



אילן הלחמי - מנהל המחקר החקלאי, המכון להנדסה חקלאית
halachmi@volcani.agro.gov.il

אתגרים מרתקים של ממשק חליבה רובוטית

החליבה הרובוטית עשתה מהפכה בממשק החליבה ובתחום העבודה באירופה ומשם היא חוזרת, לאט אך בבטחה, גם לכל חלקי תבל. 20 שנה עברו ורבים חוזים, שזה עניין של זמן, שהרובוט יהיה שיטת החליבה המובילה בעולם - ברפתות קטנות וגדולות כאחד. ד"ר אילן הלחמי, עשה דוקטורט בתחום ומלווה מאז, את כל ההיבטים המגוונים של ממשק החליבה הרובוטית. מתכנן תנועת הפרות בסכנת הרובוט ועד חלוקת האוכל ובריאות העטין

על חליבה רובוטית

חליבה רובוטית תלויה בהתנהגות הפרה - בהגעת הפרה לרובוט, מרצונה החופשי. במכון חליבה הרפתן מביא את כל הפרות למכון - זהו ההבדל המהותי שבין רובוט למכון חליבה. ברובוט רוב הפרות מגיעות לבדן, מרצונן, בשאיפה - פרוס אחיד לאורך היממה - יום ולילה.

התלות ברצון הפרה מנוגד לתפיסת "תיעוש הפרה" ולכן נחשב על ידי רבים וטובים, כחסרונה הגדול של החליבה הרובוטית. התלות ברצון הפרה בעייתי יותר ברפתות גדולות, אלפי פרות. למרות האמור לעיל, רובוטים יחליפו אדם בחליבה, ברפתות, גדולות (מודל אחר, זרוע רובוטית במכון או עיצוב של רפת שתרוחבה זרועות רובוטיות) כקטנות.

בניגוד לרפת מבוססת מכון, תכנון רפת עם רובוט מבוסס על "פיתוי" הפרות ללכת לרובוט מרצונן החופשי

טווח הזמן להחלפת אדם ברובוט קשה להערכה, אבל בוא יבוא. לדוגמה, החלפת כל הסוסים בטרקטורים נמשכה עשרות שנים. מי שמתכנן היום בניית רפת חדשה, מבוססת מכון, מוטב שיכין גם תכנית מגרה - תכנון החלפת המכון ברובוט. שלילת תכנית המגרה - "ההחלפה", אולי תגיע בעוד שנים רבות, אולי על ידי בן או נכד, אבל היות שאופק תכנון רפת הוא כ-70 שנה, בחלק מתקופת חיי הסככה, הפרות שבה ייחלבו על ידי רובוט. בעת תכנון רפת עם מכון חליבה צריך לחשוב, ברקע, גם על האלטרנטיבה הרובוטית.

התאמת רובוט חליבה לרפת (שנות ה-90)

רובוט נמצא בתודעת ציבור הרפתנים מעל 20 שנה, ב-1983, החליטה חברת Gascoigne Melotte (GM) ההולנדית לפתח זרוע להרכבת גביעי חליבה. ב-4 לדצמבר 1989 ציינו מהנדסי חברת GM במחברתם שהפרה הראשונה נחלבה ללא עזרת אדם. באותו זמן, גם המכון להנדסה חקלאית במנהל המחקר החקלאי ההולנדי (IMAG-DLO) וחברות נוספות, פיתחו כל אחד את הרובוט שלו. בתחילת דרכו של הרובוט - תחילת שנות ה-90 התנסו המפתחים במציאת מיקום קצה הפטמה ואופן הצמדת גביע החליבה לפטמה, מהר יותר, אמין יותר ולכמעט כל צורת עטין. לפני 14 שנה נסעתי לחקור שיטות חליבה רובוטית במסגרת לימודי דוקטורט בהולנד. מטרת המחקר הראשון, שהשתתפתי בו, היה להגדיר את העקרונות שלאורם מתוכננת הרפת הרובוטית - תכנית המערך בשטח, העמדה במרחב - מיקום וסידור המתקנים ברפת. בניגוד לרפת מבוססת מכון, תכנון רפת עם רובוט מבוסס על "פיתוי" הפרות ללכת לרובוט מרצונן החופשי. מחקרי ההמשך היו בנושא ניהול הרפת הרובוטית - הזנה בתנאי אקלים חם (ישראל) ומיקום הצינור ברפת הרובוטית. רוב הרובוטים נמצאים באירופה ורק מעטים בשאר היבשות. בשנה האחרונה, 2009, כל (100%) מכוני החליבה החדשים שנבנו בדנמרק היו מסוג רובוט. אבל במדינות סקנדינביות האחרות, עדיין לא הגיעו ל-100%.

אחד מחסרונות הרובוט ברפת הקטנה - תקלת רובוט "יום ולילה" - במקום היכולת לרכז את עבודת החליבה כשעתיים בבוקר וכשעתיים בערב ולהיות פנוי עם ראש שקט ביתר שעות היום והלילה. אם הרובוט לא מספיק אמין, מודל ישן מדי או טכנאוי לא מספיק טובים - יותר מדי תקלות רובוט, ידירו שינה מעיני הרפתן.

בעיות שעבדנו עליהן בארץ

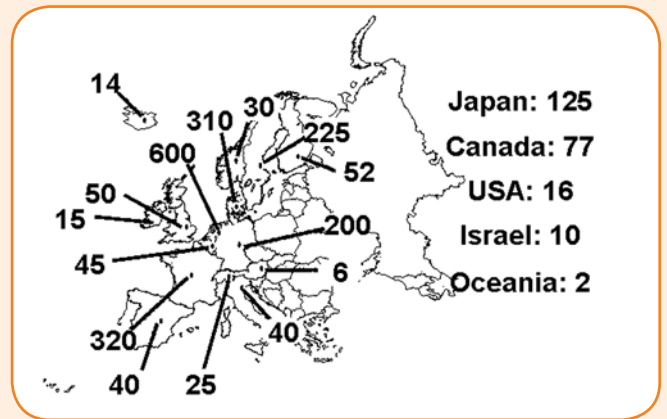
פרק זה מכיל סקירת המחקרים שהייתי אחראי עליהם בארץ. יש כמובן מחקרים נוספים שבוצעו בארץ, על ידי חוקרים נוספים ועדיין יש מקום לשיפור, לשכלול ולמחקר יישומי בתחומי תכנון הרפת הרובוטית וניהולה

א. מבנה הרפת - סככה פתוחה או תאי רביצה

ב. תכנון הרפת ומיקום הצינור

ג. הזנה בתנאי ישראל (ללא מרעה)

ד. הבנת הקשר בין המקום ההיררכי של הפרה בעדר לבין הגעתה לרובוט



קצב הגידול משנת 92 ועד דצמבר 2005

מבנה הרפת - סככה פתוחה או תאי רביצה, 2000-2004

עד שנת 2000, כמעט כל הרובוטים הותקנו ברפתות עם תאי רביצה. בזמנו הייתה סברה שרובוט יעבוד היטב רק עם תאי רביצה, בגלל שבשטח קטן (בתאי רביצה יש פחות שטח לפרה), הפרות קרובות יותר לרובוט, שומעות ורואות את הפרות האחרות נכנסות לרובוט, פרה היא חייית עדר. בנוסף, נוח יותר להוליך פרה סרבנית לאורך התאים.

על מנת להוכיח או להפריך טענה זו, ביצעתי ניסוי סימולציה של פרות בסככה פתוחה. ניסוי הסימולציה היה מבוסס על נתוני התנהגות של פרות במרעה, בנוסף לנתונים מסככת תאי רביצה וסככה פתוחה (גם במרעה הפרות הולכות הרבה עד לרובוט, אבל הן רגילות ללכת יותר והן בתנאים אחרים). מבחני התקפות למודל הסימולציה נערכו בהזדמנות הראשונה שהגיע רפתן שביקש במפורש לתכנן סככה לרובוט ללא תאי רביצה.

הרפת הראשונה בעולם שתוכננה מראש לרובוט ללא תאי רביצה (משק קרמר במושב יבנאל, בישראל). הבעיה נפתרה, לפחות חלקית, על ידי צינור באזור הרובוט עם שערים חד כוונים, מאביס צמוד לרובוט, מברשת לגב, ואבני לקיקה - בקיצור ממשק תומך הגעה לרובוט.

הרפת תוכננה בשנת 2000, נבנתה ואוכלסה עד 2002, המאמר פורסם ב-2004 (Halachmi, 2004, Journal of dairy Sci) ומאז, בתנאי אקלים חם, לא ראיתי תכנון חדש לרפת רובוטית עם תאי רביצה.

2004-2006 הזנה בתנאי ישראל (לא מרעה)

במסגרת מחקר - "ממשק הזנה מיטבי לרובוט חליבה בישראל" - שמטרתו הייתה תכנון מזון מתאים להאבסה ברובוט ובמאביס הסמוך לרובוט, בנפרד מהבליל שבאבוס, נערכו ארבעה ניסויים: בשנה

הראשונה (2004) החלפנו רכיב עמילני בכופתית בקליפות סויה. ממוצע צריכת המזון ברובוט הייתה עד 5.5 ק"ג לפרה ביום. מהתוצאות הסקנו שהחלפת הרכיב העמילני בקליפות סויה לא פגעה בהתנהגות הפרות - מספר הביקורים ברובוט לא ירד.

בניסוי השני (2005) והשלישי (2006) הוספנו מזון מרוכז עד ל-14 ק"ג מזון מרוכז ברובוט ובמאביס, לפרה ליום, על מנת לעודד פרות שמניבות יותר. 60 פרות הוחזקו ברפת רובוטית, חולקו אקראית לשתי קבוצות הזנה - בקבוצת הניסוי הוחלף הרכיב העמילני בכופתיות בקליפות סויה.

לקחי מחקר זה היו

1. פותח ממשק הזנה יציב - מספר חליבות אינדיווידואלי, כמות מזון אינדיווידואלית בכל חליבה - ויתר ההגדרות הניהוליות הנדרשות בתכנת הרובוט.

2. נלמד ונבחר הרכב בליל וכופתית עתירת דופן תא, המתאימים לתנאי ממשק רובוטי ישראלי.

3. החלפת הרכיב העמילני בכופתית לא פגע במספר החליבות או בביצועי הפרות ולכן, אפשר להקצות יותר מזון מרוכז לפרות כלכליות, עם פחות חשש ממחלות מטבוליות ומירידה בצריכת המזון.

בניסוי זה, הפרות בקבוצת הביקורת הניבו ממוצע כ-32.6 ק"ג חמ"מ

בזמנו הייתה סברה שרובוט יעבוד היטב רק עם תאי רביצה, בגלל שבשטח קטן (בתאי רביצה יש פחות שטח לפרה), הפרות קרובות יותר לרובוט, שומעות ורואות את הפרות האחרות נכנסות לרובוט

והפרות בקבוצת הניסוי הניבו ממוצע כ-35.5 ק"ג חמ"מ. קבוצת הניסוי הניבה באופן מובהק יותר חלב, ק"ג שומן, וחמ"מ (2.9 ק"ג חמ"מ לפרה ליום) מאלו של פרות הביקורת. לא היה הבדל מובהק בין הקבוצות בתגובת חלבון, לקטוז, ותאים סומטיים בחלב. היה הבדל מובהק במשקל גוף, פרות הניסוי ירדו במשקלם יותר מפרות הביקורת.

ג. תכנון הרפת ומיקום צינור, 2007-2009

ברפת רובוטית בישראל, בנוסף לתרמו-רגולציה, הצינור יכול לשמש למשיכת פרות לרובוט. הצינור צריך להיות ממוקם באזור הרובוט. בניסויים הראשונים מיקמנו את הצינור לפני הרובוט ואת המזון המרוכז אחרי הרובוט. שניהם, בנוסף למברשת גירוד גב הפרה, אבני לקיקה, חלוקת יתר של בליל בקצה האבוס שליד הרובוט - מהווים מוקד משיכה אפשרי. שיטת תכנון זו הועתקה לרפתות האחרות. לעתים עם שערים חד כיוונים המכוונים פרה, שבאה להצטנן, לצאת רק דרך הרובוט ולפעמים גישה חופשית - ללא שערים חד כיוונים. לעתים, נוצר "פקק" לפני הרובוט. ב-2009 התחלנו ניסוי שתפקידו לענות על השאלה - האם הפקק הזה הוא בעייתי? אילו נמקם את הצינור אחרי הרובוט, במדוך, ללא צינור בכניסה לרובוט, נקבל זרימת פרות טובה יותר דרך הרובוט?

"לפני הרובוט", נתפס טוב יותר על ידי הפרה והרפתן, פשוט יותר להבנה. אחרי הרובוט - מונע היווצרות פקק בכניסה והצינור עובר לאזור האוכל. הניסוי רק התחיל, במשק פרי במושב גילת, 2009.

ביצענו סימולציה של השפעת מקומה בעדר. האם צינון ביציאה מהרובוט (ולא בכניסה, כרגיל) ישחרר את "הפקק"? האם פרה חלשה בעדר, פרה שלא יכולה "להידחק" לראש התור תתעכב בדרכה לחליבה, האם העיכוב הוא משמעותי? בטבלה 3. רואים את זמן ההמתנה בתור, בדקות, של שלוש פרות מאפיינות:

עשירון אמצעי (ב') - פרה חזקה מעשירון ג' אבל חלשה מעשירון א'. פרה מעשירון נמוך (ג) - פרה חלשה מפרות א' ומפרות-ב'. ההבדל בין סוגי הפרות יצא מובהק. בממוצע, ביום רגיל ללא תקלה ברובוט, פרה חלשה תמתין כשעה יותר, בהשוואה לפרה חזקה בעדר. ביום עמוס, למשל בגלל תקלה, פרה חלשה תמתין כ-4 שעות יותר מפרה חזקה. הנושא אינו לגמרי שחור ולבן - בתצפית ראינו שפרה חלשה יכולה לתזמן את הגעתה לרובוט ללא תור, כאשר הרובוט ריק. אבל בשלב תכנון הרפת, יש לתכנן את נצילות הרובוט בהתאם, על מנת להשאיר מספיק זמן פנוי בשעות מסוימות לפרות חלשות "להתגנב" פנימה.

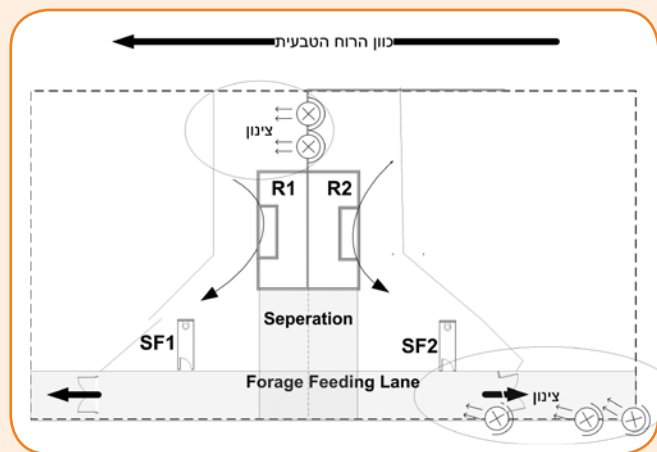
בעיות לא פתורות

א. פיתוח רובוט לרפתות גדולות (אלפי פרות) - זרועות חליבה מהירות, במכון קרוסלה, או שורת זרועות לרוחב הרפת כמו בכביש אגרה, או כל צורת מכון אחרת. אני מכיר חברה אחת שעובדת על זה וסביר להניח שעוד כמה חברות עובדות על זה. ברפת גדולה יש להתנתק מהתלות בהתנהגות הפרה.

ב. קצב קליטת טכנולוגיה בחקלאות ובמקרה הפרטי של הרובוט - מהו פרופיל הרפתן שעלול להחזיר רובוט?

למי למכור רובוט ולמי לא?

הרובוט ניתק את המגע היומי של הרפתן עם הפרה בעת החליבה. במקום לחוש את הפרה בקצוות ואצבעותיו-הרפתן נזקק למחשב ולכריית נתונים. איזה חקלאי יצליח עם הרובוט ואיזה עלול להיכשל? האם זה תלוי: בגיל הרפתן? במהירות קליטת טכנולוגיה? במספר התקלות ברובוט שקוראות לו לרפת בבהילות, בקלות ההתחברות למחשב ולניהול בעזרת נתונים, כתחליף לקשר פיזי יומיומי עם הפרה.



תכנון ניסוי - היכן הצינון יעיל יותר לפני או אחרי הרובוט?

ד. הבנת הקשר בין המקום ההיררכי של הפרה בעדר לבין הגעה לרובוט (2009)

תכנון הגעה תדיר לרובוט, ללא צורך בהתערבות הרפתן, מבוסס על הבנת התנהגות הפרה. בין יתר ההשפעות על הפרה (מזון, צינון, רצפה, מים וכו'), גם המיקום ההיררכי של הפרה בעדר - משפיע. ניסוי כזה קשה לביצוע בגלל הקושי לאמוד את מקומה החברתי של הפרה בעדר, ללא תצפיות ארוכות ומייגעות. בניסוי שפורסם ב-Halachmi, Biosystem-Engineering Journal 2009 מדדנו את התנהגות הפרות ביבנאל, אבל

בניסויים הראשונים מיקמנו את הצינון לפני הרובוט ואת המזון המרוכז אחרי הרובוט. שניהם, בנוסף למברשת גירוד גב הפרה, אבני לקיקה, חלוקת יתר של בליל בקצה האבוס שליד הרובוט - מהווים מוקד משיכה אפשרי

טבלה 1 - תכנון מול ביצוע -הקצאה לעומת צריכה בפועל של כופתיות ברובוט ובמאביס

הקצאת כופתיות (ק"ג לפרה ליום, ממוצע וסטיית תקן)			
טיפול	סה"כ	במאביס	ברובוט
קבוצת ביקורת	9.5 (0.57)	65.4(0.55)	49.4 (0.06)
קבוצת ניסוי	8.8 (0.67)	00.4 (0.63)	4.82 (0.10)
מובהקות ¹	0.45	0.51	0.27
צריכת כופתיות בפועל (ק"ג לפרה ליום, ממוצע ושגיאת תקן)			
טיפול	סה"כ	במאביס	ברובוט
קבוצת ביקורת	8.3 (0.57)	4.55 (0.59)	3.73 (0.21)
קבוצת ניסוי	8.3 (0.69)	3.91 (0.62)	4.42 (0.22)
מובהקות ¹	0.96	0.46	0.03

1 מבחן מובהקות נערך בשיטת t-Test. תוצאה מובהקת (p<0.05) מודגשת

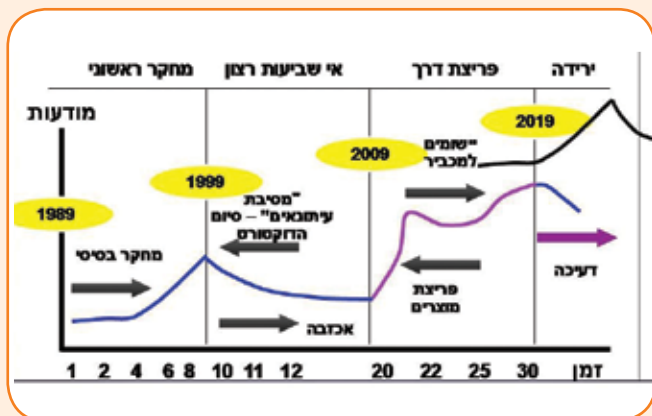
טבלה 2 - תנובה ממוצעת בתקופת הניסוי (ממוצע-ושגיאת תקן בסוגריים)

טיפול	חלב (ק"ג)	שומן (ק"ג)	חלבון (ק"ג)	חמ"מ (ק"ג)
ביקורת	(1.35) 34.26	(0.04) 1.05	(0.04) 1.05	(1.12) 32.63
ניסוי	(1.11) 37.74	(0.03) 1.18	(0.03) 1.12	(0.84) 35.51
מובהקות ¹	0.022	0.011	0.117	0.039

1 מבחן מובהקות נערך בשיטת p-value at paired t-Test תוצאה מובהקת (p<0.05) מודגשת

טבלה 3 - זמן המתנה בתור, בדקות, של שלוש פרות מאפיינות

ANOVA	עשירון			N
	נמוך (ג)	בינוני (ב)	גבוה (א)	
p-value	F (2,297)			
זמן המתנה בתור בדקות				
ממוצע	68.9	10.0	3.5	
סטיית תקן	6.5	0.40	0.11	92.04
	100	100	100	



מודל S אופייני להתפתחות טכנולוגיה המותאם לרובוט
ציר X - זמן בשנים, ציר Y - מודעות

social-economic study, פסיכולוגיה ושילוב דורות, מציע להשאיר אותנו למדינות שמתמחות בתחום הזה (קרוי גם technology transfer) והן עתירות תקציבי מחקר. נושאי בריאות (עטין, צליעות, זוליגת חלב וכ"ו) וטיפול בזבל נוזלי יכולים להילמד בארץ, אבל הבעיה חמורה יותר בחו"ל בסביבת תאי רביצה.

את מעט תקציבי המחקר הזמינים בארץ מציע לרכז בשלושה סוגי מחקרים:

1. הזנה בתנאי מנה כולית בממשק אינטנסיבי וניהול אינדיווידואלי שמאפשר הרובוט, בשילוב חיישנים כגון, מצלמה למצב גופני אוטומטי והרכב חלב אוטומטי.
2. צינון כולי למשיכת פרות לרובוט, וזימון פרות מסוימות באמצעים אחרים.
3. פיתוח רובוט לרפתות גדולות.

הצגתי את השקף הזה, כפי שהוא מוצג כאן, ללא כל שינוי, למעט התרגום לעברית, בהרצאה מוזמנת בכינוס בן-לאומי בשנת 2001. מודל S משמש בהקשר של לימודי קצב קליטת טכנולוגיה חדשה על ידי הציבור. התבנית משותפת לרוב המוצרים, אבל התזמון - מועד כל אירוע - תלוי במוצר, בתחום ובקהל הלקוחות. מחזור החיים של מוצר תכנה או מעבד מחשב, הוא מספר חודשים לעומת עשרות שנים בשוק האנרגיה (דיזל, פחם, מזוט ומוצרים כאלה). בממוצע, החקלאות זריזה יותר מתחום האנרגיה, אבל אטית יותר מתחום מוצרי המחשבים.

מודל S כללי - ראה ספר Roaring 2000s. Haary S.Dent

תודות

ועדת הממשק של קרן המחקר למדעי הבקר לחלב (יו"ר יוסי מלול) המליצה לממן את מחקריי. עזרא שושני, אפרים מלך, שוקי מירון ורון סלומון - חוקרים שותפים במחקרי ההזנה והצינון ברובוט. תודה להלל מלכה (שה"מ) וטל כהן (מנוסה בתכנון וניהול רפת גדולה) על הערות על גבי טיטות המאמר הראשונה. תודות לרפת מכון וולקני ולחקלאים שבמשך השנים אפשרו עריכת ניסויים אצלם בחצר, ובמיוחד לקרמר מיבנאל, גיורא מהעוגן (רפת חפר) ופרי מגילת. תודה לחקלאים שמתקשרים להעלות בעיה. לעתים, כאשר בעיה מאפשרת החלת כלל על הכול, מתוך הבעיות הללו חוקרים בוחרים על מה לרכז

מאמץ מחקרי. ■

האם לרפתנים המורגלים בניהול בעזרת מחשב ונתונים קל יותר לעבור לרובוט? האם הניסיון של הרפתנים הוותיקים שחיים את הפרה - חיוני.

האידיאל זה אבא ובן - האחד מכיר אישית את הפרות ואילו השני מכסה את ההיבטים הטכניים ואת כריית הנתונים וזיהוי מהיר של תהליכים מערכתיים. נערכו סקרים בתחילת ימי הרובוט, כאשר יותר רובוטים הוחזרו לחברות - הסקרים הוזמנו על ידי חברות ולכן נשארו חסויים ולא פורסמו.

ג. מחיר הרובוט - איך להוריד את מחיר הרובוט באופן דרסטי על מנת שמכוני חליבה לא יהיו אלטרנטיבה כלכלית, גם בארצות שבהן העבודה זולה בהרבה מארצות סקנדינביה והולנד.

הרובוט ניתק את המגע היומי של הרפתן עם הפרה בעת החליבה. במקום לחוש את הפרה בקצוות אצבעותיו - הרפתן נזקק למחשב ולכריית נתונים

יתרונות

- א. ברפת משפחתית שאינה מעסיקה פועלים, רובוט מוציא את הרפתן משגרת בור החליבה. ב-1996 הצטרפתי לטכנאי רובוטים שנסע לתקן רובוטים. בזמן התיקון, שוחחתי עם כל רפתן שהגענו אליו. תשובה אחת זכורה לי במיוחד - הוא אמר - "העבדות הסתיימה באפריקה ובאמריקה - רק בהולנד העבדות לא הסתיימה. על מנת להפסיק להיות עבד לרפת - רכשתי רובוט".
- ב. עניין טכני ניהולי המשמש גם למשיכת הדור הבא.
- ג. ממשק אינדיווידואלי - תדירות חליבת פרה בהתאם לביצועי הפרט ופיצוי אנרגטי ברמה האינדיווידואלית.

מחקרי המשך

את בעיות שילוב הרובוט ברפת בתנאי מרעה וממשק אקסטנסיבי, מציע להשאיר למדינות אחרות - עמיתי מחקר עובדים על זה בניו-זילנד ובאירופה. נושא קצב קליטת טכנולוגיה בחקלאות, שייך לתחום



תור בכניסה לרובוט חליבה