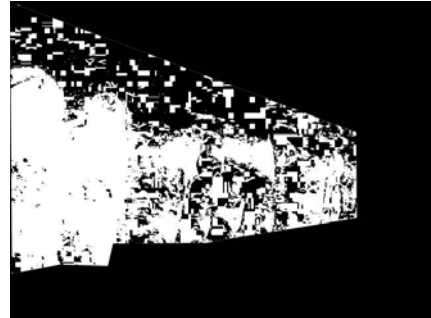
(ב)



(א)



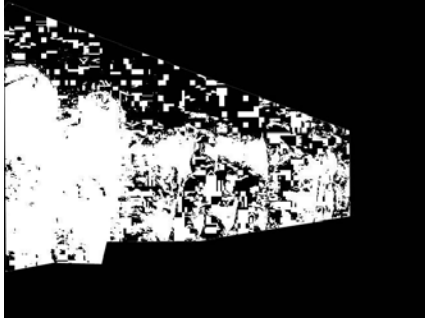
(ד)



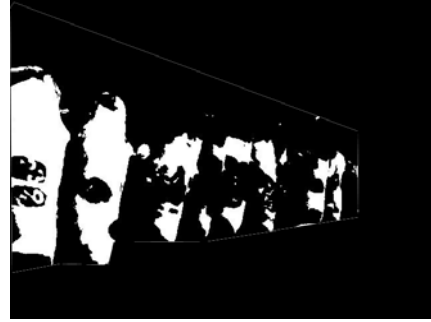
(ג)

איור מס' 5: דוגמא לתוצאות העיבוד: (א) תיחום של אזור האבוס באופן ידני, (ב) חישוב אינדקס הצבע (לפי מדד ANDVI), (ג) תמונה בינארית ו-(ד) החלקה

השוואה בין תוצאות הפרדה באמצעות ANDVI והגוון: תהליך ההפרדה של הפרות מהרקע נבנה על בסיס שלושה אינדקסים שונים של צבע, כפי שהוגדרו לעיל. בדד ה-NDVI לא הביא לתוצאות טובות מכיוון שהצבע השחור והצבע הלבן הנמצא בפרות מיוצג באמצעות מספרים חיוביים ושליילים בהתאמה. לכן, נלקח הערך המוחלט של האינדקס, כפי שהוגדר לעיל כ-ANDVI. איור מס' 6 מראה את תוצאות הפרדה באמצעות אינדקסים HSI ו-ANDVI. בנוסף לכך, האיור מראה את תוצאות הפרדה לאחר סינון התמונה להסרה של נקודות בודדות שמקורן ברעש, וסגירת 'חורים' בגוף הפרות. ניתן לראות שרוב השטח שזוהה שייך לגוף של הפרות.



ANDVI



HSI



ANDVI+FILTRING

איור מס' 6: תוצאות ההפרדה באמצעות אינדקסים HSI ו-ANDVI. ותוצאות ההפרדה לאחר החלקת התמונה

על מנת להמחיש את התוצאה, נבנו תמונות מלאכותיות המורכבות מהתמונה המקורית, עליה מולבשת התמונה לאחר העיבוד – איור מס' 7. בבחינה וויזואלית, ניתן לראות שיש התאמה טובה בין השטח שזוהה באמצעות האלגוריתם כפרה לבין השטח שמזוהה בעין.



OVERLAY - (ב)



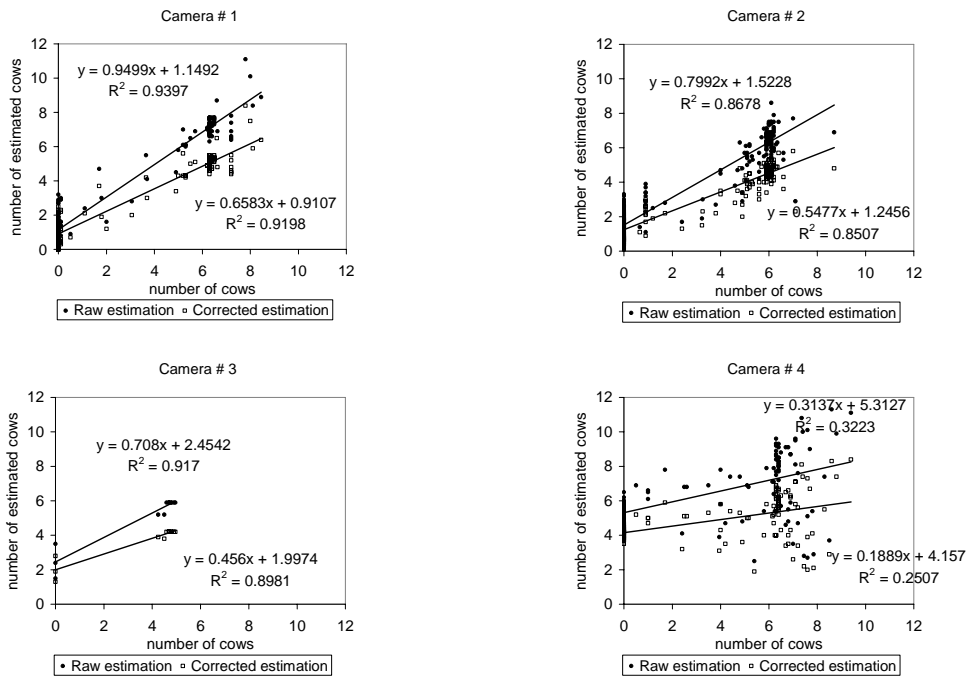
(א) שטח מופרד

איור מס' 7: השוואה בין שטח מזוהה באלגוריתם לעיבוד תמונה (א), לבין התמונה המקורית (ב).

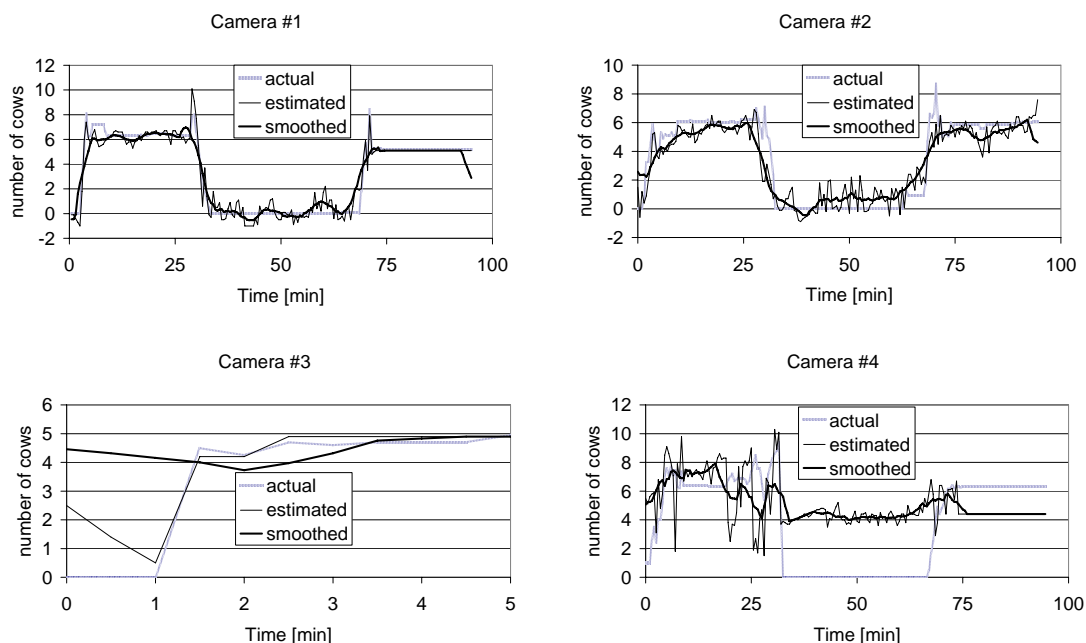
ספירת פרות

לאחר עיבוד התמונה וזיהוי האזורים בהם יש נקודות השייכות לפרות, סוכמו מס' הנקודות והוערך מס' הפרות בתמונה של כל מצלמה. בנוסף לכך, מס' הפרות בכל תמונה נקבע באופן ידני באמצעות הסתכלות על התמונה על ידי מפעיל אנושי. איור מס' 8 מראה השוואה בין מספר הפרות בפועל (כפי שנקבע על ידי הסתכלות על התמונה) לבין מספר הפרות כפי שנקבע באופן אוטומטי באמצעות אלגוריתמי עיבוד התמונה. ניתן לראות שהערכת מס' הפרות באופן אוטומטי

הוא בהתאמה גבוהה לספירה הידנית עבור שלוש המצלמות הראשונות. ההתאמה פחות טובה עבור המצלמה הרביעית. אי הדיוק של הערכת מס' הפרות במצלמה הרביעית בולט במיוחד כאשר מס' הפרות קטן. הסיבה לכך היא שהמצלמה הזאת הותקנה בקצה הרפת ואור שחדר מהצד יצר השתקפויות ברצפה הלחה, אשר זוהו בטעות כפרות.



איור מס' 8: השוואה בין מספר הפרות כפי שנספרו ידנית בתמונות לבין מספר הפרות שזוהו באמצעות האלגוריתם של עיבוד תמונה.



איור מס' 9: השוואה בין מספר הפרות כפי שנספרו ידנית בתמונות לבין מספר הפרות שזוהו באמצעות האלגוריתם של עיבוד תמונה כפונקציה של הזמן.

איור מס' 9 מתאר את כושר העקיבה אחרי נוכחות הפרות בשדה הראיה של המצלמות: הקו

המקווקו מתאר את מספר הפרות האמיתי (כפי שנספרו על ידי המפעיל) שנמצאות בשדה הראיה של המצלמה. הקווים האחרים מתארים את מספר הפרות כפי שמחושבות באופן אוטומטי באמצעות האלגוריתם שפותח. ניתן לראות שהאלגוריתם האוטומטי עוקב אחרי מספר הפרות בכל רגע ורגע בצורה מדויקת, במיוחד עבור המצלמות 1 ו-2. במצלמה מס' 4, בין הדקה ה-30 ל-65 אין פרות בשדה הראיה של המצלמה ובכל זאת האלגוריתם "רואה" כ-4 פרות. שגיאה זאת נובעת משינויים בתאורה במהלך הצילום, הגורם להחזרות כיווניות מהרצפה הרטובה.

סיכום ומסקנות

במהלך המחקר פותחו אלגוריתמים לתיקון גיאומטרי של התמונות. מכיוון שהתיקון הגיאומטרי רגיש מאוד בבחירת נקודות הבקרה שנבחרות לביצוע התיקון נבנה מתקן כיוול יעודי לסימון נקודות הבקרה. כמוכן, פותחו אלגוריתמים להפרדה אוטומטית בין הפרות לבין הרקע תוך התבססות על האינדקסים המבוססים על החזר האור הספקטראלי מהפרות. בהמשך, פותחו אלגוריתמים של עיבוד תמונה המבוססים על סינון מרחבי וניתוח לזיהוי מקום הימצאות הפרות בתמונה והערכה של מספרן. הערכת היעילות של האלגוריתמים נעשתה באופן כמותי, באמצעות ספירה של הפרות בתמונה המקורית באופן ידני והשוואה בספירה אוטומטית על התמונה המעובדת. האלגוריתמים לתיקון התמונות אוחדו עם המדידה של מספר הפרות. נמצא כי האלגוריתמים עוקבים בצורה מדויקת אחרי מקום הימצאות של הפרות הן מבחינת העיתוי והן מבחינת הכמות. הערכת מס' הפרות שנמצאות התמונה יכול לשמש כקלט למערכות צינור באזור האבוס שיופעלו באופן פרטני על פי תוצאות הזיהוי של מערכת הצילום.