

אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
הפקולטה למדעי ההנדסה
המחלקה להנדסת תעשייה וניהול



שיתוף פעולה אדם-רובוט:
בחינת מדדי ביצוע של אוכלוסיות שונות
בעבודה עם מערכת רובוטית ופיתוח מודל
מסווג עבורן

חיבור זה מהווה חלק מהדרישות לקבלת תואר מגיסטר בהנדסה

מאת: ליאור סייפלד
מנחה: פרופ' יעל אידן

אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
הפקולטה למדעי ההנדסה
המחלקה להנדסת תעשייה וניהול



שיתוף פעולה אדם-רובוט:
בחינת מדדי ביצוע של אוכלוסיות שונות
בעבודה עם מערכת רובוטית ופיתוח מודל
מסווג עבורן

חיבור זה מהווה חלק מהדרישות לקבלת תואר מגיסטר בהנדסה

מאת: ליאור סייפלד
מנחה: פרופ' יעל אידן

חתימת המחבר: _____

חתימת המנחה: _____


חתימת יו"ר וועדת תואר שני מחלקתית: _____

יוני 2017

תודות

ברצוני להביע תודה מקרב לב לפרופ' יעל אידן שליוותה אותי מהשנה הרביעית לתואר הראשון ולמשך כל התואר השני, דרך פרוייקט הגמר ועד הגשת התיזה. הידע והניסיון הבלתי נגמרים של יעל סייעו להשלמת מחקר משמעותי. אני מודה ליעל על ההקשבה, על הביקורתיות והמשובים הנחוצים שתרמו כל כך לאורך כל הדרך. אופייה של יעל, אופן העבודה איתה והיד החופשית שהיא נותנת מאפשרים ללמוד ממנה הרבה ולהתפתח הן מחקרית והן מקצועית.

בנימה אישית, יעל היה לי העונג לעבוד אתך, לקחתי ממך הרבה דברים להמשך הדרך, מקווה שעוד ניפגש בהמשך.

כמו כן הייתי רוצה להודות לצוות הטכני האינטגרלי של המחלקה ובעיקר ליוסי וניסים שתמיד עזרו והיו שם לכל בקשה טענה ומענה.

ליאור סייפלד

המחלקה להנדסת תעשייה וניהול

אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

באר שבע, 2017

תקציר

בכדי להוציא לפועל מערכת של שיתוף פעולה בין אדם לרובוט יש להתחשב במספר גורמים שיאפשרו עבודה חלקה בין השניים. האתגר העיקרי הוא לתכנן את פעולת הרובוט כך שתהיה לעזר לאדם ותביא להשלמת המשימה בצורה הטובה ביותר תוך כדי עבודה משותפת. מחקר זה עוסק בחקר מדדי הבצוע של אוכלוסיות שונות כאשר הן משתפות פעולה עם רובוט ומנסה להבין האם ניתן להשתמש במדדים אלו במטרה לפתח כלי לסיווג האדם לאוכלוסייה מסוימת תוך כדי עבודה עם הרובוט. מחקר מקביל למחקר זה (פרץ, 2017) התמקד בפיתוח אלגוריתם מסתגל לאוכלוסייה בהתאם לניסיון האדם. בכדי להקנות לרובוט יכולת התאמה לאדם מולו הוא עובד יש צורך לפתח אלגוריתמים מסתגלים שידעו לשנות את אופן העבודה של הרובוט בהתאם לאופן העבודה של האדם מולו הוא עובד.

במחקר זה פותחה ועוצבה מערכת רובוטית בשילוב אדם ונבחנו ביצועיה בזמן-אמת. המערכת שפותחה מדמה עמדת הרכבה במפעל בו לאדם יש משימת הרכבה הדורשת משאבים קוגניטיביים. המשימה מתבצעת תוך כדי עבודה שוטפת אל מול שני רובוטים אליהם האדם צריך להעביר חלקים הדרושים להם להמשיך עבודתם. פיתוח המערכת התבסס על תהליך מסודר שכלל מספר שלבים. בחלקו הראשון של המחקר גובש מסמך איפיון המערכת שהיווה את הבסיס לפיתוח. לאחר מכן הוקמה עמדת העבודה, הוחלט על משימת ההרכבה שיבצע האדם ומה יהיה סוג שיתוף הפעולה. לבסוף תוכנן ניסוי שנערך בהשתתפות 163 סטודנטים במחלקה לתע"נ ו-44 תלמידים בגילאי 13-14. מטרת הניסויים שנערכו במערכת הייתה לבחון את מדדי הביצוע של אוכלוסיות הנבדלות זו מזו במין (זכר, נקבה) וגיל (ילדים מול מבוגרים) ולהבין האם יש הבדלים בביצועים ובאופן העבודה של כל אוכלוסייה. מדדי הביצוע שנבחרו היו זמני ההרכבה של 4 המשימות הראשונות, זמני הבטלה הכוללים של שני הרובוטים ומספר האינטראקציות הכולל של הנסיינים עם הרובוטים.

התוצאות הראו הבדלים מובהקים בין נשים וגברים במספר האינטראקציות עם הרובוט ובזמני הבטלה הכוללים של הרובוטים בעמדה (נשים ביצעו טוב יותר). כמו כן נרשמו הבדלים בזמני הביצוע של משימות ההרכבה הראשונות (גברים ביצעו מהר יותר). גם בין מבוגרים לילדים נרשמו הבדלים בעיקר בזמני הביצוע של משימות ההרכבה הראשונות בהן ילדים ביצעו מהר יותר ממבוגרים.

על בסיס התוצאות שהתקבלו מהניסויים נבנה מסד נתונים שאפשר בניית מודל סטטיסטי שמטרתו לסווג תוך כדי עבודה את סוג משתף הפעולה לאוכלוסייה אליה הוא שייך (מבוגר/ילד, נשים/גברים). מחקר זה מהווה תשתית למחקרי המשך שיוכלו להשתמש בכלי

כזה בכדי לפתח אלגוריתמים שידעו להתאים פרמטרים בעבודתם על סמך הסיווג של המשתמש. מודל הסיווג נבדק בעזרת 25 נבדקים (16 סטודנטים מבוגרים ו 9 ילדים) שעברו את הניסויים שבוצעו במסגרת המחקר והציג 64% הצלחה בסיווג האדם לאוכלוסייה אליה הוא משתייך (ילדים/מבוגרים, גברים/נשים).

חלקים ממחקר זה הוצגו במספר כנסים:

- Sayfeld L, Peretz Y., Someshwar R., Edan Y. (2014), Evaluation of human-robot collaboration models for fluent operations in industrial tasks, RSS 2015 - July 17, 2015 - Sapienza University of Rome.
- Sayfeld L, Peretz Y., Someshwar R., Edan Y. (2014), Evaluation of human-robot collaboration models for fluent operations in industrial tasks, ICR 2016 – 5th Israeli Conference of Robotics, April 2016, Herzelia

מאמר מתקדם נמצא בשלבי הכנה לשליחה לעיתונות מבוקרת:

Sayfeld L, Peretz Y., Someshwar R., Edan Y. Performance evaluation of different populations in human-robot collaborative systems.

מחקר ראשוני בוצע בפרויקט הגמר בתשע"ה:

Sayfeld L, Peretz Y. 2014. Testing an adaptive robot using human-robot collaboration models. Final Project. Department of Industrial Engineering and Management, BGU

מחקר זה התבצע במקביל למחקר של (פרץ, 2017) שעסק בבחינת אלגוריתם מסתגל לניסיון האדם במערכת המשלבת אדם רובוט. הניסויים שבוצעו במחקר זה בוצעו במקביל לניסויים שבוצעו במחקרו של (פרץ, 2017) על אותה מערכת רובוטית ובאותה עמדת עבודה אך עם משימות ואלמנטים שונים. המערכת הרובוטית ועמדת העבודה פותחו באופן משולב. המחקר המקביל עסק בבחינת מדדי ביצוע של משתפי פעולה מנוסים בעבודה עם רובוט אל מול כאלו שלא התנסו בעבודה כזו מעולם. מדדי הביצוע שנבחנו דומים לאלו שנבחנו במחקר זה.

פרץ י. 2017. שיתוף פעולה אדם רובוט - בחינת מודל מסתגל לניסיון האדם. עבודת מאסטר. המחלקה להנדסת תעשייה וניהול. אוניברסיטת בן-גוריון בנגב.

תוכן עניינים

1	מבוא	1
2	תאור הבעיה	1.1
2	מטרת המחקר	1.2
3	חדשנות ותרומה עיקרית	1.3
3	מבנה העבודה	1.4
4	סקר ספרות	2
4	מערכות ייצור גמישות FMS-	2.1
4	מערכות ייצור משולבות מחשב- CIM	2.2
5	אוטומציה	2.3
6	תהליכי הרכבה בייצור	2.4
6	רובוטיקה	2.5
7	הרובוט	2.6
9	רכיבי זיהוי וחישה	2.7
9	עקרונות ושלבי עבודה בתכנון תא עבודה רובוטי	2.8
12	שת"פ אדם רובוט	2.9
12	שת"פ אדם רובוט - יתרונות	2.10
14	רמות שת"פ	2.11
14	מודלים לשת"פ	2.12
15	העברות - HANDOVERS	2.13
15	מסירה מאדם לאדם	2.14
16	מסירה בין אדם לרובוט	2.15
17	למידה במערכות משולבות רובוטים	2.16
17	אלגוריתמי למידה (MACHINE LEARNING)	2.17
18	טכניקות למידה של רובוטים	2.18
20	רובוטים חברתיים	2.19
21	אדפטיביות (הסתגלות) הרובוט לאדם	2.20
23	השפעת סוג האוכלוסייה על דפוסי עבודה מול מערכת רובוטית	2.21
24	הבדלים בין גברים לנשים- תפיסה מרחבית ותפיסת הרובוט	2.22
24	הבדלים בין ילדים למבוגרים – השפעת הגיל על דיוק	2.23
25	קבלת החלטות בסביבה דינמית	2.24
26	שיטת העבודה	3
26	סקירה כללית - מבט על	3.1

27	תכנון הניסוי	3.2
33	אלגוריתם לפעולת הרובוט	3.3
33	נבדקים	3.4
34	מדדי ביצוע	3.5
34	הרצת הניסויים	3.6
34	מהלך הניסוי	3.7
36	שיטת הניתוח	3.8
36	מודל הסיווג	3.9
42	תוצאות	4
42	הבדלים- נשים מול גברים	4.1
45	הבדלים - ילדים מול מבוגרים	4.2
49	סיכום ודיון על התוצאות	4.3
49	תוצאות – ניסוי תיקוף	4.4
53	דיון ומסקנות	5
54	מגבלות המחקר	5.1
54	מחקר המשך	5.2
56	ביבליוגרפיה	6
60	נספחים	7
60	נספח א' - מפרט רובוט – SCORBOT ER4U	7.1
63	נספח ב' - סטטיסטיקות (SPSS)	7.2
95	נספח ג' - קוד תוכנית ++C הפעלת הרובוט	7.3
106	נספח ד' - נתוני ביצוע כפי שנאספו בעמדה	7.4
110	נספח ה' - קוד C# עבור תוכנית שעון	7.5
114	נספח ו' - תוצאות השאלונים	7.6
118	נספח ז - פרוטוקול ניסוי	7.7
119	נספח ח' - טופס הסכמה להשתתפות בניסוי	7.8
120	נספח ט' - טופס אישור הועדה לביצוע ניסויים במחלקה	7.9
125	נספח י' - הזמנה להשתתפות בניסוי	7.10
126	נספח כ' - מדריך לפתיחת פרוייקט חדש	7.11
127	נספח ל' - תוצרי פרוייקט נוספים	7.12

רשימת תמונות

5	תמונה 1 - רמות אוטומציה
13	תמונה 2 -יתרונות וחסרונות אדם מול רובוט
13	תמונה 3 - סביבות עבודה
13	תמונה 4 - גרף שיפור יעילות
16	תמונה 5- העברות אדם לאדם
16	תמונה 6- העברה בין אדם לרובוט
21	תמונה 7 - מגדל קוביות
21	תמונה 8 - עמדת העבודה
22	תמונה 9 -העברות אדם לאדם
22	תמונה 10 - העברות אדם לרובוט
22	תמונה 11 - רובוט נייד
22	תמונה 12 - תרשים תנועה
23	תמונה 13 - רובוט שף חברתי
23	תמונה 14- שיחה בין רובוט לאדם
28	תמונה 17- תרשים טכני SCORBOTE
29	תמונה 18- מסך אפליקצית שליטה
30	תמונה 19 -עמדת עבודה מבט על
31	תמונה 20 - לוח הרכבה
31	תמונה 21 - קלף משימה
31	תמונה 22 - הרכבה עבור רובוט שמאל
31	תמונה 23 - הרכבה עבור רובוט ימין
32	תמונה 24 - עמדת העבודה
32	תמונה 25 - חיישן IR
32	תמונה 26 - בקר A2D
33	תמונה 27 -תרשים זרימה
35	תמונה 28 - GUI אפליקציית שעון
36	תמונה 30 -תרשים זרימה שלבי ניסוי

רשימת טבלאות

20	טבלה 1- חולשות וחוזקות של אלגוריתמי למידה
20	טבלה 2- טכניקות למידה חוזקות חולשות
20	טבלה 3 - טכניקות למידה - חוזקות חולשות
26	טבלה 4 - ניסויים שבוצעו
38	טבלה 5-Omnibus Tests of Model Coefficients
39	טבלה 6- Model Summary
40	טבלה 7- Classification Table
40	טבלה 8 - תרומה למודל
42	טבלה 9 - שלבי הניסוי
42	טבלה 10 - טבלת ANOVA אינטראקציות
42	טבלה 11 - טבלת ANOVA משימה 1
42	טבלה 12- טבלת ANOVA זמן בטלה
43	טבלה 13 - פלט SPSS
43	טבלה 14 - טבלת ANOVA זמן ביצוע קלף 1
43	טבלה 15 - טבלת ANOVA זמן ביצוע קלף 2
43	טבלה 16 - טבלת ANOVA משימות מוצלחות
43	טבלה 17 - פלט SPSS ילדים מבוגרים
43	טבלה 18 - זמני הרכבה כוללים
43	טבלה 19 - זמני בטלה כוללים
43	טבלה 20 - ממוצע משימות מוצלחות
43	טבלה 21 - מספר אינטראקציות עם הרובוטים
43	טבלה 22 - תוצאות ניסוי
47	טבלה 23- אחוזי הצלחה סיווג
50	טבלה 24 - טעויות מול הצלחות

1 מבוא

1.1 כללי

בעידן הטכנולוגי המשתנה בתדירות גבוהה ומהירה ישנה חשיבות רבה לפיתוח ויישום טכנולוגיות חדשות שיביאו איתן מערכות גמישות בעלות יכולת התאמה גבוהה שיאפשרו ייצור יעיל. תוך כדי ייצור לעיתים נדרשות עבודות שמשלבות משימות רגישות (דוגמת גמישות לטיפול במצבים שונים שלא ידועים מראש וקשה מאוד לחזות) שחייבות להתבצע ע"י ידיים אנושיות ולכן לא ניתנות לביצוע ע"י מכונה, ומנגד משימות שמחייבות התערבות מכונה עקב דרישות הדיוק, כך נוצר הצורך בפעילות משותפת של שני הגורמים בכדי להביא להשלמת המשימה. אחת הדרכים לעשות זאת היא ליצור מערכות שמשלבות בני אדם ורובוטים בתהליכי הייצור. הקשר ההדוק בין האדם והרובוט במשימות הרכבה משותפת חייב להשתמש ביתרונות של שני הצדדים על מנת לבצע אותה ביתר יעילות (Krüger et al., 2009). לעובד האנושי מספר מגבלות ארגונומיות שרובוט יכול לבצע ביתר קלות ומנגד הגמישות האנושית בעמידה במצבי קיצון חזקה יותר מזו של הרובוט, לכן פלטפורמה שמשלבת את שניהם יכולה לרקום יתרונות שישפיעו לטובה על הייצור. במסגרת מחקר מקדים (Someshwar, Meyer, & Edan, 2010) פותחו שלושה מודלים עיקריים לשיתוף פעולה כזה. המודל הראשון והפשוט ביותר הוא מודל המבוסס על זמנים קבועים בו הרובוט מתפקד עפ"י זמנים שנקבעו מראש. המודל השני מבוסס חיישנים כך שהרובוט מתפקד ע"י ניתוח האותות שמגיעים אליו מהחיישנים בסביבתו. המודל השלישי הוא מודל מסתגל (אדפטיבי) בו הרובוט יודע להתאים את עצמו לאדם ע"י שימוש בכלים סטטיסטיים וחזויים. שלושת המודלים יושמו במטלות בזמן אמת במערכת משולבת אדם – רובוט במסגרת מחקר קודם (Sayfeld et al., 2014). במחקר הנוכחי הורחב היישום והותאם לבחינת ביצועים של סוגי אוכלוסיות שונות שבעזרת תוצאותיה פותחו מודלים לחיזוי סוג האוכלוסייה תוך כדי עבודה במטרה בעתיד לפתח אלגוריתם המתאים לסוג האוכלוסייה.

האלגוריתם האדפטיבי שפותח במחקר קודם (Sayfeld et al., 2014) בוסס על שיטות סטטיסטיות שכללו ממוצעים משוקללים ורגרסיות לחיזוי פעולת האדם על בסיס מדדי ביצוע שנאספו תוך כדי העבודה במטרה שפעולתו הבאה של הרובוט תהיה מיטבית. היתרון של האלגוריתם מתבטא בעיקר בהתמודדות שלו עם מצבי קיצון כגון: שינוי קיצוני בקצבי עבודה, הפסקת עבודה יזומה או הכרחית, סוגים שונים של משתפי פעולה שעובדים באופנים שונים ועוד. עבור כל מצב האלגוריתם יגיב בצורה שונה בכדי לצמצם פגיעה בתפוקה ויעילות העמדה. לעומת זאת בעבודה מחזורית וקבועה נעדיף להשתמש במודלים פשוטים מפאת ניצול משאבי מערכת וחישובים מיותרים. לכן, נראה שפיתוח מערכת משולבת שבה ניתן

יהיה להפעיל אלגוריתם בהתאם לתנאים המשתנים ייתן מענה מיטבי. בניסויים שהורצו בעבודה קודמת שנעשתה בנושא (Sayfeld et al., 2014) נמצא כי עבודה עם אלגוריתם אדפטיבי משפרת מדדים כמו זמן הרכבה וזמן בטלה לעומת האלגוריתמים האחרים. מטרת המחקר הנוכחי הוא לבחון השפעת סוגי אוכלוסיות שונות על מדדי הביצוע בשת"פ אדם-רובוט ולגלות האם יש במדדי הביצוע מאפיינים שונים לכל אוכלוסייה ומהם ההבדלים ביניהן. על בסיס המאפיינים המטרה בטווח הרחוק היא לפתח מודלי חיזוי שיאפשרו פיתוח אלגוריתמים אדפטיביים מתוחכמים יותר שיתאימו את עצמם לסוג האוכלוסייה לאחר הזיהוי. רובוט ש"יבין" שהוא עובד אל מול סוג אוכלוסייה ספציפי ידע להתאים פרמטרים מסוימים כך ששיתוף הפעולה יתבצע בצורה יעילה וחלקה יותר.

העבודה התמקדה במציאת ההבדלים במדדי הביצוע והמאפיינים של כל אוכלוסייה בשת"פ עם רובוט במשימת הרכבה. האוכלוסיות שנבדקו הן ילדים מול מבוגרים ונשים מול גברים.

1.2 תאור הבעיה

שיתוף פעולה בין שני בני אדם נראה מאוד אינטואיטיבי, לעומת זאת שיתוף פעולה בין אדם למכונה (רובוט במקרה שלנו) הוא הרבה יותר מסובך וטומן בחובו מספר בעיות ואתגרים שיש לחקור ולנסות למצוא להם פתרונות. אחת הבעיות היא המגוון באוכלוסיות כאשר הן משתפות פעולה עם הרובוט, לכל אוכלוסייה יש את המאפיינים ושיטות העבודה שלה דבר שמקשה על תכנון פעולת הרובוט כך שתהיה מיטבית לכולם. על מנת להפוך את הרובוט ל"אנושי"/"חכם" יותר, כזה שמזכיר יותר ויותר את ההתנהגות האנושית, יש צורך לנסות לבחון ולהבין תוך כדי עבודה מי עומד מולו וכך לנסות להתאים את הפעולות לסוג משתף הפעולה. ממחקרים קודמים ידוע שיש שונות בין גברים ונשים ובין מבוגרים לילדים באלמנטים שיכולים להשפיע על אופן העבודה, מחקרים שונים (Voyer, & Bryden, 1995; Feng, ; Kimura, 1999; Terlecki & Newcombe, 2005) הצביעו על הבדלים ברורים מבחינת הקוגניציה המרחבית (תפיסה מרחבית) בין נשים לגברים. כמו כן ממחקר שנעשה באוניברסיטת מרילנד (Hourcade et al., 2004) ידוע שיש שונות במדדי הביצוע בין מבוגרים לילדים במשימות של הצבעה עם עכבר (Pointing task with mice).

1.3 מטרת המחקר

מטרת העל של המחקר היא לזהות האם יש הבדלים מבחינת מדדי הביצוע בין סוגי אוכלוסיות בעבודה עם רובוט. על בסיס הבדלים אלו בוצעה היתכנות לנסות לפתח מודל מסווג שיידע לסווג את משתף הפעולה בזמן אמת. המטרה היא להביא את הרובוט למצב בו הוא יודע לסווג את האדם העובד מולו לאחת מסוגי האוכלוסיות באחוזי הצלחה גבוהים. זאת על מנת שבעתיד אלגוריתמים אדפטיביים ישתמשו בכלים כאלו על מנת לשנות

פרמטרים בעבודתו של הרובוט וכך ליצור מערכת של שיתוף פעולה רציף, אינטואיטיבי ויעיל בינו לבין משתף הפעולה. העבודה התמקדה בבחינת שתי סוגי אוכלוסיות: גברים/נשים, ילדים/מבוגרים.

1.3.1 השערות המחקר

1. קיימים הבדלים משמעותיים בין גברים ונשים מבחינת מדדי הביצוע שלהם כאשר משתפים פעולה עם רובוט במשימת הרכבה.
2. קיימים הבדלים משמעותיים בין ילדים ומבוגרים מבחינת מדדי הביצוע שלהם כאשר משתפים פעולה עם רובוט במשימת הרכבה.
3. ניתן לזהות תוך כדי עבודה לאיזה סוג אוכלוסייה משתייך משתף הפעולה.

1.4 חדשנות ותרומה עיקרית

מחקר זה עוסק בשני תחומים עיקריים, בחינת סוגי אוכלוסיות באינטראקציה ושיתוף הפעולה בין האדם לרובוט ושילוב של שיטות למידה חישובית (MACHINE LEARNING) בפיתוח מודלי סיווג לסוגי אוכלוסיה בכדי שיוכלו להשתלב בעתיד בפיתוח של אלגוריתמים אדפטיביים לפעולת הרובוט. עיקר חדשנותו ותרומתו של מחקר זה הוא:

- פיתוח עמדת עבודה המשלבת מערכת רובוטית המאפשרת עבודה בשת"פ אדם רובוט, המערכת תשמש למחקרי המשך והרחבת למידת התחום של שת"פ אדם רובוט במחלקה.
- שילוב שיטות למידה חישובית שתופסות תאוצה גדולה מאוד ברחבי התעשייה (רובוטיקה בפרט) ובכל תחום הבינה המלאכותית שהוא נושא שנמצא בקדמת הטכנולוגיה בימים אלו.

1.5 מבנה העבודה

לאחר שפרק זה הציג מבוא למחקר, הפרק הבא מציג סקירת ספרות מקיפה, בה נסקרים מושגים מרכזיים בתחום הרובוטיקה ומוצגים מגוון מחקרים שנעשו בתחומי שיתוף הפעולה בין אדם לרובוט. כמו כן נסקרות גישות ושיטות למידה של רובוטים. בנוסף הפרק עוסק בבחינת סוגי אוכלוסיות ומציג מחקרים ומסקנות שהתקבלו בנושא. הפרק השלישי סוקר בפירוט את שיטת העבודה והאופן בה הוצאה לפועל. תחילה מפורט שלב האפיון של המערכת הניסויית דרך שלב הניסויים, ניתוח התוצאות ודיון עליהן, פיתוח המודלים ותיקופם. לבסוף מוצגות מגבלות המחקר וכן ניתנות המלצות למחקר עתידי.

2 סקר ספרות

2.1 מערכות ייצור גמישות - FMS

מערכת ייצור גמישה (flexible manufacturing system -FMS) מסוגלת לייצר בו-זמנית מגוון רחב של סוגי חלקים שונים בנתיבי ייצור חלופיים (Seifert & Morito, 2001). מערכת כזו בד"כ כוללת מספר מכונות ייצור אוטומטיות בעלות יכולת החלפה אוטומטית של כלי עיבוד, אמצעי שינוע לצורך העברת חלקים בין המכונות, רובוטים ו/או מניפולטורים לצורך טעינת ופריקת המכונות, ומחסן אוטומטי. המערכת כולה מבוקרת מחשב ויש בה מידה מסוימת של גמישות המאפשרת למערכת להגיב במקרה של שינויים, בין אם חזוי או צפוי (Groover, 1987). גמישות זו מתחלקת לשתי קטגוריות עיקריות, אשר הן מכילות קטגוריות משנה רבות. הקטגוריה הראשונה, גמישות המכונה, מכסה את יכולתה של המערכת להיות שונה כדי לייצר סוגים של מוצרים חדשים, ואת היכולת לשנות את סדר הפעולות המתבצעות על החלק. הקטגוריה השנייה נקראת ניתוב הגמישות, אשר מורכב מהיכולת להשתמש במכונות מרובות כדי לבצע את אותה פעולה על חלק מסוים, כמו גם היכולת של המערכת לקלוט שינויים בקנה מידה גדול. היתרונות העיקריים של FMS הם (Groover, 1987):

1. יכולת ייצור בתחום רחב של מוצרים.
2. מחיר מופחת ליחידה מיוצרת.
3. תפוקה ניתנת לחיזוי בדיוק רב.
4. איכות ייצור ברמה גבוהה.

מערכות ייצור חייבות להתאים עצמן לשינויים הדחופים בסביבת הייצור בפרט ובשוק הגלובלי בכלל, מערכות FMS שמתוכננות ומופעלות ביעילות מרבית יכולות לעזור ליצרנים בהשגת יעד זה (Li & Zhou, 2006).

2.2 מערכות ייצור משולבות מחשב - CIM

מערכת ייצור משולבת מחשב מוגדרת כצידוד או מערכת שמבוססים על מחשב ומסייעים להשיג אוטומציה של ייצור במפעל. ייצור בעזרת מערכת CIM הוא תהליך משולב שמתחיל עם עיצוב המוצר ומסתיים עם מכירת המוצר ללקוח (Bozdag et al., 2003). עם התפתחות הטכנולוגיה מערכות יצרניות רבות, הפועלות בתחום של שיווק, מכירות, כספים חומרים וכ"א, מבינות ומכירות את הצורך של הטמעת טכנולוגיות ממוחשבות בארגון (Bozdag et al., 2003). שילובו של המחשב בתחומים תעשייתיים מסורתיים ובתחום האוטומציה והרובוטיקה בפרט הוא הגורם המרכזי להתחדשותו המהירה של הענף (Groover, 1987). רובוטים מבוקרי מחשב, בקרים מתוכנתים, ורכיבים אלקטרו-פנאומטיים והידראוליים חכמים מהווים מקצת מהאמצעים שפותחו במטרה להביא בסופו

של דבר למחשוב "רצפת" הייצור. המפעל המודרני משלב ברצפת הייצור מערכות מכניות עם מערכות מתקדמות מאוד של בקרה אלקטרונית ומחשוב. מערכות הייצור המתקדמות של היום משלבות מערכות ייצור גמישות (FMS) ומערכות רצפת ייצור משולבות מחשב (CIM). מערכות אלה קיימות בכל ענפי הייצור השונים הקיימים בשוק, כגון: תעשיות מזון, כימיה, זיקוק, טקסטיל, מתכת ועוד. ההתפתחות הטכנולוגית המתחוללת בענף מחייבת את התאמתו של העובד הקיים כך שיהיה מסוגל להפיק את מירב התועלת מהאמצעים ומהמערכות המתקדמות בתעשייה על מנת להגיע לרמת תפועול ותחזוקה נאותות של מערכות הייצור המודרניות (Groover, 1987).

2.3 אוטומציה

אוטומציה (מיונית עתיקה - "פועל מעצמו") היא שימוש באבזרים מכניים או אלקטרוניים, על-מנת לבצע סדרת פעולות, ברצף מתוכנן, ללא מגע יד אדם. האוטומציה משחררת את האדם מביצוע מטלות רוטיניות, והן מוחלפות באמצעים טכנולוגיים עצמאיים. אוטומציה היא הטכנולוגיה העוסקת ביישום מערכות מכניות, אלקטרוניות, ממוחשבות ומבוססות-מחשב של הפעלה ובקרה על מכונות (Groover, 1987). ישנם מספר רמות של אוטומציה כשהגבוהה ביותר מתייחסת לפעולות שהמחשב מבצע לבדו בהתעלמות מוחלטת מהאדם והנמוכה ביותר מתייחסת לפעולות בהן האדם מחליט הכל והמחשב רק מבצע, להלן 10 הרמות של האוטומציה (Sheridan, 2000):

- | | |
|------|---|
| HIGH | 10. The computer decides everything, acts autonomously, ignoring the human.
9. informs the human only if it, the computer, decides to
8. informs the human only if asked, or
7. executes automatically, then necessarily informs the human, and
6. allows the human a restricted time to veto before automatic execution, or
5. executes that suggestion if the human approves, or
4. suggests one alternative
3. narrows the selection down to a few, or
2. The computer offers a complete set of decision/action alternatives, or |
| LOW | 1. The computer offers no assistance: human must take all decisions and actions. |

תמונה 1 - רמות אוטומציה

2.4 תהליכי הרכבה בייצור

תהליך הרכבה מוגדר ע"י שתיים או יותר חלקים נפרדים שע"י חיבורם נוצרת יישות חדשה שנקראת תת הרכבה או הרכבה. תהליך הרכבה מאופיין ע"י שלושה קטגוריות עיקריות (Groover, 1987):

1. הידוק מכאני (Mechanical Fastening).

1.1. הידוק בהשחלה- מאופיין בחיבור חלקים ע"י ברגים, אומים, בריחים, הברגות וכו..

1.2. מסמור- מאופיין בחיבור חלקים ע"י מסמרים, ניטים וכדומה..

1.3. חיבור בלחץ- הידוק טולרנסים.

1.4. חיבור בשינוי צורה- שינוי אלסטי באחד החלקים על מנת להתאים לחלק השני.

1.5. תפירה.

2. שיטות צירוף\חיבור (Joining Methods) - מאופיין בריתוך, הלחמה, יציקות.

3. Adhesive bonding - הדבקה

3.1. טרמופלסטיקה- הדבקה ע"י חימום פלסטי.

3.2. הדבקה באמצעות דבק.

ישנן מספר שיטות לביצוע תהליכי ההרכבה שצוינו לעיל, נחלקם לשלושה קטגוריות עיקריות:

1. תחנת הרכבה ידנית בודדת- מאופיינת בעבודות מסובכות שמתבצעות בייצור מספר

נמוך של יחידות או עבור הרכבה חד פעמית. תחנה כזו יכולה להכיל עובד אחד או יותר, התלות היא בגודל המוצר בדרישות ובתדירות הייצור. דוגמאות: הרכבת מטוס, ספינה, כלים מכניים ותעשייתיים כבדים וכו'.

2. קו הרכבה - מכיל מספר תחנות עבודה שממוקמות בסדר מסוים רצוף, בכל תחנה נוספים חלקים כך שבסוף קו ההרכבה מתקבל מוצר מוגמר.

3. מערכת הרכבה ממוכנת אוטומטית- מוגדרת באותו אופן כמו 1-2 אך במקום בני אדם היא מופעלת ע"י רובוטים ומכונות.

2.5 רובוטיקה

רובוטיקה היא תחום בהנדסה ובמדע, העוסק במחקר, פיתוח וייצור של רובוטים, של "סביבתם" ושל שימושיהם. הרובוטיקה כבשה לה מעמד עצמאי ומכובד בין תחומי ההנדסה והטכנולוגיה השונים. מקור המילה רובוט (Robot) הוא במילה הצ'כית ROBOTA , שפירושה "עבודה קשה". רובוט הוא מערכת בעלת יכולת תנועה וחישה משובצת ביחידת עיבוד מרכזית מעבד זעיר או בקר זעיר, עם תוכנת בקרה אוטונומית הפועלת באינטראקציה עם הסביבה (יהל, קלרטג, ארצי ובהיר, 2009). נתוני הקלט לתנועתו של הרובוט יכולים להתקבל על ידי מפעיליו או ישירות מחיישנים המותקנים ברובוט. הרובוט בנוי ממספר תתי מערכות: גוף הרובוט, מקורות הכוח (power system) מערכת ההנעה (Drive System)

ומערכת הבקרה (control system) (יהל, קלרטג, ארצי ובהיר, 2009). החל מאמצע המאה ה-20 רובוטים מהווים נושא חשוב במדע, בטכנולוגיה ובחברה של המין האנושי. רובוטים רבים משולבים במערכות ייצור שונות, כחלק מפסי הייצור, ואחרים מצויים במרכזי מחקר ולימוד. חשיבותם ומספרם של הרובוטים, בתעשייה בפרט ובחברה בכלל, ילכו ויגדלו עם הזמן (Geismar et al., 2012). הרובוטים התעשייתיים הראשונים פותחו בארה"ב בסוף שנות ה-50 של המאה העשרים והחלו לייצרם באופן מסחרי בשנות ה-60. בשנות ה-70 התפתחה התעשייה היפנית בצעדי ענק תוך כדי שילוב רובוטים רבים בפסי הייצור שלה. התחום העיקרי שבו פועלים כיום רובוטים הוא התעשייה, הם משמשים בפסי הייצור של חברות גדולות. השימושים העיקריים של רובוטים הם עיבוד חומרים, שינוע, ריתוך, הרכבה וצביעה. שימושים אלה נפוצים בתעשיית המכוניות שבה מותקנים מרבית הרובוטים וכן בתעשיות האלקטרוניקה והכימיה (יהל, קלרטג, ארצי, & ובהיר, 2009). בשנים האחרונות מתחילים להיכנס רובוטים גם לחיי היום יום, וכיום ניתן למצוא בבתים פרטיים רובוטים כגון IROBOT ואחרים. כיום כשמעבדי המחשב מהירים וזולים יותר הרובוטים הופכים לחכמים יותר (אדפטיבים למשתמש, יכולות בינה מלאכותית, מודעות לסביבה וכו') ופחות יקרים. בו-זמנית, חוקרים עובדים על דרכים שונות על מנת לייצר רובוטים שזזים וחושבים ביתר יעילות. למרות שרוב הרובוטים שנמצאים בשימוש כיום תוכננו לביצוע משימות מסוימות, המטרה היא לייצר רובוטים אוניברסליים, רובוטים גמישים מספיק שיוכלו לבצע כל משימה שתידרש.

2.6 הרובוט

הרובוט הינו המרכיב המרכזי בתא עבודה הרובוטי, אליו מותאמים כלל הרכיבים לביצוע אופטימאלי של התהליך הנדרש בתא עבודה הרובוטי (Groover et al., 1986). במרוצת השנים, עם פיתוח של סוגים חדשים ושונים של מכונות וטכנולוגיות, הרובוטים סווגו בדרכים שונות. כפי שהוזכר קודם, אחת הדרכים לסיווג הרובוטים היא ע"פ הפונקציה העיקרית שאותם הם מבצעים. בין הסוגים העיקריים ניתן למנות הרכבה, שינוע, נשיאה, טיפול בחומר גלם וכו'. ניתן לסווג רובוטים גם ע"פ מערכת ההנעה שלהם היכולה להיות אחת משלושה סוגים (Groover et al., 1986):

1. מערכת הנעה הידראולית- מתאימה למערכות גדולות והיא מספקת כוח גדול במהירות גבוהה. חסרונותיה הם שהיא נוטה לדלוף ולפיכך דורשת טיפול ותחזוקה באופן רציף.
2. מערכת הנעה חשמלית- מתאימה למערכות בהם נדרשת יציבות גבוהה, דיוק רב וחזרתיות. מערכת ההנעה החשמלית אינה יכולה לספק כוח רב ומהירות גבוהה כמו זו ההידראולית.

3. מערכת פנאומטית- מתאימה לרובוטים קטנים שאחראים על תהליך פשוט בעל מחזוריים רבים כגון תהליך שינוע של חלק. רובוט עם מערכת הנעה פנאומטית יכול לתמוך בתנועה עד לארבע דרגות חופש.

בתהליך בחירת הרובוט חשוב לבחון את ביצועיו העיקריים של הרובוט - מהירות התנועה, יכולת ההרמה והדיוק בתנועת הזרוע, דרגות החופש, מרחב התנועה ואת התאמתם למשימה אותה הרובוט צריך לבצע (Groover et al., 1986):

1. מהירות תנועת הרובוט: המהירות קובעת כמה מהר יכול הרובוט לסיים את תוכנית העבודה הנתונה לו ולהתפנות למחזור הבא. מהירות זו היא קריטית לקביעת קצב הייצור של אותו רובוט ויכולה להשפיע על תהליך הייצור כולו. מהירות תנועה של רובוט נמדדת בקצה הזרוע כאשר היא באורכה המלא.

2. יכולת ההרמה של הרובוט: יכולת ההרמה של הרובוט היא פועל יוצא של התצורה, המבנה ומערכת ההנעה של הרובוט. יכולת זו נקבעת כשהרובוט במנוחה, כשזרוע הרובוט נמצאת במצב החלש ביותר, כאשר היא פתוחה במצב המקסימאלי. יכולת ההרמה של הרובוט חייבת להופיע במפרט שלו ושאר רכיבי הקצה חייבים להתאים ליכולת זו.

3. דיוק התנועה של הרובוט: דיוק התנועה של הרובוט נבדק גם הוא בקצה זרוע הרובוט, במצב קיצון. הגדרת הדיוק נעשת ע"פ שלושה תחומים:

3.1 דיוק בחלוקת תא העבודה- חלוקת תא עבודה מתבצעת על ידי חלוקת כל ציר עבודה לשנתות. הדיוק בחלוקת תא העבודה נמדד ע"פ החלקים הכי קטנים שהרובוט יכול להבחין בניהם. גודל החלקים תלוי בסך המקום בזיכרון המוקצב למיקומים. ניתן לשפר את דיוק הרובוט ע"י הגדלת הזיכרון של מערכת השליטה או ע"י שדרוג החלקים המכאניים.

3.2 דיוק ההגעה- ככלי בקרה לדיוק ההגעה של הרובוט למיקום מסוים נתייחס לטעות ההגעה, כלומר נתייחס למיקום שהרובוט הגיע אליו ביחס למיקום שאליו הוא היה אמור להגיע. אם המרחק בין שתי נקודות אלו קטן מחצי המרחק בין שתי נקודות קרובות אז הזיהוי נכון. הגורמים המשפיעים על דיוק ההגעה לנקודה מסוימת הם:

3.2.1 קרבת הזרוע לבסיס הרובוט- ככל שהזרוע קרובה יותר לבסיס הרובוט עולה הדיוק.

3.2.2 המשקל אותו מרימה הזרוע- דיוק ההגעה קטן ככל שהמשקל שמרימה הזרוע גדל עקב לחץ מוגבר המופעל על הזרוע.

3.2.3 גודל סביבת העבודה- ככל שסביבת העבודה של הרובוט מצומצמת ומכילה נפח קטן יותר מתא העבודה, דיוק ההגעה יהיה טוב יותר.

3.3 חזרתיות- היכולת של הרובוט לחזור לאותה נקודה מספר פעמים בקריאות שונות. גם כאן נמדד הדיוק בהגעה אך הוא נמדד לאורך זמן על אותה נקודה. טעויות בחזרתיות אינן סדורות ואינן יוצרות מבנה קבוע של מיקומים סביב נקודת היעד. דיוק בתנועת

הרובוט יהיה מיטבי כאשר נבצע איפוס לרובוט, כלומר כשנאתחל את הרובוט לנקודת האפס שלו. בכך נמנע טעויות הנגרמות עקב משקל הרמה גבוה, עבודה מאומצת ופגיעות.

2.7 רכיבי זיהוי וחישה

רכיבי זיהוי וחישה הם רכיבים הכרחיים במערכות אוטומציה תעשייתיות. הם משמשים כציוד היקפי לרובוט ומאפשרים לזהות שינויים בסביבת העבודה של הרובוט. רכיב זיהוי וחישה מגיב לגירוי פיזי (מגע, עליית טמפרטורה, שינוי לחץ אוויר, אות חשמלי וכד') ומפיק תגובה באמצעות מעגל חשמלי המשדר רצף של אותות המציינים את הפעולה הרצויה (Nof, 2009). לפיכך רכיבי זיהוי וחישה יכולים להיות מכנים, חשמליים, אלקטרו-מכנים, מגנטיים, או אופטיים. ניתן לחלק את החיישנים לשני סוגים בסיסיים, חיישנים דיגיטליים וחיישנים אנלוגיים. חיישנים דיגיטליים מספקים מידע בביטים לעומת חיישנים אנלוגיים המספקים מידע בעזרת זרם חשמלי או מתח. חלוקה אחרת של החיישנים מסווגת אותם לארבע טיפוסים הנבדלים בניהם לפי מטרתם בתא העבודה (Groover et al., 1986):

1. חיישן מגע: נותן אינדיקציה על המגע בינו לבין עצם אחר. חיישן מגע יכול לתת אינדיקציה על מגע בלבד או על שילוב של מגע וכוח.
2. חיישן קרבה: מודד את המרחק בין החיישן לבין עצמים. יחידות החיישן משתנות על פי הגדרת היצרן.
3. חיישן סביבה: חיישנים אלו מגיבים לטמפרטורה, לחץ אוויר, ותנאים פיזיקליים שונים המופעלים עליהם.
4. חיישני ראייה: חיישני ראייה בדרך כלל מצורפים למערכת ראייה שלמה. מערכת כזאת משמשת לזיהוי צורה, התמצאות הרובוט במרחב, מציאת פגמים, זיהוי עצמים וכד'. המערכת מורכבת משלושה חלקים: חיישן שמצלם, מערכת שמנתחת את התמונה ומערכת הבוחרת תגובה למידע שהתקבל.

2.8 עקרונות ושלבי עבודה בתכנון תא עבודה רובוטי

תכן הממשק והתפעול של תא עבודה רובוטי היא משימה הנדסית רחבה ומורכבת. רובוטים שנמצאים בשוק מתוכננים כך שיוכלו לענות על דרישה מסוימת, יחד עם זאת, בכדי למנוע מצב של ייצור רובוט ספציפי לכל דרישה, גם הרובוטים, בכל המשפחות, חייבים להיות גמישים מספיק בכדי להתמודד עם השינויים בין התעשיות השונות. חלק מהגמישות ההכרחית הזאת מושגת ע"י הוספה של רכיבים משלימים כגון רכיבי קצה, תפסניות, אביזרי בטיחות, רכיבי זיהוי וחישה ומכשור לצורך שינוע. רכיבים אלו הם חלק בלתי נפרד מתא העבודה הרובוטי הכרחיים כדי ליצור התאמה מלאה בין הרובוט למשימתו. הם אינם זולים - עלותם יכולה להגיע עד לפי 4 מעלותו של הרובוט עצמו (Siciliano & Khatib, 2008).

בתכנון תא עבודה רובוטי עלינו להתייחס גם לעיצוב הפיזי של התא וגם למערכת השליטה והבקרה של התא. בעיצוב הפיסי של תא העבודה קיימים 3 סידורים בסיסיים (Groover et al., 1986):

1. הרובוט במרכז - הרובוט ממוקם במרכז וכל שאר הצידוד והחלקים מאורגנים במעגל סביבו. סידור זה יעיל כאשר לרובוט משימה קבועה וספציפית כמו פריקה וטעינה. זה היה המערך הנפוץ ביותר בתחילת עידן הרובוטיקה.

2. הרובוט כחלק מקו הייצור (תא העבודה מכיל בד"כ מספר רובוטים) - במערכת כזו קיים קו של חלקים נעים ורובוט אחד או מספר רובוטים המוצבים בסמוך לקו מבצעים פעולות על חלקים אלו. במערכת כזו יש צורך להחליט על דרך העברת החלקים (העברה מקוטעת, העברה מתמשכת או העברה לא מסונכרנת). בדרך כלל העברת החלקים מבוצעת על גבי מסוע.

3. הרובוט נע בתא העבודה - הרובוט יכול לנוע או על הרצפה או על מערכת מסילות המחוברות לרצפה או לתקרה. סידור כזה יהיה הכי שימושי לרובוט שתפקידו להעביר חלקים למיקומים שונים או פריקה וטעינה ממכונות שלהם זמני עיבוד ארוכים. לאחר בחירת העיצוב הפיסי המתאים לתא בהתאם למשימה, עלינו לעצב את מערכת השליטה והבקרה של התא. בכדי שתא עבודה רובוטי יתפקד בצורה אופטימלית חייבת להיות קורלציה בין הפעולות השונות בתא (Groover et al., 1986). חלק מהפעולות, למשל כיוול, מבוצעות על פי תכנון ותזמון מראש. חלק אחר של הפעולות, בד"כ גדול יותר, אינו מתוזמן מראש. בין הפעולות שאינן מתוזמות מראש ניתן למנות פעולות התלויות בזמן הגעתם של רכיבים, פעולות התלויות בתנוחה בהם הם מגיעים, פעולות תיקון שונות וכן פעולות הנעשות סימולטנית בין כמה רובוטים או בין רובוט לבן אדם (למשל אחיזה משותפת במוצר). פתרון הקונפליקטים שבין פעולות מתוזמות מראש וכאלו שאינן מתוזמות מראש, קביעת סדרי הקדימות וסדר הפעילות נעשים ע"י מערכת הבקרה. הבקרה על תא העבודה מחולקת ל-3 סוגים מרכזיים (Groover et al., 1986):

1. בקרת רצף - זו הבקרה המרכזית של המערכת והיא אחראית על הפעילות הרציפה (רגילה) של תא העבודה. היא אחראית על רצף הפעולות שעל התא לבצע, על פעולות מתוזמות ושאינן מתוזמות (ובכללן פעולות סימולטניות עם רובוטים אחרים), ועל קבלת החלטות עצירה/המשך בעקבות אילוצים שהוגדרו מראש. מערכות בקרה מורכבות יכולות להתמודד גם עם מצבי קיצון כמו תקלות או משימות מיוחדות (כמו החלפת ציוד ייעודי לאחר מספר מחזורים) ואף לבצע משימות חישוב.

2. ממשק מפעיל - מטרת ממשק זה היא לאפשר למפעיל אנושי להיות מעורב בעבודת התא. קיימים מספר מצבים בהם מעורבות מפעיל הינה הכרחית. דוגמאות: מצבי חירום,

תקלות, ומצבים בהם המפעיל הוא חלק מתהליך הייצור ואחראי על חלק מביצוע המשימות בתא.

3. בקרה על הבטיחות- בכל תא רובוטי חייבת להיות מערכת בקרה שתהיה מסוגלת לאתר מצבים מסוכנים או מצבים שעלולים להתפתח למצבים מסוכנים ולהתריע על כך. כחלק מתהליך תכנון תא העבודה עלינו לתת את דעתנו למספר שיקולים ובעיות אפשריות, להלן רשימת נושאים שעליהן יש לתת את הדעת בתהליך תכנון תא העבודה (Groover et al., 1986):

3.1 למידת שיטת העבודה

3.1.1 מה מטרת התהליך?

3.1.2 מהם מאפייני הרובוט המתאים לתהליך זה בהיבטים של מהירות, דיוק, כוח, רזולוציה, כושר נשיאה, כושר הרמה

3.1.3 מה הדרך הטובה ביותר לביצוע התהליך ע"י רובוט?

3.2 תכנון תא העבודה הרובוטי

3.2.1 בחירת סוג תא העבודה

3.2.1.1 הרובוט במרכז.

3.2.1.2 הרובוט כחלק מקו הייצור.

3.2.1.3 רובוט הנע בחלל העבודה.

3.2.2 אילו שינויים נדרש לבצע ברצפת התפעול כדי לתמוך במערכת החדשה?

3.2.3 תכנון הכניסה והיציאה של החלקים לתא העבודה.

3.2.4 תכנון אופן זיהוי החלקים המגיעים לתא.

3.2.5 הגנה על הרובוט מסביבתו (לפעמים גם הגנה על אנשים בסביבה מהרובוט).

3.3.6 תכנון אספקה של כל השירותים הנדרשים לתא העבודה.

3.3 תכנון הבקרה.

3.1 מהן הפונקציות הבסיסיות בתהליך שעליהן נדרשת בקרה?

3.2 באילו מקרים נדרשת התערבות מפעיל?

3.3 אילו חיישנים צריך לצורך בקרה ושליטה בתא.

3.4 איזו מערכת בקרה נדרשת?

3.4 תכנון הבטיחות.

3.5 בחירת רכיבי הקצה הנדרשים לתהליך.

3.6 בחירת רכיבים משלימים לתא העבודה.

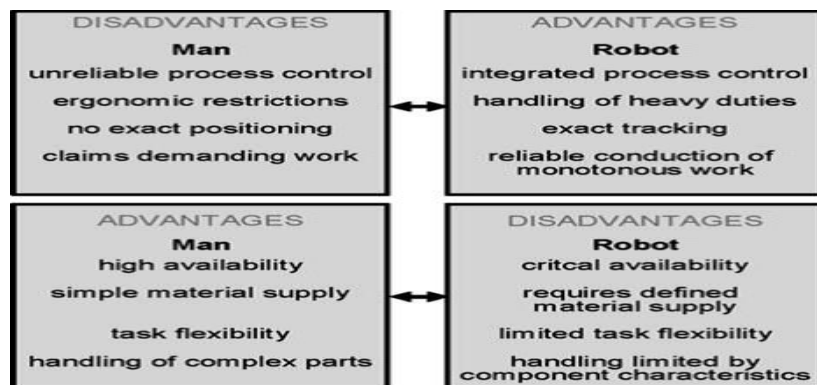
2.9 שת"פ אדם רובוט

שיתוף הפעולה בין אדם לרובוט כיום מתבסס בעיקרו על עקרון "Master-Slave" שבו העובד האנושי מפעיל את הרובוט בצורה ישירה או מתכנת אותו כאשר הוא במצב לא מקוון. דבר זה מאפשר לרובוט פעולות סטאטיות ומחזוריות בלבד. כדי לשמור על בטחונו של העובד, סביבות העבודה שלו ושל הרובוט כיום נפרדות לגמרי בזמן ובמקום כפי שניתן לראות בקווי ההרכבה של תעשיית המכוניות בהם בזמן שהרובוטים מבצעים פעולות הרכבה בני האדם נמצאים במרחק בטיחותי מהם ולכן רובוטים לא משתלבים בפסי הייצור בהם עובדים בני אדם (Lenz, et al., 2008). כיום השימוש ברובוטים הוא בעיקר למשימות מחזוריות ופשוטות בסביבת עבודה מנותקת מבני אדם, ישנה דרישה לטכנולוגיות ידידותיות לאדם על מנת שתתאפשר הקמה של סביבת עבודה משותפת עם רובוטים וכך יהיה ניתן ליישם שיתוף פעולה בין הרובוט לבן האנוש כדי לבצע פעולות ביתר יעילות. "השילוב בין הגמישות האנושית והיעילות של המכונה יכול בעיקרו להפחית את עלויות הייצור ולהגביר את הקצב והיעילות שלו" (Claus, Alice, & Thorsten, 2011), על מנת לקיים שיתוף פעולה שכזה יש צורך ברובוטים בטיחותיים ואדפטיביים שידעו ללמוד ולהבין את העובד מולם על מנת לעזור לו לבצע את מטלתו (Lenz, Grimm, Röder, & Knoll, 2012).

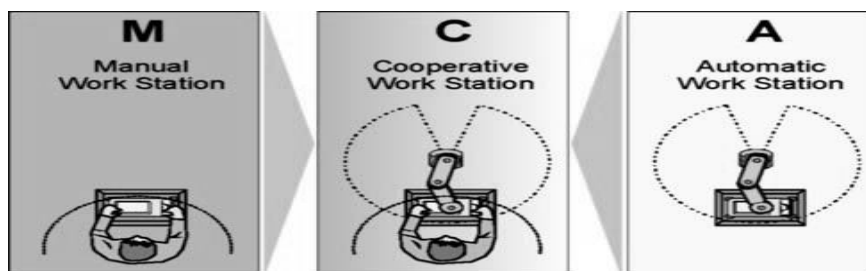
2.10 שת"פ אדם רובוט - יתרונות

הגמישות והשינויים הדחופים בתהליכי הרכבה מצריכים עבודה משותפת וצמודה של האדם והמכונה. שיתוף פעולה שכזה מביא להתיעלות ושיפור של תהליכי ייצור והרכבה במיוחד כאשר הרובוט משרת את האדם בצורה אינטליגנטית. לסוג עבודה שכזה יש מספר יתרונות משמעותיים בהשוואה לאוטומציה מלאה. היכולת של הרובוט להוות עוזר אינטלגנטי לעובד היא נגזרת של הבקר, החיישנים ועיבוד המידע והתוכנה המפעילה אותו, כך ששילוב נכון בין האלמנטים הללו יביא למתן עזרה מועילה לעובד במשימות מסובכות, מונוטוניות או מתישות. הקשר הדוק בין האדם והרובוט במשימות הרכבה משותפת חייב להשתמש ביתרונות של שני הצדדים על מנת לבצע אותה ביתר יעילות (Krüger et al., 2009). לעובד האנושי מספר מגבלות ארגונומיות שרובוט יכול לבצע ביתר קלות, להלן מספר דוגמאות: רמת הדיוק הלא מספקת של האדם, אי היכולת לעבוד עם חלקים חמים, חדים או בעלי משקל גבוה שלא ניתנים להרמה ללא הסתכנות בפציעה. מגבלה נוספת היא העובדה שהאדם מתעייף ועבודה מונוטונית מתישה אותו, דבר שיכול להביא לאיכות עבודה ירודה. לעומת זאת לרובוט אין בעיה להתמודד עם חלקים כבדים או חמים והוא מאוד מדויק. כמו כן רובוט מסוגל לעשות עבודה מונוטונית מבלי להתעייף או לפגוע באיכות העבודה. מאידך לרובוט יש מספר חסרונות בהשוואה לאדם, הוא זקוק לאספקת חומרים מוגדרת ולא גמיש במצבים בלתי צפויים. ישנם אלמנטים במשימות הרכבה שאינם יכולים

להיות מטופלים על ידי רובוט כמו התעסקות עם חוטים או אבזמים, נקודות אלו הופכות עובד אנושי להכרחי. בעזרת שילוב יכולותיו של הרובוט עם הגמישות שבאדם להתמודדות במצבים בלתי צפויים ומשימות טיפול קשות, תחנת עבודה אופרטיבית מתקבלת. שיתוף פעולה בין אדם לרובוט מתאים מאוד לביצוע פעולות עם שונות גבוהה וסיכוי לסיבוכים במהלך העבודה (Nickolay et al., 2005). איור 2 מציג כמה דוגמאות ליכולות ספציפיות של אדם ורובוט. איור 3 ממחיש את הרעיון של השילוב בין תחנת העבודה של הרובוט ובין תחנת העבודה של האדם.

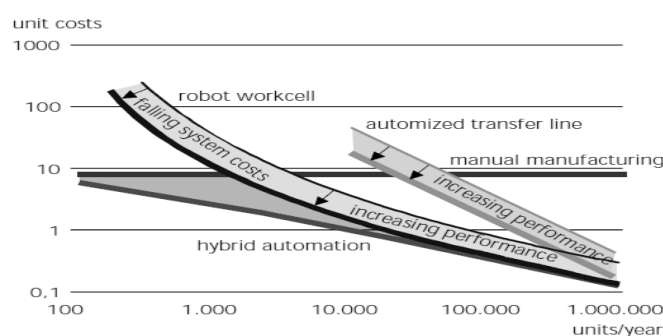


תמונה 2 -יתרונות וחסרונות אדם מול רובוט



תמונה 3 - סביבות עבודה

גם באספקט הכלכלי לשיתוף פעולה בין רובוט לאדם יש מספר יתרונות ומספר מאמרים מראים ששט"פ כזה מביא להתייעלות כלכלית של הייצור. שילוב היעילות של הרובוט עם הגמישות של האדם יכול במידה רבה להפחית את עלויות הייצור המשתנות (Claus, Alice, & Thorsten, 2011). "אוטומציה היברידית" כלומר כזו שמשלבת אדם ורובוט יכולה להביא להורדה משמעותית בעלות ייצור ליחידה בודדת ובשיפור יעילות קו הייצור (איור 4) (Hägele, 2002).



תמונה 4 - גרף שיפור יעילות

2.11 רמות שת"פ

אוטומציה מתייחסת להחלפה המלאה או חלקית של פונקציה שבוצעה בעבר על ידי האדם כמפעיל. משמעות הדבר הוא כי ניתן להגדיר אוטומציה על פני רצף של רמות, מהרמה הנמוכה ביותר של קבלת הוראות מהמפעיל בכל שלב לרמה הגבוהה ביותר של אוטומציה מלאה (Sheridan, 2000). למרות שאוטומציה נתפסת כדרך יעילה להורדת עלויות בייצור וככזאת שמקלה על בני אדם במשימות מסוכנות או שאינן ברות ביצוע, יש לה גם חסרונות. מחקרים הוכיחו כי ברמות גבוהות של אוטומציה יש בעיה בתמודדות עם מצבים בלתי צפויים ועם היכולת לפרש מצבים המבוססים על מידע זמין ממערכת הייצור (Sheridan, 2000). לכן יש צורך באיזון בשיתוף הפעולה בכדי ליצור מערכות אפקטיביות יותר.

2.12 מודלים לשת"פ

שילוב נכון של חוזקות האדם והרובוט לביצוע מטלה משותפת מאפשר לקבל מערכת של שיתוף פעולה מדויקת ויעילה יותר, כך שהיתרונות של האחד מחפים על חולשותיו של האחר. כיום מערכות של שת"פ אדם רובוט מבוססות לרוב על עקרון "Stop And Go" ו-"Turn-Taking" כך שהרובוט מבצע פעולה, מסיים אותה ורק לאחר מכן האדם מתחיל את פעולתו ולהיפך (Lenz, Grimm, Röder, & Knoll, 2012). בכדי שרובוט יתפקד בצורה יותר "ידידותית" ו-"אנושית" במהלך שת"פ עם אדם, האינטראקציה ביניהם צריכה להיות רציפה ושותפת כמו האינטראקציה בין שני אנשים (Hoffman & Breazeal, 2007).

1. מודל מבוסס זמנים - *Timing based modals*

במודל זה הרובוט מבצע פעולות שנשלטות ע"י טיימר, הרובוט חוזר על הפעולות שהוגדרו לו מראש באינטרוול זמן מסויים שגם הוא הוגדר ע"י התוכנה מראש. אין כאן חיישנים שיכולים להשפיע על האינטרוולים או על משך הפעולות (Someshwar, Meyer, & Edan, 2010).

2. מודל מבוסס חיישנים - *Sensors based model*

במודל זה הרובוט מאותחל ומבצע את הפעולות רק ע"י אותות שמתקבלים מחיישנים. לרוב מטלות שמבוצעות בשיתוף פעולה מכילות שני שלבים עיקריים: שלב ההכנה ושלב הפעולה. הכוונה בתזמון כזה היא שהרובוט מקבל התראה מהחיישנים לכך שהגיע הזמן לפעול ומוציא לפועל את הפעולה בהתאם להתראות אלו. במקרה של מיקום מבוסס חיישנים הרובוט יתחיל את פעולתו רק כאשר האדם הגיע למיקום המבוקש, בדיוק כמו שאדם שולח SMS לחברו לאחר שהגיע לנקודת ציון מסויימת (Someshwar, Meyer, & Edan, 2010).

3. המודל המסתגל (האדפטיבי) - *Adaptive Model*

זהו המודל המורכב ביותר, עפ"י מודל זה הרובוט מתאים את המשך פעולתו בזמן אמת, תוך כדי התאמה לפעולתו של האדם (לא בהכרח פעולה פיזית אלא כל אינטראקציה של האדם עם הרובוט). ניתן להשיג זאת ע"י שימוש באלגוריתמים חכמים כמו:

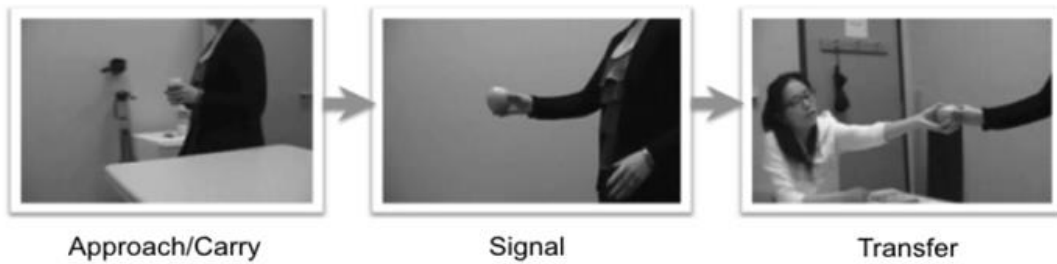
- Task Modeling approach (Tan et al., 2009)
- Hidden Markov Model (Xu and Yang, 1965)
- Dynamic Bayesian Network Model (Tahboub, 2006)
- Expectation Management Model (Hoffman and Breazeal, 2009)

2.13 העברות - *Handovers*

מסירה של חפצים\חלקים מאדם לאדם היא חלק בלתי נפרד מהיום יום שלנו, אנשים מסתמכים על הבנת ההקשר של אירועים ורמזים מתקשורת עם הסובבים אותם על מנת לבצע מסירה בהצלחה. בעזרת תקשורת בני אדם מבססים את ה- מה? מתי? איפה? איך? בהקשר של המסירה. לדוגמא: מוסכניק מבסס את ה-"מה" בעזרת בקשת כלי מסויים מהעוזר שלו (העוזר נמצא לידו), כשאחות וחולה מחליפים מבטים הם מבססים את ה-"מתי" תעביר האחות את כוס המים לחולה, מחלק הפליירים מבסס את ה-"איפה" "איך" ע"י הגשת הפלייר לעוברים ושבים (ונח כאשר אין אנשים) (Strabala et al., 2013).

2.14 מסירה מאדם לאדם

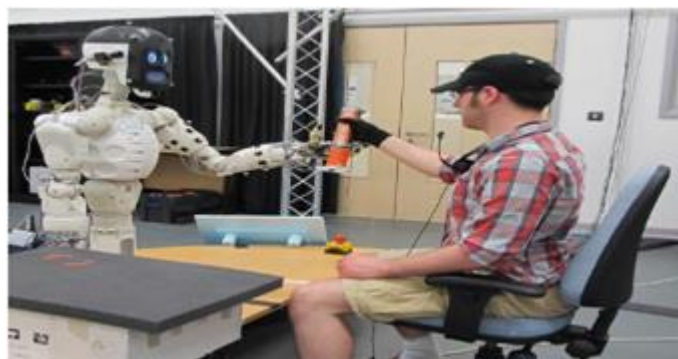
למרות שמסירות (HANDOVERS) הם אינטראקציות מורכבות מאוד ועדיין בני אנוש מסוגלים לבצע בצורה אינטואיטיבית ובלי מחשבה מודעת (בתת מודע). ישנן פרוצדורות ידועות בקרב בני האנוש לביצוע העברות חפצים מאדם לאדם. עפ"י ניסויים שנערכו (Strabala et al., 2013) על מנת לבדוק איך אנשים מעבירים חפצים מאחד לשני נמצא כי ישנם שלושה שלבים עיקריים בתהליך המסירה והם: נשיאת החפץ -> איתות על נכונות להעברה -> העברת החלק לאדם השני. בנוסף נמצא שב 89% מהמקרים בהם מועבר חפץ מאדם לאדם, האדם שמקבל את החפץ חזה שהחפץ יועבר אליו רק ע"י רמזים שהוא קיבל מהאדם השני, הנסיינים דיווחו שהרמזים הגיעו בעיקר מהבעות פנים, מחוות ידיים ותנועת עיניים.



תמונה 5- העברות אדם לאדם

2.15 מסירה בין אדם לרובוט

שלא כמו מסירה מאדם לאדם אצל הרובוטים פעולה כמו מסירת חפץ לסוכן היא מורכבת וקשה מאוד לביצוע בצורה חלקה. לרובוט אין תודעה והוא אינו מסוגל לתקשר בצורה אינטואיטיבית עם העומד מולו. כדי לגרום לרובוט להבין שהעומד מולו מעוניין להעביר או לקחת ממנו חפץ יש צורך בשימוש טכנולוגיות חדישות ואלגוריתמים שיהיו מסוגלים לפענח את התנהגות האדם ולקבל ממנו את הרמזים לכך שהוא מוכן לתת/לקבל את החפץ. כדי לגרום לרובוט להיות מודע לאדם מולו יש צורך להתחשב במספר עקרונות חשובים שבהעברה בין אדם לאדם נראים אינטואיטיביים וחסרי משמעות. לדוגמה (Grigore et al., 2013): מהעברה של כוס תה חמה מרובוט לאדם עולות מספר שאלות מעניינות: איך הרובוט ידע מתי להעביר את כוס התה מבלי לשאול את האדם מתי הוא רוצה אותה? איך הרובוט יעביר את הכוס החמה מבלי לפגוע באדם? איך הרובוט יעריך ויקח בחשבון את תנועתו של האדם כאשר ישלח את ידו וייקח את כוס התה? כמובן שהכל צריך לקרות בזמן קצר מאוד ובצורה אינטואיטיבית. מיטב החוקרים עובדים כיום על פיתוח טכנולוגיות חדישות שיקנו לרובוטים את "התודעה" המיוחדת הזו שתגרום להם לבצע פעולות כמו מסירת חפץ בצורה חלקה, בטיחותית ומהירה (Grigore et al., 2013).



תמונה 6- העברה בין אדם לרובוט

2.16 למידה במערכות משולבות רובוטים

אחד החסרונות הבולטים של מערכות אוטומטיות/רובוטיות הוא חוסר הגמישות בפעולות מורכבות במושגי תנועה וזמן. משימה שלאדם ממוצע היא קלה ביותר וזמן הלימוד שלה אפסי תדרוש שינוי חומרה ותוכנה כבדים ממערכת רובוטית המותאמת לפעולה אחרת. בכדי שהמערכת תוכל להתקדם, להתייעל ולמצוא פתרונות לבעיות אשר אינן מוגדרות במדויק, יש לשלב אלמנטים של למידה במערכות, אלה דרושים הן למנגנון קבלת ההחלטות של המערכת והן למערכת הרובוטית, אשר יכולה ליעל את העבודה ושיתוף הפעולה בין הרובוטים השונים (Colombetti et al., 1996). בעיית הלמידה של רובוטים מאופיינת על ידי תרגום המפה הנוצרת כתוצאה מהחיישנים והמשוב המתקבל כתוצאה מפעולות. על מנת שהרובוט ילמד הוא צריך לקבל משוב על ביצועיו (Connell & Mahadevan, 1993). כיצד ניתן לבצע למידה כאשר משתמשים במערכת בקרה מבוססת התנהגות:

- למידת התנהגות חדשה.
- למידת תגובה חדשה להתנהגות קיימת.
- למידה של שילוב חדש של התנהגויות.

ניתן להשיג למידה במערכת המשלבת לוגיקה עמומה והתנהגות על ידי יצירה ועדכון חוקים או על ידי אימוץ חוקים ישירות בעזרת למידה על ידי משוב (Arkin, 1999). בעבודה זו המערכת לא למדה התנהגות אלא הלמידה שולבה בהגדרת המשימה, טיפול בזיהוי חוסר ודאות. במערכות מרובות רובוטים ניתן ליישם את השיטה של מערכת מבוססת התנהגות. השינוי בסביבה יכול הגרם מפעילות של רובוט אחר, הרובוט יכול ללמוד גם מהמשוב אותו קיבל רובוט אחר ומהתנהגותו (Arkin, 1999). בסביבה עם מערכת מרובת רובוטים הלמידה על ידי משוב הקונבנציונאלית עושה רושם לא מתאימה מאחר והסביבה מכילה רובוטים נוספים לומדים, כך שמנקודת ראותו של הרובוט הסביבה משתנה בצורה אקראית. חשוב לרובוט להבין את האסטרטגיה של שאר הרובוטים ולחזות את צעדיהם בכדי לעמוד את ההתנהגויות בהצלחה (Uchibe et al., 1998).

2.17 אלגוריתמי למידה (Machine Learning)

שילוב של אלגוריתמי למידה הופך לנפוץ ברובוטיקה שכן הם נותנים לרובוט את היכולת לחזות את הסביבה, ללמוד מהטעויות, לסווג תרחישים דומים ולפעול באופן טוב יותר במצבים שהוא מכיר או כאלו שבהם הוא נתקל לראשונה. ספרות ה-Machine Learning מתבססת ברובה על הספרות הסטטיסטית, צריך לזכור שהמטרה הסופית של ה-Machine Learning היא להחליף אלגוריתמים "בקוד קשיח" באלגוריתמים שלומדים באופן רציף לאור זמן ומעדכנים את המערכת לפעול בהתאם (Hastie et al., 2003).

אלגוריתמי למידה נחלקים לשני עולמות: למידה מונחית (Supervised learning) ולמידה לא מונחית (Unsupervised learning). ההבחנה הראשונה בין השיטות השונות הוא לאורך המשימות שמבצעים בעזרתן, אשר תואם באופן הדוק לסוג הנתונים הקיימים (Ben-David & Shwartz, 2014). בלמידה מונחית כל תצפית מגיעה ביחד עם תווית סיווג. מטרת האלגוריתם היא לחזות את הסיווג של תצפיות חדשות שאותן לא פגש בתהליך הלמידה, אימון של רשת נוירונים מסתמך על אלגוריתמים מסוג זה. בלמידה לא מונחית מטרת האלגוריתמים היא למצוא ייצוג פשוט וקל להבנה של אוסף הנתונים. שיטות נפוצות מסוג זה הן חלוקה לצברים (clustering) והורדת מימד (PCA). למידת חיזוקים (Reinforcement learning) היא למידת ביניים בו אלגוריתם הלמידה מקבל משוב חלקי על ביצועיו (רק לאחר סיום ביצוע המטלה) ועליו להסיק אילו מהחלטותיו הביאו להצלחה/כישלון. בכל שיטת למידה התפתחו מספר אלגוריתמים שמיושמים באפליקציות רבות שאנחנו נתקלים בהן ביום יום.

2.18 שיטות למידה של רובוטים

תהליך של "למידה" ברובוטים יכול לקדם את התחום ולהאיץ את כניסת הרובוטים לחיי היום יום. תהליך הלמידה חיוני לרובוט ממספר היבטים. באמצעות למידה יכול הרובוט לשפר את ביצועיו, למשל הוא יכול לבצע משימה מהר יותר, באופן יותר מדויק ואף להרחיב את יכולותיו להתמודד עם משימות נוספות. במקביל לשיפור בביצוע משימה נרצה להבטיח כי תהליך הלימוד יעזור לרובוט לבצע פחות טעויות ככל שיהיה יותר מתורגל (Bekey, 2005). בנוסף, תהליך הלמידה יכול לסייע לרובוט להתמודד עם שינויים בסביבה או במשימה שהוטלה עליו, פרט זה חשוב מאוד היות וקשה מאוד לצפות מראש שינויים כאלה ולתכננם. יש דברים שקל יותר ללמד מאשר לתכנת וטכניקות ללימוד רובוטים יוכלו אולי בעתיד לשפר ולשנות את ביצועי הרובוט כמעט ללא צורך בתכנות או ללא תכנות כלל, בדרך זו יוכלו גם אנשים ללא ידע מוקדם בתכנות ללמד את הרובוט את משימותיו. ישנן מספר שיטות למידה מקובלות כיום ברובוטיקה, ביניהן למידה בשיטת החיזוקים, למידה בהשראת שיטות סטטיסטיות, למידה בהשראת מערכת הנוירונים במוח האנושי וכן למידה מתוך הדגמה המתארת אוסף של גישות שמאפשרות ללמד רובוט כיצד לפעול באמצעות הדגמה של מצבים ופעולות. אחת משיטות הלימוד הנפוצות בקרב רובוטים נקראת שיטת החיזוקים (Reinforcement Learning). בשיטת החיזוקים הרובוט לומד באמצעות המשוב שהוא מקבל מהסביבה- בדומה לשיטת המקל והגזר אצל בני אדם. הרובוט מבצע ניסויים להתנהגותו, כלומר בודק עבור כל מצב מהי הפעולה אותה עליו לבצע ולומד לפי המשוב שמתקבל מהסביבה האם הבחירה שלו הייתה מוצלחת ובהתאם מגבש מדיניות לפעולה בעתיד. השיטה הזאת מאפשרת לרובוט ללמוד מה לעשות ומה לא לעשות במצבים שונים

באמצעות תהליך של ניסוי וטעייה. הרובוט מנסה עבור כל מצב את כל הפעולות שיש לו בבסיס הנתונים ולפי המשוב שהוא מקבל הוא מחליט מהי הפעולה המתאימה ביותר לכל מצב בו הוא נמצא. אחד החסרונות של השיטה היא שבמידה ורובוט זיהה לא נכון את הסיטואציה- כלומר את המצב בו הוא נמצא אזי כל תהליך הלמידה שגוי. בנוסף, במידה והסביבה משתנה חלק מתהליך הלמידה של הרובוט שהתאים למצב הישן עלול שלא להתאים למצב החדש. נוצר צורך לסייע לרובוט בהסתגלות למצבים חדשים תוך מניעת מצב של הנצחת טעויות קיימות. כלומר יש צורך בבדיקה מתמדת של הלמידה, תוך מציאת השילוב הנכון שבין ניצול הידע שנצבר מניסיונות קודמים לבין המשך חקירת המצבים והמדיניות המתאימה לכל אחד מהם, זאת כדי שהרובוט יוכל להסתגל לשינויים ולהמשיך ללמוד (Mataric, 2007). קבוצת אלגוריתמים נוספת שנפוצה מאוד בתחום הרובוטיקה הינה אלגוריתמי למידה המבוססים על סטטיסטיקה (Statistical learning). קבוצה זו כוללת בין היתר את שיטת הלמידה הבייסיינית (Bayesian learning) ורשתות עצביות (Neural networks). שיטות אלו מתחילות בתקופת אימון שבה הרובוט נחשף לסט נתונים ומסווג מצבים לתוויות בסיוע המשתמש על מנת שבהמשך יוכל הרובוט לסווג מצבים חדשים לתוך התוויות באופן עצמאי (Khatib & Siciliano, 2008). למידה בייסיינית (Bayesian learning) היא יישום של חוק בייס (Bayes rule) כאשר C מייצג את הקישור הנוכחי של הרובוט ו-X מייצג מצבים אפשריים עתידיים. ההסתברויות המותנות וכן ההסתברות לכל אחת מהתוויות נלמדות בשלב האימון (Khatib & Siciliano, 2008). דוגמא לאלגוריתם סטטיסטי נוסף מאותה משפחה הוא מודל מרקוב חבוי (hidden Markov model)- במודל זה קיים אוסף סופי של מצבים המקושרים זה לזה ולכל מצב יש שני סטים של הסתברויות: ההסתברויות להגיע אליו וכן ההסתברויות לצאת ממנו לכל אחד מיתר המצבים (Sammut & Webb, 2011). דוגמא לשימוש במודל מרקוב חבוי לשם תכנון תנועה של רובוט ניתן לראות בניסוי שנעשה במסגרתו נלמדו דפוסי תנועה של בני אדם ונעשה שימוש במודל מרקוב חבוי על מנת לחזות את העמדות העכשוויות והעתידיות של מסלול האדם. מתוך המודל שנוצר למד רובוט נייד כיצד לתכנן את המסלול שלו כך שיהיה דומה ככל הניתן לדפוסי התנועה של האדם (Bennewitz et al., 2005). רשתות עצביות (Neural network) הם אלגוריתמי למידה שנבנו בהשראת פעולתו של המוח וקיימת אנלוגיה בין אופן פעולתם לזה של המוח האנושי (Sammut & Webb, 2011). רשתות עצביות מורכבות מיחידות יסודיות המקושרות ביניהן בקשרים ממושקלים בשלב האימון מותאמים המשקלים השונים בין הקודקודים לשם סיווג מתאים של המידע. כל יחידה מחשבת את סכום המשקלים המחוברים אליה ובהתאם מעבירה או לא מעבירה את המידע הלאה לשם סיווג המצבים השונים (Khatib & Siciliano, 2008). (Bin et al, 2004) עושים שימוש ברשתות עצביות לשם לימוד מסלול על ידי רובוט. במאמרם הם משתמשים במודל של רשת נוירונים שמייצג מפה כאשר כל נוירון מגיב לנוירונים השכנים לו ומחזיק את

המרחק שלו מהמטרה. המרחק של הרובוט מהמטרה וכן התגובה מהנירונים השכנים (שמושפעת בין היתר מהימצאות מכשולים בינם לבין מקום הרובוט) מתורגמים לפונקציה שבהסתמך עליה הרובוט נע הלאה לעבר המטרה.

Learning technique approach	Models	Strengths	Weaknesses
Artificial neural network	Discrete real and vector-value function	1. Robust to noisy, complex data and errors in data. 2. Very flexible in type of hypotheses they can represent. 3. Bears some resemblance to a very small human brain. 4. Can adapt new data. 5. Do not have to fulfill any statistical assumptions and better at handling large amount of data with many variable .	1. Long training times are common. 2. Learned function inscrutable 3. Many training examples required. 4. Very difficult to understand their internal reasoning process.
Evolutionary	Uses mutations to evolve populations	Useful method of optimization when other techniques are not possible.	Suited for problems where efficient ways of solving them are already known fast
Probabilistic	Probabilistic inference, hypothesis that makes probabilistic predictions	1. Readily combine prior knowledge with observed data. 2. Modifies hypothesis probability incrementally based on each training sample.	Require large initial probability sets
Reinforcement	Control policy to maximize rewards	1. Can model actions with non-deterministic outcome. 2. Can learn optimal policy from non-optimal training sets and facilitates life long learning 3. Fast	1. Depend on real value reward signal for each transition. 2. Convergence can be slow space requirements can be huge
Support vector machines	Discrete real and vector-value function	Maximization of generalization ability no local minima	1. Extension to multi-class problems is not straightforward. 2. Long training times.

טבלה 1- חולשות וחוזקות של אלגוריתמי למידה

2.19 רובוטים חברתיים

מחקר נוסף שנעשה בארצות הברית (Cakmak et al, 2010) מתמקד ברובוטים חברתיים שממוקמים בסביבות אנושיות דינמיות, למשל, עוזרים כלליים בבתים, בתי ספר ובבתי חולים. בתרחישים מסוג זה בהם הרובוטים אמורים להיתקל יהיה קשה מאוד לקודד באופן קשיח אלגוריתם עבור כל סיטואציה. מחקר זה עוסק בפיתוח שיטות למידה לרובוטים שיאפשרו לרובוט ללמוד את המשימות ואת המיומנויות הדרושות לו ממשתמשי הקצה. בדרך כלל משתמשי הקצה הם לא בעלי ניסיון בעבודה מול רובוטים ולא תמיד ניתן לצפות שילמדו את הרובוט בצורה מיטבית, לכן יש צורך לתכנן אלגוריתמים ומערכות המנצלות את הפעולות הטבעיות של המשתמש ללמידה עבור הרובוט. במאמר מוצגות שתי שיטות

למידה שמאפשרות לרובוט ללמוד מהאדם: למידה מונחית פסיבית ואקטיבית. בלמידה הפסיבית המורה מסווג ובוחר את כל מה שהוא מעוניין ללמד לעומת למידה אקטיבית בה הלומד בוחר דוגמאות מהן הוא רוצה ללמוד (הוא שותף פעיל בלמידה). בניסוי שהוצא לפועל השתמשו ברובוט חברתי בדמות אדם, 24 אנשים שימשו כמורים לרובוט וניסו ללמד אותו מושגים מבוססי אובייקטים פשוטים הוערכו שלושה מצבי אינטראקציה באמצעות למידה אקטיבית בהשוואה לאינטראקציה בסיסית באמצעות למידה פסיבית. התוצאות הראו כי למידה אקטיבית יכולה להשיג שיפור בביצועים על פני למידה פסיבית וכי השימוש בלמידה פעילה נתפס כעדיף מבחינת הנסיינים הן בהנאה שבהוראה, בקלות ההוראה ובתפיסת הידע אצל הרובוט.

2.20 אדפטיביות (הסתגלות) הרובוט לאדם

בנוסף לשיטות הלמידה של רובוטים, נושא מעניין מאוד שהוא תת נושא של Robot Learning הוא יכולת ההתאמה של הרובוט לאדם הספציפי העומד מולו. מאחר ורובוטים יכולים לשתף פעולה עם אוכלוסיות מגוונות קיים צורך להתאים את פעולת הרובוט לכל אדם שמשתף איתו פעולה, יכול להיות מצב בו הרובוט מבצע פעולה מצויין אבל שיתוף הפעולה עם האדם הוא גרוע כי אין ביניהם התאמה בזמן או במקום, מחקרים בתחום זה עוסקים בפיתוח שיטות ואלגוריתמים שיאפשרו לרובוט להבין את האדם העומד מולו ולשתף איתו פעולה בצורה מיטבית. במחקר שנעשה באוני' בן גוריון (Sayfeld & Peretz, 2014) נבדק אלגוריתם אדפטיבי אל מול אלגוריתמים שמתבססים על זמנים קבועים או על חיישנים בלבד. הורץ ניסוי במעבדה על 80 נסיינים ששיתפו פעולה עם זרוע רובוטית במשימת הרכבה (האינטראקציה התרחשה באמצעות העברת קוביות לגו). תוצאות הניסוי הראו באופן חד משמעי שכאשר הרובוט מופעל בעזרת אלגוריתם אדפטיבי נראה שיפור ניכר בביצועים בעמדת ההרכבה והנסיינים היו מרוצים יותר משיתוף הפעולה.



תמונה 8 - עמדת העבודה



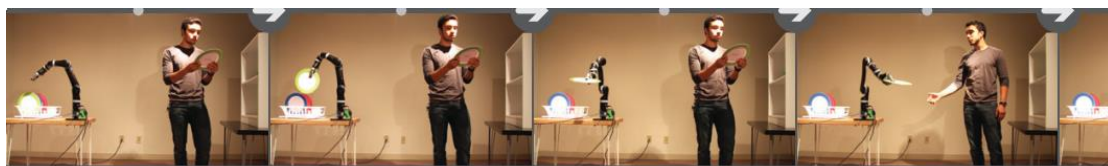
תמונה 7 - מגדל קוביות

במחקר נוסף שנערך בתחום (Chien-Ming Huang et al, 2015) ניסו החוקרים להבין ולמצוא אסטרטגיות חדשות שיאפשרו לרובוט התאמה טובה יותר לאדם מולו הוא עובד.

בכדי לפתח אסטרטגיות כאלו החוקרים ניסוי לפענח אסטרטגיות בהם משתמשים אנשים בכדי להתאים את עצמם לשותף שלהם וליישם ברובוטים. נאספו נתונים מניסויים שהורצו עם זוגות של אנשים שביצעו העברות של צלחות מאחד לשני בסיטואציות שונות. המסקנות שהוסקו מאנליזת הנתונים הושמו במודל אדפטיבי שאלגוריתם על בסיסו הפעיל את הרובוט. בשלב הבא נערכו ניסויים דומים כשאחד השותפים הוא הרובוט ונבחנו ממדי הביצוע. המטרה העיקרית של המחקר הייתה ללמוד מהתנהגות האדם במצבים מסויימים וליישם אסטרטגיות דומות ברובוטים.

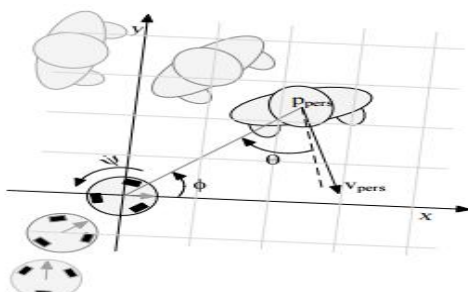


תמונה 9 - העברות אדם לאדם



תמונה 10 - העברות אדם לרובוט

מחקר נוסף שנעשה בדנמרק (Svenstrup et al, 2009) מתאר שיטה חדשה להערכת הפוזיציה של אדם בתרחישי אינטראקציה עם רובוט נייד. פותח אלגוריתם אדפטיבי שמסתמך על נתוני מד טווח לייזר. המטרה היא להעריך האם לאדם יש כוונה לבצע אינטראקציה עם הרובוט. יכולת כזו שתיושם ברובוטים בעתיד תאפשר להם להבין טוב יותר את כוונות האדם ולהתאים את עצמם טוב יותר, דבר שישפיע גם על איכות שיתוף הפעולה והאינטראקציה.



תמונה 11 - תרשים תנועה



תמונה 12 - רובוט נייד

מחקר נוסף שנעשה בארה"ב (Torrey et al, 2006) חקר כיצד רובוטים חברתיים יכולים להשתמש ביכולות דיבור אדפטיביות (דיאלוג עם אדם) בכדי לייעץ, להדריך, להנחות, לבדוק או לראיין קבוצות של אנשים. ההנחה היא שלכל אדם יש ידע שונה ואופי שונה ויש צורך להתאים את יכולת הדיבור של הרובוט לאדם מולו הוא עומד. המחקר בדק יתרונות וחסרונות של דיבור אדפטיבי במטרה לשפר היכולות של הרובוט לנהל שיחה טבעית ועיניינית אל מול האדם העומד מולו.



תמונה 13 - רובוט שף חברתי



תמונה 14- שיחה בין רובוט לאדם

נערכו שני ניסויים במטרה לבדוק את ההשפעות של רובוט אדפטיבי אל מול רובוט רגיל על חילופי מידע עם אנשים ויחסים חברתיים. תחילה השתמשו ברובוט כשף במסעדה שמבקש כלים מהעוזר האנושי שלו. נעשה שימוש בדיאלוג לא אדפטיבי שהתאים בעיקר לאנשים "מומחים" שהכירו את הכלים והבינו טוב יותר את רצונותיו של הרובוט. כאשר הרובוט השתמש בדיאלוג אדפטיבי הוא התאים גם לאנשים פחות בקיאים. התוצאות הצביעו שכאשר הרובוט אדפטיבי יש לכך השלכות חיוביות באינטראקציה עם אדם ותורם ללכידות החברתית.

2.21 השפעת סוג האוכלוסייה על דפוסי עבודה מול מערכת רובוטית

אלגוריתמים לומדים שיתבססו על נתונים אודות העבודה אל מול סוגי אוכלוסייה שונים יאפשרו לרובוט להתאים את עצמו בצורה טובה יותר לאדם העומד מולו ולפעול באופן שונה כפי שמצופה ממנו לפעול אל מול כל סוג אוכלוסייה. הספרות עדיין דלילה מאוד בנושא זה וכמעט ואין מחקרים בתחום. במחקר הנוכחי ננסה ללמוד על סוגי האוכלוסיות דרך HRI ולפתח אלגוריתמים לומדים כאלו. מחקרים קודמים שנעשו העידו שלגברים יש יתרון משמעותי בעבודות שדורשות חוזק מנטלי (לדוגמה משימות חזרתיות) (Quaiser-Pohl et al., 2006 ; (Lizarraga & Ganuza, 2003); (Sato et al., 2003). הבדלים משמעותיים בין שני המינים נרשמו אצל סטודנטים להנדסה במשימות של ראייה מרחבית (Nemeth & Hoffman, 2006) גברים תפקדו טוב יותר. מחקר נוסף (Kail, 1991) מציג מודל שמראה הבדלים בין ילדים למבוגרים בנושא עיבוד מידע וזמני תגובה. קבוצות אוכלוסייה אלו נבדלות במספר תכונות שקשורות לביצוע משימות בכלל ומול

מערכות רובוטיות בפרט, לכן יש צורך ממשי להבנת הבדלים אלו בכדי ליישם מערכות מותאמות משתמש.

2.22 הבדלים בין גברים לנשים- תפיסה מרחבית ותפיסת הרובוט

במבט על, הבדלים בתפיסה החזותית בין גברים ונשים הם דבר מקובל בעולמות המחקר למשל (Voyer, & Bryden, 1995; Kimura, 1999; Terlecki & Newcombe, 2005; Feng, 2007), מחקרים אלו חקרו הבדלים אפשריים בין המינים מבחינת היכולות הבסיסיות התומכות בקוגניציה מרחבית. (Kaufman, 2007) הציג את תפקידו של זיכרון העבודה, שמהווה חלק ממנגנון הזיכרון לטווח קצר, בהבדלים מגדריים בהכרה המרחבית, אך הוא לא גובה במחקרים אמפיריים שבוחנים תהליכי קשב שגם צפוי לתרום להבדלים בין זכרים ונקבות בקוגניציה מרחבית. קביעה האם קיימים הבדלים בתשומת לב של המינים למרחב וקביעה האם לא ניתן לטפל בהבדלים כאלה מייצרת עניין רב בספרות וחשיבות מעשית פוטנציאלית.

מחקר שנערך באוניברסיטת אינדיאנה (Schermerhorn, 2008) חקר האם נשים מסתכלות בצורה שונה על רובוטים לעומת גברים, המחקר עסק בתפיסת הרובוט אצל שני המינים בסיטואציות חברתיות קצרות בהם נכחו רובוטים. הממצאים הצביעו על כך שגברים נוטים לחשוב על הרובוט כעל יותר אנושי והוכיחו זאת גם ע"י שאלון וגם ע"י מחוות ופעולות שנקטו בזמן האינטראקציה. לעומת זאת, נקבות רואות את הרובוט יותר דמוי מכונה והתייחסו אליו בהתאם.

2.23 הבדלים בין ילדים למבוגרים – השפעת הגיל על דיוק

מספר ניסויים שבוצעו על ידי פסיכולוגים וחוקרים מתחום גורמי האנוש הראו כי כאשר ילדים צעירים ניגשים לבצע משימות שדורשות הצבעה עם עכבר מחשב, הם מבצעים בכמה רמות פחות טוב ממבוגרים וילדים בוגרים (Hourcade, 2004). באוניברסיטת מרילנד נערך מחקר שמטרתו הייתה להבין טוב יותר את אופן השימוש של ילדים קטנים (גילאי 4-5) בעכברי מחשב, לעומת הביצועים של ילדים מבוגרים יותר. הממצאים הצביעו על הבדלים משמעותיים בין הנערים והילדים בגיל הגן מבחינת היכולת לשלוט על העכבר, הדיוק וזמן ההגעה ליעד. הילדים הקטנים ביצעו את המשימות הרבה פחות טוב. לאור הממצאים החוקרים ממליצים ליצור ממשקי משתמש מיוחדים לגילאים השונים כך שיתאמו את יכולותיהם.

2.24 קבלת החלטות בסביבה דינמית

לכאורה הקושי של אנשים להתמודד עם סביבה דינמית מורכבת נעוצה כנראה בחוסר היכולת שלהם להבדיל בין מחלקות של אובייקטים מוכרים. במאמרם של (Gonzalez, & Quesada, 2003) נבחן השינוי ביכולת התפיסה של האדם את הסביבה כפי שנמדד בשוני בין ההחלטות שהם קיבלו כאשר מתבקשים לחזור על אותה הפעולה מספר פעמים בסביבה דינאמית משתנה. (Gonzalez, & Quesada, 2003) הגיעו לשני ממצאים עיקריים: הראשון, ככל שהאדם הולך ונהייה מנוסה יותר במשימה כך החלטות שהוא מקבל הופכות יותר ויותר דומות. השני, הדמיון בין ההחלטות נקבע על סמך האינטראקציה בין מספר המשימות ולא דווקא על סמך משימה בודדת. במחקר המדובר נאספו נתונים באמצעות מערכת on-line שנועדה לשחזר את המבנה ומורכבות של משימה בעולם דינמי אמיתי. משתתפי המחקר עבדו עם המערכת כמה ימים רצופים וההחלטות שקיבלו נוטרו על ידי מבצעי המחקר כדי להעריך את הביצועים. בשלב הראשון אובחן הדמיון בין ההחלטות בין סבבי העבודה, לאחר מכן בוצע ניתוח נתונים על מנת לבחון את השיפור בביצועים לנוכח ההחלטות שהתקבלו. במחקר השתתפו 64 סטודנטים שעבדו עם המערכת במשך 3 ימים ותוגמלו בשכר.

3 שיטת העבודה

3.1 סקירה כללית - מבט על

על מנת לפתח מודלי סיווג לאוכלוסיות המשתפות פעולה עם הרובוט ולשלבם בעתיד באלגוריתמים מסתגלים שיביאו לשת"פ מיטבי בין האדם לרובוט, יש צורך לגלות מהם מאפייני העבודה של כל אוכלוסייה בסוג עבודה כזה. כפי שיוצג בהמשך מאפיינים אלו זוהו מניתוח הנתונים שנאספו מניסויים שנערכו באוניברסיטת בן-גוריון בנגב. הניסויים כללו עבודה של נבדק בשיתוף פעולה מול רובוט והתחלקו למספר שלבים (טבלה 3). נמדדו מדדי ביצוע שונים שהיוו את הבסיס לזיהוי מאפייני העבודה.

שלבי ניסוי	סוגי הנבדקים	מספר נבדקים	מטרת הניסוי
אתחול ובדיקות	סטודנטים לתואר שני	10	בדיקת היתכנות + setup
שת"פ אדם רובוט במשימת הרכבה	סטודנטים תואר ראשון – גברים ונשים בגירים	137	איסוף נתונים אודות מדדי ביצוע בעבודה עם רובוט (מבוגרים)
שת"פ אדם רובוט במשימת הרכבה	ילדים –מרכז חוסידמן גילאי 10-14	35	איסוף נתונים אודות מדדי ביצוע בעבודה עם רובוט (ילדים)
ניסוי תיקוף מודל חיזוי	סטודנטים תואר ראשון וילדים – גברים ונשים בגירים	25	תיקוף מודל החיזוי ובדיקתו בזמן אמת

טבלה 4 - ניסויים שבוצעו

הסטודנטים שהשתתפו בניסויים הגיעו מהמחלקה להנדסת תעשייה וניהול (תואר ראשון), הילדים הגיעו מפרוייקט "נוער שוחר מדע" של מרכז "חוסידמן" בבאר שבע. הנבדקים התנסו במשימת הרכבה תלת מימדית בשיתוף פעולה עם שני רובוטים לימודיים בעלי 6 דרגות חופש מסוג SCORBOT E4U. הניסוי עצמו כלל משימות הרכבה (איור 18) בצורת מבוך הגיון על בסיס כוח המשיכה המעמיד למבחן את התפיסה החזותית וכישורי החשיבה, המטרה היא לבנות נתיב דרך המגדלים שיעביר את הכדור למגדל היעד (איור 19). כל נבדק התנסה בהרכבה כזו תוך כדי העברת חלקים לשני הרובוטים.

3.2 תכנון הניסוי

על מנת להוציא לפועל את הניסויים בוצעו בדיקות וניסויים מקדימים במעבדה שבעזרתם הוחלט על הדרך בה יתבצעו הניסויים, סוגי הנתונים והצורה בה יאספו. כמו כן תוכנן מערך ניסוי שמטרתו הייתה לאפיין כל פרט בתהליך כך שיתבצע בצורה המיטבית ביותר. עבור רוב המדדים שנבחנו בניסוי נכתבו תוכניות שמוציאות כפלט את הנתונים לקובץ מסודר שממנו ניתן לכתוב מידע, שאר המדדים נאספו באופן ידני ע"י מפעילי הניסוי והועברו לקבצי אקסל. אמנם את זמני הבטלה של הרובוט היה ניתן למדוד בצורה ממוחשבת אך לא היתה אפשרות לבדוק באופן ממוחשב את זמני הבטלה של האדם ולכן הוחלט לבצע מדידה ידנית (עם שעון עצר) עבור שניהם בכדי למנוע שונות במדידות שיכולה להשפיע על התוצאות. דבר נוסף שתוכנן מראש הוא ביצוע 10 ניסויים מקדימים על מנת לאתחל את המערכת בפרמטרים האידיאליים לביצוע הניסויים. בשלב הסופי בכדי לאשר את ביצוע הניסויים נכתב פרוטוקול ניסוי (נספח ז') ואישור של ועדת האתיקה המחלקתית ואושר על ידה.

תהליך תכנון הניסוי כלל מספר שלבים, להלן פירוט השיטה בה התבצעו.

3.2.1 בחירת סביבת העבודה

בשלב זה בוצע בעיקר סיעור מוחות בין חברי הצוות לגבי המיקום המתאים שבו ימוקם תא העבודה, ההתלבטות הייתה בין שלוש מעבדות (Tele-robotics, רובוטים ניידים ומעבדת Scorbace) והשיקולים העיקריים היו מרחב העבודה וזמינות המעבדה. לבסוף נבחרה מעבדת Scorbace שבה הוקצתה עמדה נפרדת בה התבצע הניסוי.

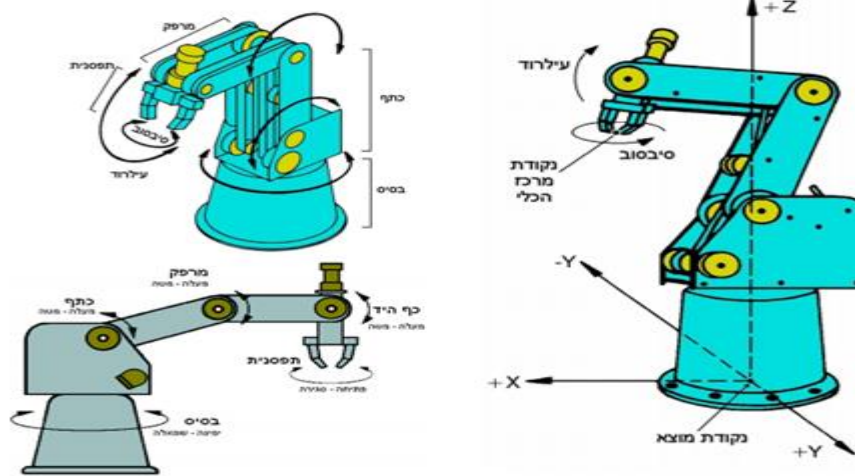
3.2.2 בחירת הרובוט והתקנתו במעבדה

הקריטריונים שנבחנו בעת בחירת הרובוט היו:

- בטיחות - הרובוט חייב להיות בטיחותי למשתמש כזה שיאפשר עבודה ישירה איתו.
- ממשק- הרובוט צריך להיות מסוגל להתממשק עם שפות תכנות מתקדמות.
- זמינות- הרובוט צריך להיות זמין בכדי לאפשר הרצת הניסויים.
- התאמה למשימה- הרובוט חייב להתאים לסוג המשימה שיוצאת לפועל.

לאחר התייעצות עם גורמים מוסמכים וניתוח המצב הוחלט שהחלופה הנכונה היא רובוט לימודי ה Scorbace ER4U שענה על רוב הדרישות. הוקצו לטובת המחקר שני רובוטים כאלו שמוקמו בעמדה שנבחרה ושימשו להרצת הניסויים. Scorbace ER4U היא מערכת רב-תכליתית ואמינה לאימון והוראה המותאמת הן לפעולות עצמאיות והן לשימוש משולב

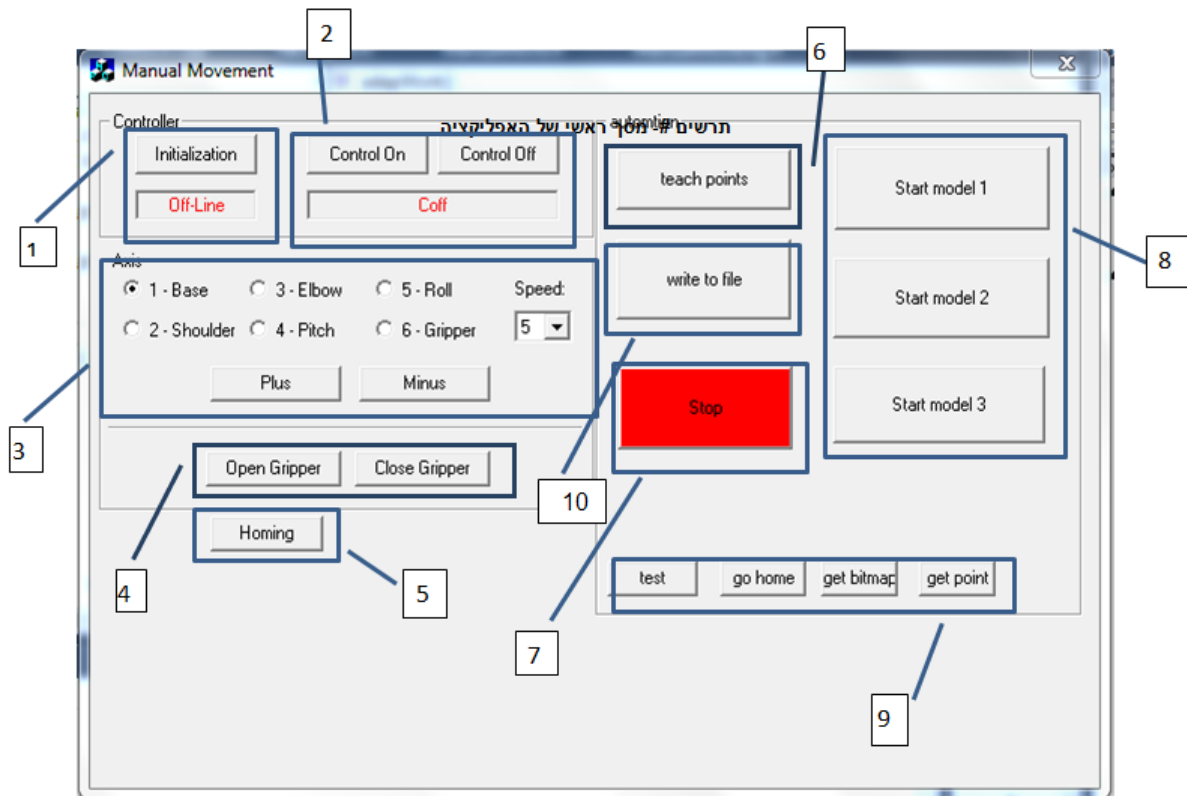
בִּישׁוּמִים אוֹטוֹמַטִּיִּים שֶׁל עֲבוּדָה. מִפְרֵט טֶכְנִי כּוֹלֵל דְּרָגוֹת חֹפֶשׁ מִתּוֹאֵר בְּנִסְפָּח א' , לְהֵלֵן (אִיּוֹר 15) שֶׁרְטוּט טֶכְנִי שֶׁל הַזְרֻעַ הֶרֶבּוּטִית.



תמונה 15- תרשים טכני SCORBOTE

3.2.3 התממשקות עם הרובוט

לרובוט ה־Scorbot ER4U ממשק קיים שמתבצע בעזרת תוכנת Scorbace שהיא תוכנה ייעודית לרובוט זה בלבד ולכן מוגבלת מאוד. ממשק זה לא התאים לפרוייקט בעיקר בגלל שהוא פשוט ומיושן ולא ניתן לכתוב בעזרתו קוד מורכב. האלגוריתמים והמודלים בפרוייקט ייושמו בשפת R וב- C++ ולכן פותחה אפליקציה שמאפשרת ממשק עם הרובוט בעזרת שפות אלו. בכדי לבנות את האפליקציה נדרש לקשר בין הרובוט לשפת התכנות, זה נעשה בעזרת קובץ DLL (USBC.dll) שמבצע המרה של פונקציות ב C++ לשליטה על הבקר ותנועה של הרובוט. באיור 16 ניתן לראות את עיצובו של המסך הראשי באפליקציה שממנו ניתן לשלוט ברובוט בצורה ידנית או אוטומטית. כמו כן ניתן לראות תיעוד קוד בנספח ג'.



תמונה 16- מסך אפליקצית שליטה

מקרא:

1. כפתור אתחול- יצירת קישוריות בין התוכנה לבקר שמפעיל את הרובוט.
2. הפעלת הבקר- כפתורי הפעלה וכיבוי של הבקר.
3. הזזה ידנית- שליטה ידנית בתנועת הרובוט בציריו השונים.
4. שליטה על התופסנית - פתיחה וסגירה.
5. Homing- ביצוע איפוס לצירי הרובוט.
5. למידת נקודות- יצירת ווקטור נקודות במרחב.
6. עצירת חרום של תנועת הרובוט.
7. הפעלה של האלגוריתמים שפותחו.
8. כפתורי עזר.
9. כתיבה לקובץ – כתיבת נתוני ביצועי המערכת לקובץ טקסט חיצוני.

3.2.4 עיצוב ואיפיון תא העבודה

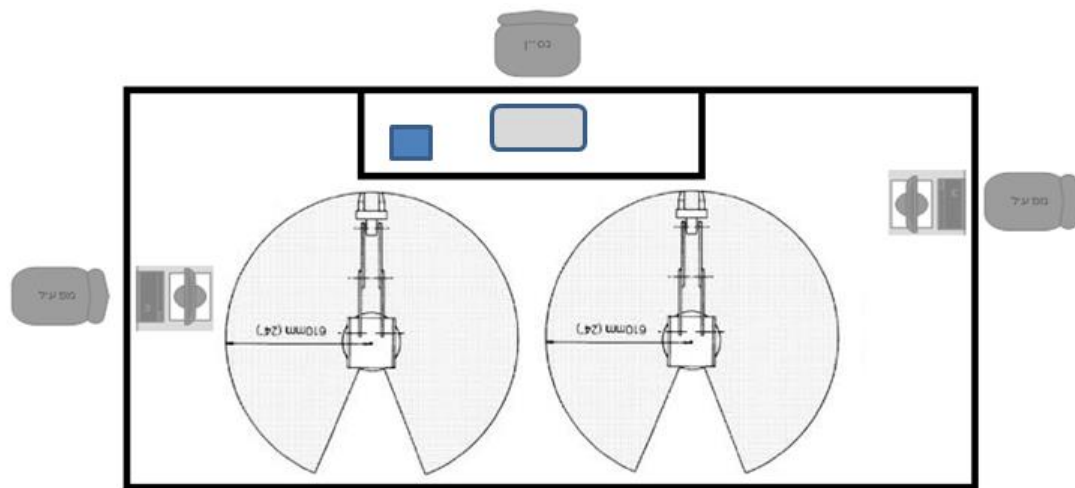
בעיצובו של תא העבודה נלקחו בחשבון מספר נושאים שאיפשרו ליצור תא עבודה נוח שיכיל בתוכו את הנבדק והרובוטים ויאפשר ביצוע מטלה משותפת ואינטראקציה ביניהם בצורה הנוחה לשני הצדדים. העמדה כללה שתי זרועות רובוטיות, מאחר והן כבר היו מקובעות בעמדה האילוף היה להקים מסביבן את עמדות הנבדק, המפעיל ומשטח העבודה. עמדת הנבדק כללה:

- משטח עבודה קטן עליו מתבצעת ההרכבה
- כסא עליו יושב הנבדק בזמן הניסוי
- מיכל מלא בחלקי לגו עבור ההרכבות שמועברות לרובוטים
- מגשית עליה מונחים קלפי תיאור ההרכבה
- מגשית עליה מונחים חלקי ההרכבה הראשית

עמדת המפעיל כללה:

- שני מחשבים שמפעילים את כל המערכת
- כסא בו יושב המפעיל
- שעון עצר

העמדות מוקמו כך שהרובוט יהיה במרכז בין המפעיל לעמדת הנבדק כדי שהוא יוכל לנוע בחופשיות ובמהירות ללא הפרעה והאינטראקציה בין האדם לרובוט תוכל להיות נוחה וללא הפרעות. באיור 17 ניתן לראות שרטוט טכני של תא העבודה ממבט על.



תמונה 17 - עמדת עבודה מבט על

3.2.5 אפיון משימות ההרכבה

אפיון משימת ההרכבה ניסה לענות על מספר דרישות עיקריות: הרכבה פשוטה שתתאים לתא העבודה ולתנועת הרובוט, ביצוע בשלבים מוגדרים שיאפשרו את האינטראקציות והמעברים בין האדם לרובוט והתאמה לזמני התגובה של הרובוט (מרווחי זמן מתאימים בין השלבים). המטרה הייתה לאתגר את המשתתפים במשימה קוגניטיבית תוך כדי ממשק מתמיד עם הרובוטים. נבחרה דווקא משימה קוגניטיבית שמשלבת מספר רב של אלמנטים אתגריים בכדי שמדדי הביצועי יוכלו להעיד משהו על משתף הפעולה ויתנו מגוון רחב יותר של אספקטים בעבודה מול הרובוט. המשימה שנבחרה היא בניית מבוך הגיון על בסיס כוח המשיכה המעמיד למבחן את התפיסה החזותית וכישורי החשיבה המטרה היא לבנות נתיב דרך המגדלים שיעביר את הגולה למגדל היעד האדום. קיימות מספר רמות קושי וכ- 60 משימות הרכבה שונות, כאשר כל משימה מתוארת בקלף המוצג למפעיל. להלן איורים (18-19) של משטח העבודה ועליו דוגמא להרכבה במצבה הסופי ואחד מקלפי המשחק:



תמונה 18 - לוח הרכבה



תמונה 19 - קלף משימה

בנוסף נבחרו עוד שתי משימות הרכבה פשוטות מחלקי לגו שאותם הנסיין יעביר לרובוטים, לכל רובוט יש חלק ייעודי שאותו הוא צריך לקבל. באיורים (20-21) ניתן לקבל המחשה להרכבות.



תמונה 20 - הרכבה עבור רובוט שמאל



תמונה 21 - הרכבה עבור רובוט ימין

3.2.6 התקנת חיישנים בעמדה

הותקנו שני חיישני קירבה אינפרא אדום (TCRT5000L), אחד בכל ראש של רובוט מעל התופסנית עבור פתיחתה ברגע הגשת ידו של האדם לעברה, האותות שהתקבלו מהחיישנים נוטרו ובעזרתם חושבו חלק ממדי הביצוע. החיישנים חוברו לבקר A2D שהמיר את האות האנלוגי לדיגיטלי כך שתוכנית השליטה ברובוט תדע לנטר אותו ולחשב בעזרתו את המדדים המתאימים. באיור 22 ניתן לראות את המיקומים של החיישנים בעמדה.



תמונה 22 - עמדת העבודה

חיישני IR - IR optical Sensor
TCRT5000L



תמונה 23 - חיישן IR

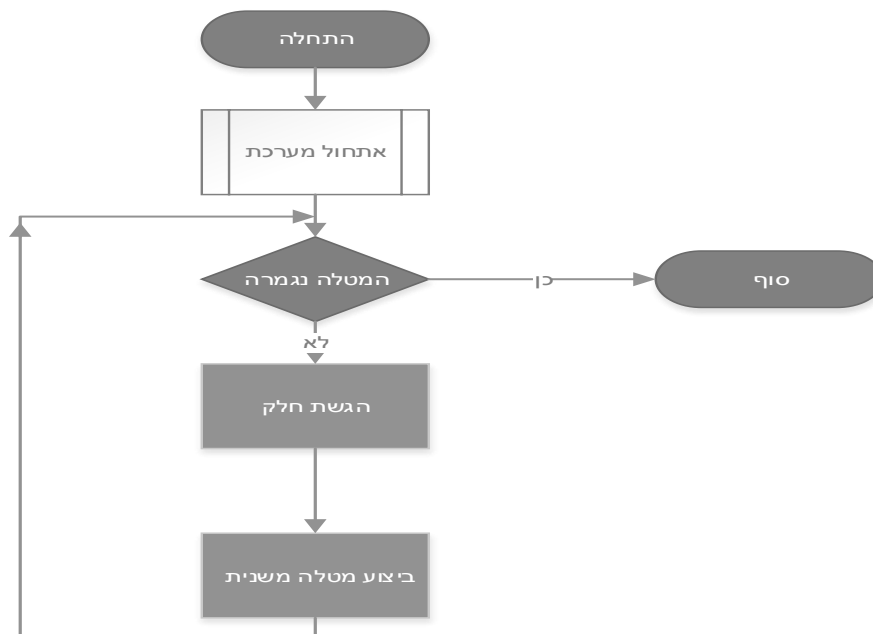
בקר A2D input/output ממיר את אותות ה-IR לאותות דיגיטליים שמועברים באמצעות USB למחשב הראשי



תמונה 24 - בקר A2D

3.3 אלגוריתם לפעולת הרובוט

אלגוריתם זה מתבסס על המודל הפשוט ביותר לשת"פ אדם – רובוט מבוסס זמן (Timing model). אלגוריתם זה משתמש באינטרוולי זמן קבועים, שמוגדרים לו מראש, בין הפעולות של הרובוטים. בכדי למצוא את הזמנים האידיאליים בין פעולה לפעולה בוצע חקר זמנים שהתבסס על סדרה של 10 ניסויים שבוצעו במערכת, נמדדו זמני פעולת האדם וע"י ממוצע של כלל הזמנים שהתקבלו בכל שלב הושמו משכי האינטרוולים באלגוריתם, 60 שניות בין כל אינטרוול של הרובוט הימני ו 30 שניות בין כל אינטרוול של הרובוט השמאלי. בין כל אינטרוול מבצע הרובוט את עבודתו המשנית ובסיומה מגיע לבקש חלק נוסף מהנבדק. להלן תרשים הזרימה (איור 25) המתאר את האלגוריתם. בנוסף קטעי קוד והסברים מצורפים בנספח ג'.



תמונה 25 -תרשים זרימה

3.4 נבדקים

המשתתפים בניסוי אשר שיתפו פעולה עם הרובוטים בעמדת העבודה הורכבו ממספר סוגים שונים של אוכלוסיות, עפ"י הסיווגים הבאים:

- בוגרים – 67 נשים (גיל ממוצע = 25.3 עם סטיית תקן = 2.23) ו 70 גברים (גיל ממוצע = 26.2 עם סטיית תקן = 2.1)
- ילדים – 21 בנים (גיל ממוצע = 13.7 עם סטיית תקן = 0.7) ו 14 בנות (גיל ממוצע = 13.5 עם סטיית תקן = 0.6)

- עיסוק – הקבוצה הבוגרת מכילה סטודנטים להנדסת תעשייה וניהול מאוניברסיטת בן גוריון, הקבוצה הצעירה מכילה ילדים שמשתתפים בקורס רובוטיקה לנוער במסגרת מרכז "חוסידמן" לנוער שוחר מדע.
- כל המשתתפים לא התנסו בעבר בסוג כזה של עבודה עם רובוט.

3.5 מדדי ביצוע

בכדי לבחון את פעולת המשתמשים השונים אל מול המערכת הרובוטית, נאספו הנתונים אודות מדדי הביצוע הבאים ששימשו את הבסיס למאפייני העבודה:

- זמן הרכבה של כל משימה (קלף) שהנסיין הצליח להרכיב.
- מספר המשימות (קלפים) שהנסיין השלים.
- זמני הבטלה של כל רובוט בכל אינטרוול.
- מספר החלקים התקינים שהנסיין העביר לרובוטים.

3.6 הרצת הניסויים

בסיום הפיתוח וההרצות הראשונות של המערכת והאלגוריתמים בוצעו ניסויים בעמדת ההרכבה אשר באו לבחון את ביצועי המערכת בזמן אמת ולאסוף נתונים למחקרי המשך בתחום, הניסויים התבצעו במעבדת Scorbace אשר באוניברסיטת בן-גוריון. המוטיבציה להגיע לניסוי הייתה נקודת בונס בציון הסופי של קורס אוטומציה לסטודנטים ופרס בעל ערך כספי לילדים. בשני המקרים הובטח לשלושת המצטיינים (אלו שיצליחו להשלים כמה שיותר משימות) פרס כספי נוסף. בניסויים השתתפו בסה"כ 207 נבדקים משני המינים וטווח הגילאים שעברו שני שלבים עיקריים: עבודה עם הרובוטים ומענה על שאלון בסוף הניסוי.

3.7 מהלך הניסוי

מהלך הניסוי מורכב ממספר שלבים (איור 28). הנבדק מגיע למעבדה ומתיישב אל מול הרובוטים בעמדה ומקבל תדריך מפורט על מהלך הניסוי. מיד בסיום התדריך הנבדק מקבל את המשימה הראשונה ומתחיל להרכיבה (מקבל את קלף מספר אחד של המבוך התלת מימדי) כאשר בסיום כל הרכבה הנבדק מקבל משימה חדשה, תוך כדי ההרכבה שני הרובוטים מגיעים באינטרוולי זמן קבועים לבקש חלקי הרכבה מהנבדק. לרשותו של הנבדק עומדים חלקי הרכבה בעמדה ומוסבר לו מראש איזה חלק כל רובוט מבקש אך לא נאמר לו באיזה שלב של הניסוי הרובוטים יבקשו את החלקים. במערכת מספר חוקים:

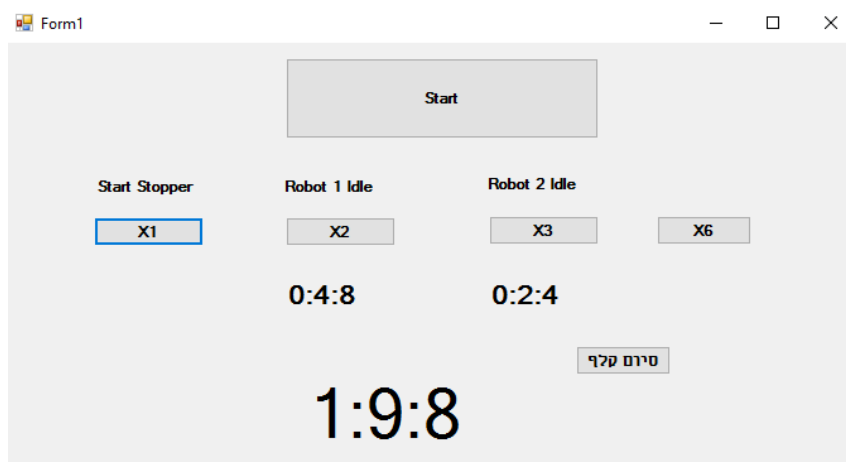
1. מטרת הניסוי היא להשלים כמה שיותר משימות הרכבה (קלפים), לשם כך עומדות לרשותו של הנבדק 15 דקות, כאשר זמן המשימה יכול לנוע בקצביים שונים.

2. כאשר הרובוט הימיני מחכה לחלק שלו שעון המשימה נע בקצב של פי 2 משעון רגיל

3. כאשר הרובוט השמאלי מחכה לחלק שלו שעון המשימה נע בקצב של פי 3 משעון רגיל

4. כאשר שני הרובוט מחכים לחלקים שלהם שעון המשימה נע בקצב של פי 6 משעון רגיל

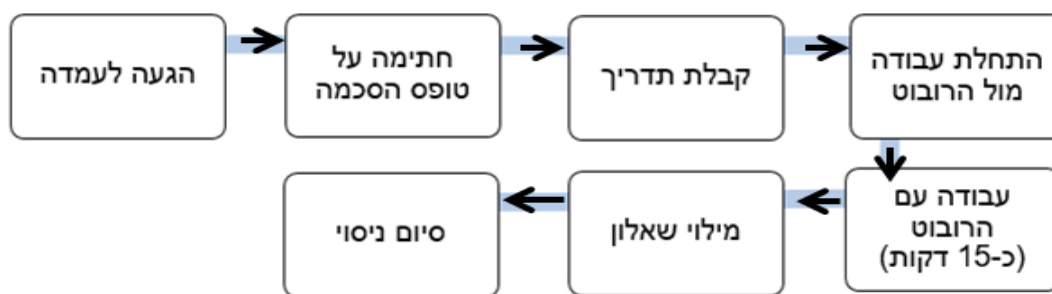
לשם כך נכתבה תוכנית שמודדת את הזמנים ב C# להלן מסך GUI כמו כן הקוד מתואר בנספח ה', באיור 26 מתואר ה GUI של התוכנית.



תמונה 26 - GUI אפליקציית שעון

לפני הנבדק עומדות שתי חלופות בכל אינטראקציה עם אחד או יותר מהרובוטים. החלופה הראשונה, להתייחס לרובוט ולהרכיב עבורו את החלק שהוא מבקש. לחלק אין קשר למשימה הראשית שעליו לבצע, במקרה זה הוא יאבד זמן הרכבה מהמשימה הראשית. בחלופה השנייה, להמשיך ולנסות להשלים את המשימה הראשית שלו. במקרה זה שעון המשימה ינוע בקצב גבוה יותר ויגרע מזמן ההרכבה של המשימה הראשית. הנבדק צריך לקבל את ההחלטה בכל אינטראקציה באיזו חלופה לבחור בכדי לבצע את הניסוי על הצד הטוב ביותר. על מנת ליצור תחרותיות ורצון להצליח הנבדקים יתוגמלו על פי ביצועיהם. בסיום הניסוי הנבדקים מילאו שאלון בנוגע לחוויה שעברו. תוצאות ניתוח התשובות והשאלון מתוארים בנספח ו'.

בתמונה 30 מתואר תרשים זרימה עבור שלבי הניסוי.



תמונה 27 -תרשים זרימה שלבי ניסוי

3.8 שיטת הניתוח

לאחר סיום ביצוע הניסויים ואיסוף הנתונים החל שלב הניתוח והסקת המסקנות, בשלב זה קובצו ומויינו הנתונים על מנת לבצע ניתוחים סטטיסטיים. בתחילה הוכנסו פלטי המערכת לקבצי אקסל מסודרים (נספח ד') ולאחר מכן הועברו לתוכנת ה- SPSS לצורך ניתוחים סטטיסטיים רגישים יותר (פלטי SPSS מפורטים בנספח ב'). בתחילה בוצע ניפוי חריגים כדי להגיע לסט נתונים מדויק שממנו ניתן לכתוב מידע, במקביל יוצרו גרפים מתאימים באקסל ונבחנו הנתונים.

עבור כל מדד שנבדק אל מול שני סוגי אוכלוסייה שונים בוצע מבחן ANOVA-one way (analysis of variance) להשוואת הממוצעים בעזרת מבחן F שקבע ברמת מובהקות של 95% ($\alpha = 0.05$) האם יש הבדל מובהק במדדי הביצוע בין שני האוכלוסיות או לא. כל המבחנים והפלטים של ה- SPSS מוצגים בפירוט בפרק התוצאות ובנספחים הקשורים.

3.9 מודל הסיווג

על בסיסם של הנתונים שנאספו מהניסויים שתוארו מעלה פותח מודל שמטרתו לזהות את סוג האוכלוסייה על בסיס מדדי הביצוע בעמדה. המודל עצמו פותח בסביבת SPSS (נספח ב) ויושם ב- ++C (נספח ג') על מנת להתממשק עם הרובוט. המודל הורכב משני רגרסיות לוגיסטיות (יפורט בהמשך) המבוצעות אחת לאחר השנייה ברצף, ומטרתן לשייך את הנבדק לקבוצת אוכלוסייה ספציפית. כאשר בשלב ראשון נקבע האם מדובר בגבר או אישה ובשלב השני נקבע האם מדובר בילד או מבוגר.

הנבדק מבצע את הניסוי ומנסה להצליח כמה שיותר משימות ב 15 דקות. כאשר המודל נותן את התוצאה הסופית לאחר שהנבדק יסיים את המשימה השלישית שלו, עד אז נאספים כל מדדי הביצוע הדרושים שהם בעצם המשתנים המסבירים של המודל שעל פיהם המודל מחשב לאיזה סוג אוכלוסייה שייך הנבדק.

3.9.1 פיתוח המודל

המודל משתמש ברגרסיה לוגיסטית על מנת לשייך את משתף הפעולה עם הרובוט לאחת מהקבוצות שנבחנו בניסויים שבוצעו. ארבעת קבוצות האפיון הן: גבר בוגר, אישה בוגרת, ילד וילדה. מטרת המודל היא לחזות, על סמך נתוני עבר, לאיזו קבוצה משתייך האדם העובד מול הרובוט במטרה להתאים את אלגוריתם העבודה של הרובוט אל האדם. סט הנתונים מורכב מהנתונים שנאספו בניסויים שבוצעו בשלב הקודם, כמו כן, הנתונים שיאספו מכל נסיין נוסף שישתתף בניסויי המשך שיתקפו את המודל יתווספו לסט הנתונים המרכזי וישמשו לעדכון המודל.

רגרסיה לוגיסטית היא רגרסיה בה המשתנה התלוי הוא בינארי, כלומר, יש בו רק שתי קטגוריות (כמו "צעיר" ו-"מבוגר", או "גבר" ו-"אישה"), המוצגות באמצעות הערכים 0 ו-1. בשימוש במודל זה מתקבלת פונקציה של ההסתברות לערך 1 כפונקציה של המשתנים הבלתי-תלויים, כלומר: מה הסיכוי שהערך של המשתנה התלוי יהיה 1 כפונקציה של המשתנים הבלתי-תלויים. השימוש ברגרסיה לוגיסטית מתאים כאשר המשתנה המוסבר הוא בסולם קטגוריאלי בעל שני ערכים בלבד. במחקר זה, מאחר וקיימות 4 קבוצות אפיון המודל נבנה משני רגרסיות, אחת שתחליט האם מדובר בגבר או אישה והשנייה שתחליט האם מדובר בילד או במבוגר. איחוד תוצאות המשתנים המוסברים ישייך את האדם לאחת מקבוצות האפיון. להלן פירוט מרכיבי המודל כאשר הנוסחאות מתוארות בנספח ב':

מודל רגרסיה ראשון (נספח ב')

- משתנה מוסבר – מין האדם (זכר או נקבה)
- משתנים מסבירים:
 1. זמן הרכבה משימה ראשונה
 2. זמן הרכבה משימה שנייה
 3. זמן הרכבה משימה שלישית
 4. מספר האינטראקציות עם הרובוט
 5. זמני בטלה רובוטים

מודל רגרסיה שני

- משתנה מוסבר – גיל האדם (צעיר או מבוגר)
- משתנים מסבירים:

1. זמן הרכבה משימה ראשונה
2. זמן הרכבה משימה שנייה
3. זמן הרכבה משימה שלישית
4. מספר האינטראקציות עם הרובוט
5. זמני בטלה רובוטים

בתחילה המודלים הורצו על סט הנתונים הראשי (נספח ד') ב SPSS על מנת לבדוק את מובהקות המודל. להלן פירוש הפלט והבנת התוצאות, חשוב להוסיף שה- SPSS מספק פלט רב בהרצת רגרסיה לוגיסטית (כפי שמתואר בנספח ב'), כאן נתמקד בטבלאות המרכזיות החשובות להבנת הפלט.

הראשונה היא טבלת Omnibus Tests of Model Coefficients. כאן, תחת שורת Model, נמצא את ערך חי-בריבוע ואת מובהקות המודל. אלו דרושים להצגת התוצאות וכן להבנת המודל. ניתן לראות בשלב זה שהמודל שנבנה מובהק וזה מאפשר לי לדחות את השערת האפס ולהגיד כי נמצא קשר בין המשתנה התלוי למשתנים הבלתי-תלויים בשני המודלים.

מודל ראשון

Omnibus Tests of Model Coefficients				
		Chi-square	df	Sig.
Step 1	Step	60.999	5	.000
	Block	60.999	5	.000
	Model	60.999	5	.000

מודל שני

Omnibus Tests of Model Coefficients				
		Chi-square	df	Sig.
Step 1	Step	24.026	5	.000
	Block	24.026	5	.000
	Model	24.026	5	.000

טבלה 5-Omnibus Tests of Model Coefficients

הטבלה הבאה היא Model Summary. בטבלה זו ניתן לראות את אחוז השונות המוסברת, כלומר כמה מהשונות במשתנה התלוי מוסברת על-ידי המודל (ערך זה מקביל לערך R^2 ברגרסיה לינארית). חישוב אחוז השונות מופיע בשתי שיטות: Snell & Cox ו-

Nagelkerke והוא נע בין 33.8% ל-45.1% במודל הראשון ובין 15% ל-22.9% במודל השני. נהוג לדווח על אחוז השונות המוסברת לפי Nagelkerke וכך מוצג בהמשך.

מודל ראשון

Model Summary			
Step	-2 Log likelihood	Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square
1	143.496 ^a	.338	.451

a. Estimation terminated at iteration number 5 because parameter estimates changed by less than .001.

מודל שני

Model Summary			
Step	-2 Log likelihood	Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square
1	133.045 ^a	.150	.229

a. Estimation terminated at iteration number 5 because parameter estimates changed by less than .001.

טבלה 6 - Model Summary

טבלה נוספת היא טבלת סווג, Classification Table, כפי שהוסבר מעלה, רגרסיה לוגיסטית נותנת את ההסתברות לערך 1 (במקרה זה, הסיכוי להיות זכר או ילד) כפונקציה של המשתנים הבלתי תלויים. ה-SPSS מתייחס בניתוח זה לכל ערך גבוה מ-0.5 כ-"זכר" או "ילד" ולכל ערך נמוך מ-0.5 כאל 0 ("נקבה" או "מבוגר"), נרצה להעריך את יכולתנו לנבא את המשתנה התלוי לפי המשתנים הבלתי-תלויים שהשתמשנו בהם, כדרך נוספת להבין את מידת ההתאמה של המודל. בטבלה זו נמצא מידע רב – ראשית כל, מסוכמים המקרים שנצפו בניסוי תחת משבצת Observed. המקרים ש-SPSS מנבא בעזרת משתני המודל נמצאים במשבצת Predicted. כמו כן מצויינת מידת ההתאמה בין הערכים הנצפים לערכים המנובאים ב-Percentage Correct.

מודל ראשון

Classification Table^a

Observed		Predicted		
		gender		Percentage Correct
		f	m	
Step 1	gender f	51	18	73.9
	m	12	67	84.8
Overall Percentage				79.7

a. The cut value is .500

מודל שני

Classification Table^a

Observed			Predicted		
			type		Percentage Correct
			adult	child	
Step 1	type	adult	108	7	93.9
		child	29	4	12.1
Overall Percentage					75.7

a. The cut value is .500

טבלה 7 – Classification Table

כעת נפנה לטבלת Variables in the Equation, בה נראה את התרומה של כל אחד מהמשתנים הבלתי-תלויים למודל וכן את המובהקות הסטטיסטית של כל משתנה. בטבלה נראה עבור כל משתנה בלתי-תלוי את תרומתו למודל ואת מובהקות תרומתו. ערך Wald הוא הערך באמצעותו מחושבת המובהקות על-פי מספר דרגות החופש, בדומה לערכי F או t ברגרסיות או בניתוח שונות, בהתאמה. הערכים החשובים ביותר הם ערך ה-Sig, שמראה את מובהקותה של תרומת המשתנה למודל. ערך חשוב נוסף הוא Exp(B), מדד למידה שבה המשתנה משפיע על הסיכוי לערך 1 במשתנה הבלתי-תלוי.

Variables in the Equation

	B	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)
Step 1 ^a						
card1	.000	.007	.001	1	.975	1.000
card2	-.002	.003	.531	1	.466	.998
card3	.000	.001	.008	1	.927	1.000
total_interactions	-.550	.133	17.102	1	.000	.577
Total_idle_time	.023	.005	23.979	1	.000	1.023
Constant	-2.232	1.921	1.350	1	.245	.107

a. Variable(s) entered on step 1: card1, card2, card3, total_interactions, Total_idle_time.

מודל ראשון

Variables in the Equation

	B	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)
Step 1 ^a						
card1	-.026	.011	5.847	1	.016	.975
card2	-.014	.005	7.187	1	.007	.986
card3	-.002	.001	1.865	1	.172	.998
total_interactions	-.019	.114	.027	1	.870	.982
Total_idle_time	.010	.004	5.309	1	.021	1.010
Constant	-.155	2.160	.005	1	.943	.857

a. Variable(s) entered on step 1: card1, card2, card3, total_interactions, Total_idle_time.

מודל שני

טבלה 8 - תרומה למודל

3.9.2 תיקוף מודל החיזוי

בכדי לתקף את המודלים שנבנו הנתונים חולקו לשני חלקים: 0.75 מהנתונים (train data) שימשו עבור הלמידה של המודלים והחלק הנותר שימש עבור תיקופם. שיטה נפוצה לתיקוף מודלים היא k-fold cross validation שבעצם מחלקת את סט הנתונים ל-k חלקים וכל פעם מבצעת למידה על כל החלקים פרט לחלק אחד. כך עבור כל החלקים, השימוש הוא בעיקר בכדי למנוע over fitting לנתונים ולמקסם את היכולת ללמוד מהנתונים ולאבד כמה שפחות מידע, סט הנתונים כלל נתונים אודות כ – 150 נסיינים ובוצע בו 5-fold cross validation, המטרה הייתה לבצע חלוקה ל train\test ביחס של 75% אל מול 25% כאשר זה בוצע 5 פעמים כך שהתוצאה בסוף היא הממוצע של התוצאות.

טיב המודלים שנבנו נבחן ע"י עקומת ROC (Receiving Operating Characteristics) שמראה באופן גרפי את הדיוק והשגיאה של המודל, כמו כן העקומה היא כלי ויזואלי להצגת מדדי טיב הניבוי שהוצגו קודם. בחינת העקומה והשטח שמתחתיה מלמדת עד כמה המודל שבנינו הוא טוב ומדויק ועד כמה אנו יכולים להסתמך עליו במתן תחזית עתידית. כל מודל נבדק בנפרד ולאחר מכן נבדק גם המודל הסופי שהוא הממוצע של שאר המודלים.

בכדי לבדוק בפועל את טיב המודל שנבנה בוצעו ניסויים ייעודיים שבהם המודל ניסה לסווג את משתף הפעולה תוך כדי עבודה עם הרובוט, בניסוי השתתפו 25 נבדקים משלושת סוגי האוכלוסיות ועליו יפורט בפרק הבא.

בכדי להוציא לפועל את הניסויים המשקולות של המודל ייושמו בקוד ++C שמפעיל את הרובוט (נספח ג') כך שהמערכת מוציאה כפלט את סוג הנסיין שסווג ע"י המודל לאחר 15 דקות העבודה.

4 תוצאות

בסיום כלל הניסויים המתוארים בטבלה 8, נאספו נתונים אודות 172 נבדקים שעבדו עם הרובוט, כלל הנתונים הועברו ל SPSS ושם נותחו (נספח ב'). התוצאות שהתקבלו התמקדו בניתוח ההבדלים במדדי הביצוע בין נשים לגברים והבדלים בין ילדים למבוגרים.

שלבי ניסוי	סוגי הנבדקים	מספר נבדקים	מטרת הניסוי
שת"פ אדם רובוט במשימת הרכבה	סטודנטים תואר ראשון – גברים ונשים בגירים	137	איסוף נתונים אודות מדדי ביצוע בעבודה עם רובוט (מבוגרים)
שת"פ אדם רובוט במשימת הרכבה	ילדים – מרכז חוסידמן גילאי 10-14	35	איסוף נתונים אודות מדדי ביצוע בעבודה עם רובוט (ילדים)
ניסוי תיקוף	סטודנטים תואר ראשון – גברים נשים וילדים	16 מבוגרים 9 ילדים	תיקוף מודל הסיווג

טבלה 9 - שלבי הניסוי

4.1 הבדלים- נשים מול גברים

4.1.1 אינטראקציות עם הרובוט

מדד זה מעיד על תשומת הלב שהנסיין מעניק לרובוט, ככל שמספר האינטראקציות גבוה יותר כך יש יותר שיתוף פעולה בעמדה. קיים הבדל מובהק ($F=24.72$, $P=0.001$) בין נשים לגברים במספר האינטראקציות עם הרובוט (טבלאות 10/21). מספר האינטראקציות של נשים ($M=9.44$, $SD=1.19$) היה גבוה ב 17% מזה של הגברים ($M=8.06$, $SD=1.89$). בעוד שהגברים היו עסוקים יותר במשימת ההרכבה, הנשים נענו יותר לבקשות הרובוט וחילקו את הקשב שלהן בצורה נכונה.

gender	Mean	N	Std. Deviation
m	8.06	68	1.892
f	9.44	64	1.194
Total	8.73	132	1.730

ANOVA Table

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
total_interactions * gender	Between Groups (Combined)	62.667	1	62.667	24.723	.000
	Within Groups	329.515	130	2.535		
	Total	392.182	131			

טבלה 10 - טבלת ANOVA אינטראקציות

4.1.2 משימה ראשונה

מדד זה מעיד בעיקר על למידה מהירה של המטרה והבנת המשימה, צריך לזכור שהמשימה הראשונה יחסית פשוטה ולא מצריכה משאבים קוגניטיביים מיוחדים ולכן הצלחה בה מעידה בעיקר על הבנה מהירה של המטרה ותחילת תפעול מהיר. קיים הבדל מובהק ($F=4.046$, $p=0.046$) בין גברים ונשים בזמן הביצוע של המשימה הראשונה (טבלאות 19/11). גברים ($M=59.22$, $SD=27.48$) סיימו את המשימה הראשונה מהר יותר ב 19% בממוצע מהנשים ($M=70.67$, $SD=37.43$).

card1

gender	Mean	N	Std. Deviation
m	59.22	68	27.489
f	70.67	64	37.437
Total	64.77	132	33.068

ANOVA Table

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
card1 * gender	Between Groups (Combined)	4323.381	1	4323.381	4.046	.046
	Within Groups	138925.801	130	1068.660		
	Total	143249.182	131			

טבלה 11 - טבלת ANOVA משימה 1

4.1.3 זמני בטלה – רובוטים

קיים הבדל מובהק ($F=29.08$, $p=0.001$) בין גברים ונשים מבחינת זמני הבטלה הכוללים של הרובוטים תוך כדי הניסוי כולו (טבלאות 12/19). אצל נשים ($M=312.65$, $SD=74.56$) הם נמוכים יותר בכ-9% מאשר אצל הגברים ($M=367.11$, $SD=36$). כמו במדד האינטראקציות (3.1.1) גם כאן נראה שהנשים מעניקות יותר תשומת לב לרובוטים, לעומת זאת הגברים נוטים יותר להתרכז במשימה הראשית ופחות לשתף פעולה עם הרובוטים.

Total_idle_time

gender	Mean	N	Std. Deviation
m	367.1176	68	36.00146
f	312.6563	64	74.56609
Total	340.7121	132	63.90087

ANOVA Table

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Total_idle_time * gender	Between Groups (Combined)	97789.564	1	97789.564	29.082	.000
	Within Groups	437125.496	130	3362.504		
	Total	534915.061	131			

טבלה 12 - טבלת ANOVA זמן בטלה

4.1.4 תוצאות נוספות

1. אין הבדל מובהק ($F=0.015$, $p=0.902$) בזמני ביצוע המשימה השניה (טבלה 13), ממוצע הגברים ($M=192.72$, $SD=54.121$) גבוה יותר ב 0.8% מזה של הנשים ($M=191.16$, $SD=79.026$).
2. אין הבדל מובהק ($F=3.65$, $p=0.059$) בזמני ביצוע המשימה השלישית (טבלה 13), ממוצע הגברים ($M=161.07$, $SD=51.565$) נמוך יותר ב 10% מזה של הנשים ($M=179.47$, $SD=38.92$).
3. אין הבדל מובהק ($F=3.290$, $p=0.077$) בזמני ביצוע המשימה הרביעית (טבלה 13), ממוצע הגברים ($M=208.95$, $SD=52.413$) נמוך יותר ב 12.5% מזה של הנשים ($M=234.89$, $SD=36.228$).
4. אין הבדל מובהק ($F=0.087$, $p=0.768$) מבחינת מספר המשימות המוצלחות (טבלה 13), ממוצע הגברים ($M=2.91$, $SD=1.033$) גבוה יותר ב 1.7% מזה של

Report

gender		card2	card3	card4	num_of_cards
m	Mean	192.72	161.07	208.95	2.91
	N	60	45	22	68
	Std. Deviation	54.121	51.565	52.413	1.033
f	Mean	191.16	179.47	234.89	2.86
	N	55	45	19	64
	Std. Deviation	79.026	38.926	36.228	1.006
Total	Mean	191.97	170.27	220.98	2.89
	N	115	90	41	132
	Std. Deviation	66.894	46.360	46.950	1.016

ANOVA Table

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
card2 * gender	Between Groups (Combined)	69.211	1	69.211	.015	.902
	Within Groups	510053.711	113	4513.750		
	Total	510122.922	114			
card3 * gender	Between Groups (Combined)	7617.600	1	7617.600	3.650	.059
	Within Groups	183666.000	88	2087.114		
	Total	191283.600	89			
card4 * gender	Between Groups (Combined)	6860.232	1	6860.232	3.290	.077
	Within Groups	81312.744	39	2084.942		
	Total	88172.976	40			
num_of_cards * gender	Between Groups (Combined)	.090	1	.090	.087	.768
	Within Groups	135.205	130	1.040		
	Total	135.295	131			

4.2 הבדלים - ילדים מול מבוגרים

4.2.1 משימה ראשונה

קיים הבדל מובהק ($F=4.256$, $p=0.041$) בין ילדים ($M=52.37$, $SD=25.259$) למבוגרים ($M=64.77$, $SD=33.068$) בזמן הביצוע של המשימה הראשונה (טבלאות 14/18). ילדים ביצעו את המשימה ב-23% מהר יותר ממבוגרים בממוצע. נראה שילדים למדו מהר יותר את המטרה ואת המוטל עליהם והצליחו לסיים את המשימה בזמנים טובים יותר משל המבוגרים (שיש לזכור היו סטודנטים בהנדסה), תוצאה מפתיעה מאוד לכשעצמה.

card1

type	Mean	N	Std. Deviation
adult	64.77	132	33.068
child	52.37	35	25.259
Total	62.17	167	31.926

ANOVA Table

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
card1 * type	Between Groups (Combined)	4254.611	1	4254.611	4.256	.041
	Within Groups	164941.353	165	999.645		
	Total	169195.964	166			

טבלה 14 - טבלת ANOVA זמן ביצוע קלף 1

4.2.2 משימה שניה

קיים הבדל מובהק ($F=5.400$, $p=0.022$) בין ילדים ($M=163.82$, $SD=35.135$) למבוגרים ($M=191.97$, $SD=66.894$) בזמן הביצוע של המשימה השנייה (טבלאות 18/15). הילדים סיימו גם את המשימה השנייה בכ-17% מהר יותר מהמבוגרים.

card2

type	Mean	N	Std. Deviation
adult	191.97	115	66.894
child	163.82	33	35.135
Total	185.70	148	62.267

ANOVA Table

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
card2 * type	Between Groups (Combined)	20327.487	1	20327.487	5.400	.022
	Within Groups	549625.831	146	3764.560		
	Total	569953.318	147			

טבלה 15 - טבלת ANOVA זמן ביצוע קלף 2

4.2.3 משימות מוצלחות

קיים הבדל מובהק ($F=10.840$, $p=0.001$) במספר המשימות המוצלחות (טבלאות 16/20), ממוצע הילדים ($M=3.51$, $SD=0.951$) גבוה יותר ב 21% מזה של המבוגרים ($M=2.89$, $SD=1.016$).

num_of_cards			
type	Mean	N	Std. Deviation
adult	2.89	132	1.016
child	3.51	35	.951
Total	3.02	167	1.032

ANOVA Table

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
num_of_cards * type	Between Groups (Combined)	10.908	1	10.908	10.840	.001
	Within Groups	166.038	165	1.006		
	Total	176.946	166			

טבלה 16 -טבלת ANOVA משימות מוצלחות

4.2.4 תוצאות נוספות

1. אין הבדל מובהק ($F=3.810$, $p=0.053$) בזמני ביצוע המשימה השלישית (טבלה 17), ממוצע הילדים ($M=152.03$, $SD=34.133$) נמוך יותר ב 11.8% מזה של המבוגרים ($M=170.27$, $SD=46.360$).
2. אין הבדל מובהק ($F=1.693$, $p=0.198$) בזמני ביצוע המשימה הרביעית (טבלה 17), ממוצע הילדים ($M=204.80$, $SD=52.219$) נמוך יותר ב 7.8% מזה של המבוגרים ($M=220.98$, $SD=46.950$).
3. אין הבדל מובהק ($F=1.944$, $p=0.165$) בזמני הבטלה של הרובוטים בכל הניסוי (טבלה 17), ממוצע הילדים ($M=356.37$, $SD=34.63$) גבוה יותר ב 4.5% מזה של המבוגרים ($M=340.71$, $SD=63.9$).
4. אין הבדל מובהק ($F=1.213$, $p=0.272$) במספר האינטראקציות שביצעו הנסיינים עם הרובוט (טבלה 17), ממוצע הילדים ($M=8.34$, $SD=2.195$) נמוך יותר ב 4.6% מזה של המבוגרים ($M=8.73$, $SD=1.730$).

Report

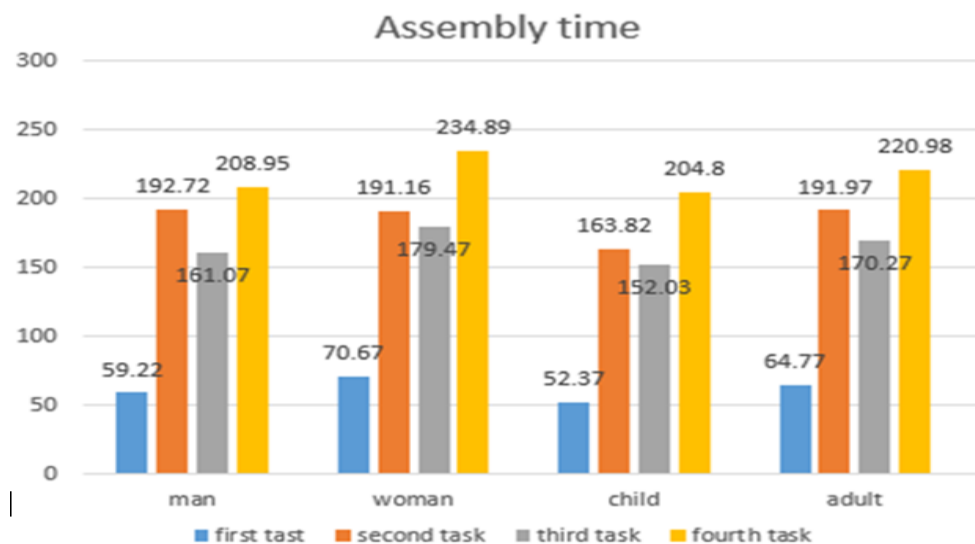
type		card3	card4	total_interactions	Total_idle_time
adult	Mean	170.27	220.98	8.73	340.7121
	N	90	41	132	132
	Std. Deviation	46.360	46.950	1.730	63.90087
child	Mean	152.03	204.80	8.34	356.3714
	N	29	25	35	35
	Std. Deviation	34.133	52.219	2.195	34.63684
Total	Mean	165.82	214.85	8.65	343.9940
	N	119	66	167	167
	Std. Deviation	44.264	49.253	1.837	59.23656

ANOVA Table

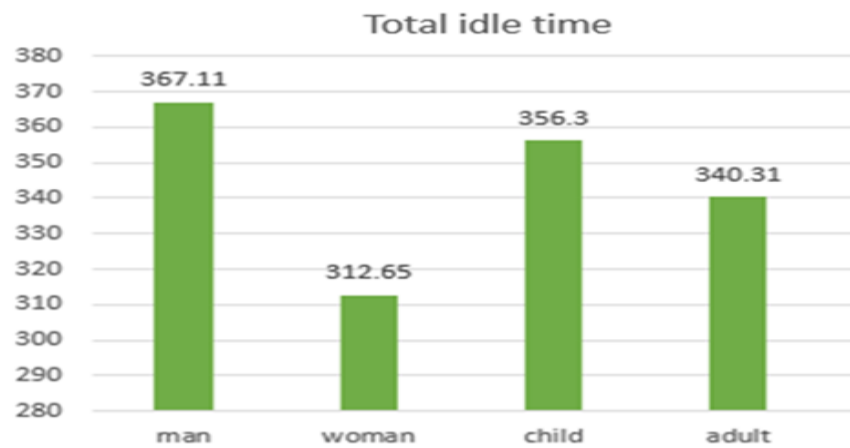
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
card3 * type	Between Groups (Combined)	7290.729	1	7290.729	3.810	.053
	Within Groups	223904.566	117	1913.714		
	Total	231195.294	118			
card4 * type	Between Groups (Combined)	4063.509	1	4063.509	1.693	.198
	Within Groups	153616.976	64	2400.265		
	Total	157680.485	65			
total_interactions * type	Between Groups (Combined)	4.088	1	4.088	1.213	.272
	Within Groups	556.068	165	3.370		
	Total	560.156	166			
Total_idle_time * type	Between Groups (Combined)	6783.762	1	6783.762	1.944	.165
	Within Groups	575705.232	165	3489.123		
	Total	582488.994	166			

טבלה 17- פלט SPSS ילדים מבוגרים

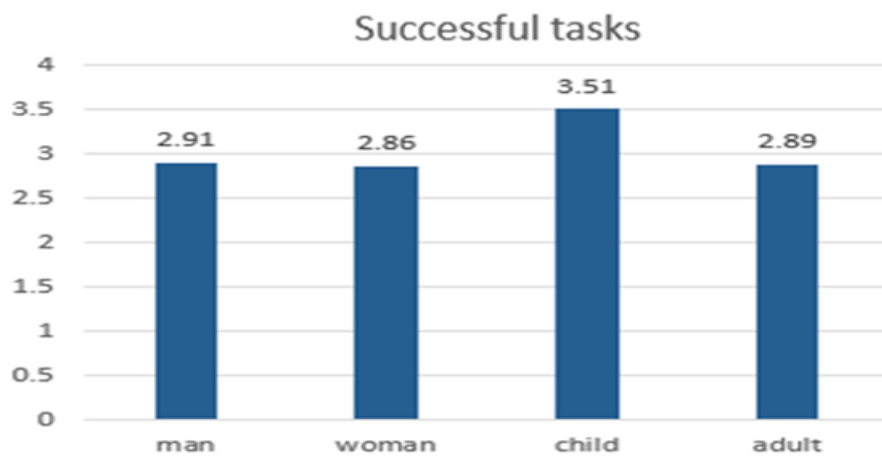
4.2.5 גרפים נוספים



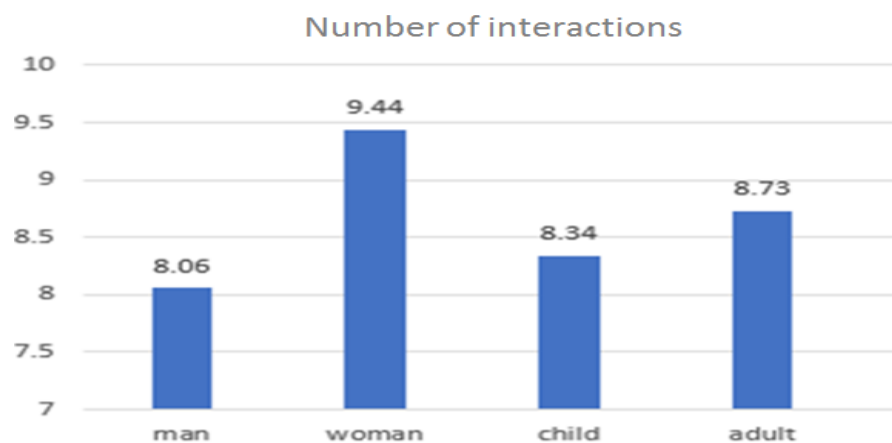
טבלה 18 – גרף זמני הרכבה כוללים



טבלה 19 – גרף זמני בטלה כוללים



טבלה 20 – גרף מספר משימות מוצלחות



טבלה 21 – גרף מספר אינטראקציות עם הרובוטים

4.3 סיכום ודיון על התוצאות

עוד לפני ניתוח התוצאות ומההתרשמות של צוות מנהלי הניסויים נוצר הרושם שהילדים תיפקדו טוב יותר בעמדה ושיתוף הפעולה עם הרובוט גם היה טוב יותר. התוצאות אכן אוששו את הטענה הזו שכן בכל המדדים הילדים תיפקדו בממוצע טוב יותר מהמבוגרים (בחלקם גם באופן מובהק). אם מסתכלים על ההבדלים בין נשים לגברים אז מהתוצאות ניתן להסיק שהגברים אומנם תיפקדו טוב יותר בממוצע כשמסתכלים על מדדים שקשורים לביצוע המשימה הראשית, אך מנגד הנשים היו קשובות יותר לרובוטים, חילקו את הזמן נכון יותר ושמרו על שיתוף פעולה טוב.

לאחר ניתוח התוצאות התברר שהמשימה השלישית לקחה בממוצע פחות זמן משאר מהמשימה שלפניו, למרות שאמורה להיות בדרגת קושי גבוהה יותר. בכדי להבין שלא הייתה כאן הטעייה שנבעה ממהלך הניסוי, בוצע ניסוי תיקוף קצר שכלל 17 נבדקים (סטודנטים מהמחלקה לתעו"נ) בו ניתנו המשימות לנבדקים ללא השתתפות הרובוטים. כל נבדק היה צריך להרכיב 4 משימות ללא הפרעה. נמדדו הזמנים והתקבל שאכן המשימה השלישית מצריכה פחות זמן (10% פחות בממוצע).

לאחר קבלת התוצאות נוסח וקטור מדדים עבור כל נסיין (משתנים מסבירים) ועמודה שמתארת את סוג הנסיין (המשתנה המוסבר) וזאת בכדי ליצור מסד נתונים שממנו בהמשך התהליך נבנו המודלים המשמשים לחיזוי סוג האוכלוסיה המשתף פעולה עם הרובוט.

4.4 תוצאות – ניסוי תיקוף

לאחר פיתוח המודלים בוצע ניסוי נוסף דומה לניסויים הקודמים שנעשו ותוארו בפרק השיטה. המטרה הייתה לתת למודל לסווג נבדקים חדשים לקבוצות האוכלוסיה שנבדקו. כל נבדק ביצע את הניסוי באותו אופן שביצעו הנבדקים מהניסויים הקודמים, רק שלאחר סיום 15 דקות העבודה (ברוטו) המודל ביצע סיווג לנבדק על בסיס מדדי הביצוע הספציפיים של אותו נבדק.

סה"כ נבדקו 25 נבדקים שנחלקו בצורה הבאה:

- 7 גברים בוגרים – גילאי 25-29
- 9 נשים בוגרות – גילאי 22-27
- 5 ילדים בנים – גילאי 13-14
- 4 ילדות בנות – גילאי 13-14

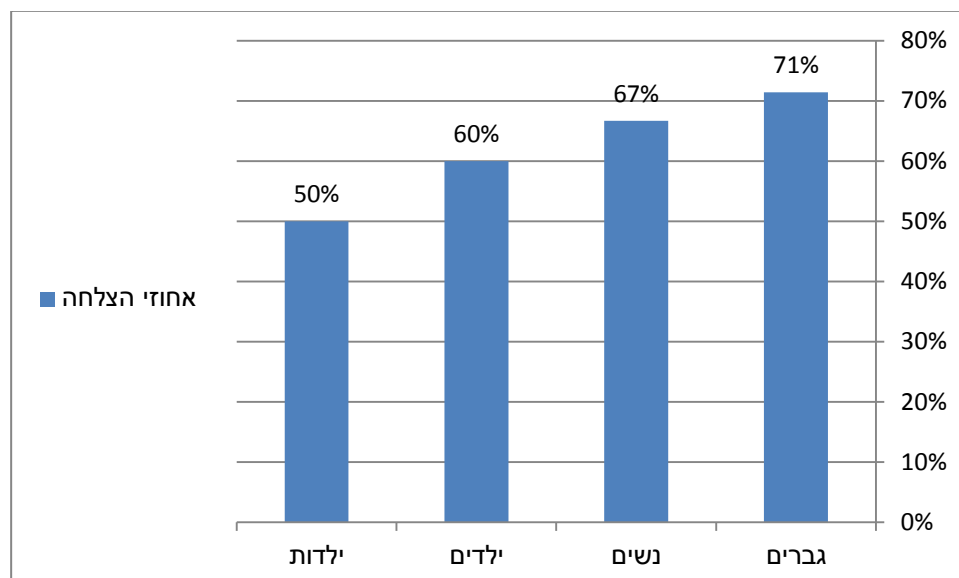
תוצאות המודל מתוארות בטבלה מספר 23: 5 גברים בוגרים סווגו נכון מתוך 7 שביצעו את הניסוי, 6 נשים בוגרות סווגו נכון מתוך 9 שביצעו את הניסוי, 3 ילדים סווגו נכון מתוך 5 שביצעו את הניסוי ו-2 ילדות סווגו נכון מתוך 4 שביצעו את הניסוי.

סוג הנבדקים	מספר נבדקים	סווג כגבר בוגר	סווג כאישה בוגרת	סווג כילד	סווג כילדה
גברים בגירים	7	5	1	1	
נשים בוגרות	9	3	6		
ילדים בנים	5	1	1	3	
כילדות בנות	4	1		1	2

טבלה 22 - תוצאות ניסוי

מניתוח פשוט של הנתונים ניתן לראות שהמודל הצליח יותר בסיווג הגברים הבוגרים וקצת יותר התקשה לסווג ילדים. התוצאות של החיזוי טובות יותר ממודל רנדומלי שסווג נכון בממוצע 25%.

אחוזי הצלחה בסיווג בחלוקה לאוכלוסיות השונות מתוארים בטבלה 24.



טבלה 23 - אחוזי הצלחה סיווג

בסה"כ המודל סיווג נכונה 16 נבדקים מתוך 25 שהשתתפו בניסוי כלומר 64% דיוק בסיווג. כשבוחנים את הטעויות בסיווג של המודל כפי שניתן לראות בטבלה 25 (התאים המסומנים באדום), נראה שפיזור הטעויות יחסית אחיד ולא ניתן להצביע על תחום ספציפי שבו המודל טועה בקביעות, אולם ניתן לראות שהמודל מסווג מבוגרים וילדים (ללא תלות במין) באחוזי הצלחה גבוהים (15 הצלחות מתוך 16 אצל המבוגרים ו- 5 מתוך 9 אצל הילדים). מבחינת הסיווג של זכרים ונקבות (ללא תלות בגיל) נרשמו אחוזים נמוכים יותר (4 טעויות מתוך 8 אצל הזכרים ו 5 מתוך 8 אצל הנשים) כך שניתן לומר שכאן המודל מתקשה יותר.

סוג הנבדקים	מספר נבדקים	מספר טעויות	מספר הצלחות
מין זכר	12	4	8
מין נקבה	13	5	8
מבוגר	16	1	15
ילד	9	4	5

טבלה 24 - טעויות מול הצלחות

4.4.1 דיון על תוצאות הסיווג

תוצאות הסיווג של המודלים מביאים למסקנה שאכן ניתן לסווג נכונה נבדקים לסוג האוכלוסייה שלהם, מודל סיווג רנדומלי שיופעל על נתונים אלו יסווג נכונה בממוצע 25% מהנבדקים לעומת 64% אחוז של המודל שהורץ בניסויים במחקר זה. בעתיד ניתן יהיה להגדיל את סט הנתונים עליו מתבצעת הלמידה וכך להביא למודל מדויק יותר. בבחינת התוצאות נראה שהמודל מסווג נכונה טוב יותר גברים ונשים מאשר ילדים כאשר זיהוי מבוגרים (71% לגברים ו- 67% לנשים) היה טוב יותר מזיהוי ילדים (60% ילדים ו- 50% ילדות) דבר שככל הנראה נובע מכמות הנתונים היחסית נמוכה אצל הילדים. הסיבה נעוצה בסבירות גבוהה בעובדה שמספר הנבדקים הילדים היה קטן משמעותית מזה של המבוגרים דבר שגרם לכך שלמודל היה סט נתונים יחסית קטן (35 רשומות) ללמוד ממנו.

5 סיכום ומסקנות

5.1 מסקנות

במחקר זה פותחה מערכת רובוטית המשלבת שיתוף פעולה בין אדם לשני זרועות רובוטיות ונבחנו הבדלים במדדי הביצוע של אוכלוסיות שונות כאשר הן עובדות אל מול רובוטים ומתמודדות עם משימת הרכבה שדורשת משאבים קוגניטיביים.

שיתוף הפעולה בין הנשים לרובוטים היה טוב יותר. הגברים התמקדו יותר במשימת ההרכבה שאותה ביצעו יותר טוב.

נמצאו הבדלים מובהקים בין גברים ונשים במדד זמני הבטלה של הרובוטים בו אצל נשים הרובוטים היו פחות בבטלה, בדומה למדד האינטראקציות עם הרובוט שגם בו אצל הנשים היו תוצאות טובות יותר. שני מדדים אלו מעידים שנשים במחקר זה העניקו תשומת לב רבה יותר לרובוט כאשר גברים התעסקו יותר במשימת ההרכבה שלהם.

הבדל מובהק נוסף הוא זמני הביצוע של ההרכבות הראשונות שהיו טובים יותר אצל הגברים וזה נובע ישירות מעצם העבודה שהם הקדישו בממוצע יותר זמן להרכבה הראשית שלהם ופחות התייחסו לרובוטים.

קצב הלמידה של הילדים גבוה מזה של המבוגרים והיכולת שלהם להתמודד מהר יותר עם משימה מהסוג שבוצעה בניסוי טובה מזו של המבוגרים.

על כך מעיד מדד מספר המשימות המוצלחות שהיה גבוה באופן מובהק אצל הילדים. כמו כן המשימות הראשונות בוצעו מהר יותר אצל הילדים, מבחינת זמני הבטלה ומספר האינטראקציות עם הרובוטים לא נרשמו הבדלים מובהקים.

פותח מודל לסיווג האדם העובד מול הרובוט לסוג האוכלוסייה אליה הוא משתייך, המודל שפותח לזיהוי סוג האוכלוסייה (ילדים/מבוגרים, נשים/גברים) נבדק בניסויי תיקוף והראה יכולת זיהוי טובה (64%), כאשר זיהוי מבוגרים (71% לגברים ו- 67% לנשים) היה טוב יותר מזיהוי ילדים (60% ילדים ו- 50% ילדות) דבר שככל הנראה נובע מכמות הנתונים היחסית נמוכה אצל הילדים. ככל שיוגדל בסיס הנתונים ויצטברו עוד רשומות אודות נבדקים שיבצעו את הניסוי, הסיכוי שהמודל יהפוך מדויק יותר ויאפשר סיווג נכון יותר ככל הנראה יגדל. יישום של כלי לחיזוי סוג האוכלוסייה בעבודה עם רובוט יכול להוביל לשיפור שיתוף הפעולה בעמדת העבודה ע"י שינוי פרמטרים בעבודת הרובוט בהתאם לסוג משתף הפעולה. הפרמטרים הנבדלים של כל אוכלוסייה כמובן יכולים להישאב ישירות מתוצאות מחקר זה או מחקר המשך שיתבסס על המתודולוגיה שהוצגה כאן. מומלץ שמחקר המשך יתמקד במה כיצד לבצע שיפור בתוצאות.

לסיכום, במחקר זה הוצגה מתודולוגיה של בחינת שיתוף הפעולה בין אדם ורובוט תוך כדי משימת הרכבה הדורשת משאבים קוגניטיביים, המחקר ענה בחיוב על שני שאלות המחקר העיקריות והוכיח שני דברים:

- יש הבדלים בין נשים וגברים ובין ילדים למבוגרים במדדי הביצוע כאשר עובדים בשת"פ עם רובוט
- ניתן לסווג נכונה את משת"פ הפעולה עם הרובוט לסוג האוכלוסייה אליה הוא משויך

5.2 מגבלות המחקר

1. המגבלה העיקרית של המחקר היא כמות הנבדקים שניתן היה לרתום מפאת הזמן הארוך שלקח פיתוח המערכת וזמני הניסויים (כחצי שעה לנבדק). פיתוח מודל סווג דורש כמה שיותר נתונים ונכון יהיה להמשיך ולהביא עוד נבדקים מעוד סוגי אוכלוסיות שלא נבדקו כאן, וכך להרחיב את המחקר ותוצאותיו. מאחר והמחקר נעשה במסגרת האוניברסיטה הנבדקים השתייכו לאוכלוסיית סטודנטים ותלמידים מחוגי ההשערה שנערכו במתחם האקדמי, היה קשה לרתום אוכלוסיות נוספות בעיקר מסיבות אדמיניסטרטיביות. כמו כן גם כמות הילדים שהשתתפו במחקר הייתה נמוכה משמעותית מזו של המבוגרים וזה דבר שכנראה השפיע בצורה כלשהי על התוצאות. סביר ביותר שניסוי שכלול מגוון גדול יותר של נבדקים מסוגים שונים של אוכלוסיות יסיק מסקנות נוספות שיכולות לשפר את ממצאי המחקר.
2. הרובוטים שהופעלו במסגרת המחקר הם רובוטים יחסית מיושנים והפונקציונליות שלהם ירודה באופן משמעותי מהרובוטים המובילים בתעשייה. העבודה עם רובוטים כאלו הגבילה את המחקר למשימות ספציפיות שתאמו את היכולות של הרובוטים.

5.3 מחקר המשך

מחקר זה הסתיים בבניית מודל על בסיס נתוני הניסויים שבוצעו בתחום שיתוף הפעולה אדם-רובוט. מחקר זה יכול לשמש כבסיס מחקרי לעוד מחקרים רבים שיעסקו בתחומי הניבוי בכך שהוא מעביר מתודולוגיה לחקר נושא מסוים משלב גיבוש הרעיון ועד שלב בניית מודל חיזוי מבוסס נתוני ניסויים.

מחקר המשך קלאסי יתקף את המודל שמוצע במחקר זה בניסויים נוספים בעמדת העבודה ויעריך את טיבו האמיתי. המטרה תהיה בעצם לבצע עוד סט של ניסויים ולתת למודל לחזות תוך כדי העבודה האם מדובר בזכר או נקבה \ ילד או מבוגר. ניתוח הממצאים יביא לתיקוף המודל בשטח וכמובן יאפשר שיפור הלמידה ומודל הניבוי, ההערכה היא שתוך כדי תיקופו בשטח יהיה צורך בטיוב סופי של פרמטרים מסוימים. כמו כן מחקר המשך יכול לנסות ולהתמקד בלהביא משתנים מסבירים נוספים שיכולים לשפר את המודל וכמובן לנסות ולבנות מודלים חדשים שישתמשו באלגוריתמים חדשים (תחום האלגוריתמיקה ב machine

learning כל הזמן מתפתח וחבילות נוספות בשפה כמו R או PYTHON נוספות חדשות לבקרים) בכדי לפתח מודלים חזקים יותר.

סוג מחקר המשך נוסף יכול לעסוק בהכנסת מודל החיזוי כיישום בתוך אלגוריתם אדפטיבי לשיתוף פעולה אדם-רובוט, כך שהאלגוריתם ינסה לזהות את אופי משתף הפעולה שעובד מולו ויתאים פרמטרים של עבודת הרובוט לסוג המשתמש הספציפי. מחקר כזה יכול להביא בשורה חדשה לתחום שיתוף הפעולה של אדם ורובוט.

6 ביביליוגרפיה

- Arkin R. C. (1999). Intelligent Control of Robot Mobility. Wiley Press.
- Bekey G. A. (2005). Autonomous robots: From biological inspiration to implementation and control. Cambridge: Mass: MIT Press.
- Ben-David S., Shalev-Shwartz S. (2014). Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms. Cambridge University Press.
- Bennewitz M., Burgard W., Cielniak G., Thrun S. (2005). Learning Motion Patterns of People for Compliant Robot Motion. The International Journal of Robotics Research, pp. 31-48.
- Bin N., Chen X., Zhang L., Xiao W. (2004). Recurrent Neural Network for Robot Path Planning. PDCAT 2004, LNCS 3320, pp. 188–191.
- Bozdag C. E., Kahraman C. (2003). Fuzzy group decision making for selection among computer integrated manufacturing systems. Computers in Industry, 51(1):13-29.
- Cakmak M. (2010). Designing Interactions for Robot Active Learners, IEEE Trans. on Autonomous Mental Development.
- Calinon S., Billard A. (2007) Active Teaching in Robot Programming by Demonstration, RO-MAN.
- Chien-Ming H., Cakmak M., Mutlu B. (2015). Adaptive Coordination Strategies for Human-Robot Handovers. Robotics: Science and Systems.
- Colombetti M., Dorigo M., Borghi G. (1996). Behavior analysis and training: A methodology for behavior engineering, IEEE Trans. Systems Man Cybernet. Part B 26 (3) 365–380.
- Connell J. H., Mahadevan S., editors. Robot Learning. Kluwer Academic, Norwell, MA, USA, 1993.
- Claus L., Alice S., Thorsten R. O. (2011). Human Workflow Analysis using 3D Occupancy Grid Hand Tracking in. 2011 IEEE/RSJ International Conference, 3375-3380.
- Feng J., Spence I., Pratt J. (2007). Playing an Action Video Game Reduces Gender Differences in Spatial Cognition. Psychological Science, 18(10): 850-854.
- Geismar N., Manoj U. V., Sethi A., Sriskandarajah C. (2012). Scheduling robotic cells served by a dual-arm robot. IIE Transactions 44 (3): 230-248.
- Gonzalez C., Quesada J. (2003). Computational & Mathematical Organization Theory.
- Grigore E. C., Kerstin P. G. A., Melhuish C., Leonards, U. (2013). Joint Action Understanding improves Robot-to-Human Object Handover. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 4622-4629 .

- Groover M. P. (1987). Automation, Production Systems and Computer Integrated Manufacturing. New-York: Prentice - Hall international.
- Groover M. P., Weiss M., Nagel R. N. (1986). Industrial Robotics. New-York: McGraw-Hill Higher Education.
- Hägele M., Schaaf W., Helms E. (2002). Robot Assistants at Manual Workplaces: Effective Co-operation and Safety Aspects. 33rd International Symposium on Robotics, 171-184.
- Hastie T., Beineke P., Manning C. D., Vaithyanathan S. (2003). Exploring sentiment summarization. Exploring Attitude and Affect in Text: Theories and Applications, Papers from the AAAI Spring Symposium, 4–7.
- Hoffman G., Breazeal C. (2009) Effects of anticipatory perceptual simulation on practiced human-robot tasks. Autonomous Robots 28(1): 403-423.
- Hoffman G., Breazeal C. (2007). Cost-Based Anticipatory Action Selection for Human–Robot Fluency. IEEE Transactions on Robotics 23(5): 952-961.
- Hourcade J., Bederson B., Druin A., Guimbretiere F. (2004). Differences in Pointing Task Performance Between Preschool Children and Adults Using Mice. ACM Transactions on Computer-Human Interaction 11(4): 357–386.
- Ikemoto S., Ben Amor H., Minato T., Ishiguro H., Jung B. (2012). Mutual Learning and Adaptation in Physical Human-Robot Interaction, IEEE Robotics and Automation.
- KAIL R. (1991). Developmental change in speed of processing during childhood and adolescence. Psychological Bulletin 109 (3): 490–501.
- Kaufman S.B. (2007). Sex differences in mental rotation and spatial visualization ability: Can they be accounted for by differences in working memory capacity? Intelligence 35: 211–223.
- Kimura D. (1999). Sex and cognition. Cambridge, MA: MIT Neuroanatomic overlap of working memory and spatial attention networks: A functional MRI comparison within subjects. Neuro-Image 10: 695–704.
- Krüger J., Lien T., Verl A. (2009). Cooperation of human and machines in assembly lines. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58(2): 628-646.
- Lenz C., Grimm M., Röder T., Knoll A. (2012). Fusing multiple Kinects to survey shared human-robot-workspaces. Technical Report TUM-I1214, MÜNCHEN: Technische Universität München.
- Lenz C., Nair S., Rickert M., Knoll A., Rosel W., Gast J. (2008). Joint-action for humans and industrial robots for assembly tasks. IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 130-135.
- Li Z., Zhou M. (2006). Two-Stage Method for Synthesizing Liveness-Enforcing Supervisors for Flexible Manufacturing Systems Using Petri Nets. IEEE Transactions on Industrial Informatics 2(4): 313-325.
- Lizarraga M. L. S. d. A., Ganuza J. M. G. (2003). Improvement of mental rotation in girls and boys. Sex Roles 49: 277–286.

- Maniadakis M., TraHnias P. (2011). Temporal cognition: a key ingredient of intelligent systems. *Frontiers in Neurobotics* 5(2): 18-24.
- Mataric M. J. (2007). *The robotics primer*. Cambridge: Mass: MIT Press.
- Nagai Y., Rohlfing K. (2009). Computational Analysis of Motionese Toward Scaffolding Robot Action Learning, *IEEE. on Autonomous Mental Development*.
- Nemeth B., Hoffmann M. (2006). Gender differences in spatial visualization among engineering students, *Annales Mathematicae et Informaticae*. Vol 33. pp.169-174.
- Nickolay B., Kruger J., Heyer P. (2005). Image based 3D Surveillance for flexible Man-Robot-Cooperation. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 54(1): 19–22.
- Nof S. (2009). *Handbook of Automation*. Berlin: Springer-Verlag Heidelberg.
- Quaiser-Pohl C., Geiser C., Lehmann W. (2006). The relationship between computer-game preference, gender, and mental-rotation ability. *Personality and Individual Differences* 40: 609–619.
- Sato N., Miyake S., Kume Y. (2003). Gender differences in mental workload during two computerbased tasks, *Human-Computer Interaction*. pp.979-982
- Sayfeld L., Peretz Y., Someshwar R., Edan Y. (2014), Evaluation of human-robot collaboration models for fluent operations in industrial tasks, *RSS 2015 - July 17, 2015 - Sapienza University of Rome*.
- Sammut C., Webb G. I. (2011). *Encyclopedia of machine learning*. New York: Springer.
- Schermerhorn P., Scheutz M. R., Crow C. (2008). Robot Social Presence and Gender: Do Females View Robots Differently than Males? *HRI'08*.
- Seifert R. W., Morito S. (2001). Cooperative dispatching – exploiting the flexibility of an FMS by means of incremental optimization. *European Journal of Operational Research* 129 (1): 116-133.
- Siciliano B., Khatib O. (2008). *Springer handbook of robotics*. Berlin: Springer.
- Sheridan T. B., Parasuraman R., Wickens C. D. (2000). A Model for Types and Levels of Human Interaction with Automation. *IEEE Transactions Systems, Man and Cybernetics: A Syst Hum* 30(3): 97-286.
- Someshwar R., Meyer J., Edan Y. (2010). Models and Methods for H-R Synchronization. *14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing* 14(1): 829-834.
- Strabala K. W., Lee M. K., Dragan A. D., Forlizzi J. L., Srinivasa S., Cakmak M. (2013). Towards Seamless Human-Robot Handovers. *Journal of Human-Robot Interaction* 2(1): 112-132.
- Svenstrup M., Tranberg S., Andersen H.J., Bak T., (2009), Pose estimation and adaptive robot behaviour for human-robot interaction, *Robotics and Automation, ICRA'09. IEEE International Conference on Robotics*.

- Tahboub K. A. (2006). Intelligent Human-Machine Interaction Based on Dynamic Bayesian Networks Probabilistic Intention Recognition. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 45(1): 31-52.
- Tan J.T.C. , Duan F., Zhang Y. (2009). Human-robot collaboration in cellular manufacturing: Design and development. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 29-34.
- Terlecki M.S., Newcombe N.S. (2005). How important is the digital divide? The relation of computer and videogame usage to gender differences in mental rotation ability. *Sex Roles* 53: 433–441.
- Torrey C., Powers A., Marge M., Susan R.F., Sara B.K. ,(2006) Effects of adaptive robot dialogue on information exchange and social relations. *HRI* : 126-133.
- Uchibe E., Asada M., Hosoda K. (1998) Cooperative behavior acquisition in multi mobile robots environment by reinforcement learning based on state vector estimation. In: *IEEE International Conference on robotics*.
- Voyer D., Voyer S., Bryden M.P. (1995). Magnitude of sex differences in spatial abilities: A meta-analysis and consideration of critical variables. *Psychological Bulletin* 117: 250–270.
- Xu Y., Yang J. (1995). Towards Human-Robot Coordination: Skill Modeling and Transferring via Hidden Markov Model. *IEEE International Conference on Robotics* 2(1): 1906-1911.
- יהל, ר', קלרטג, מ', ארצי, ג' ובהיר, ז'. (2009). מבוא לרובוטיקה. תל אביב: מט"ח.

7 נספחים

7.1 נספח א' - מפרט רובוט – SCORBOT ER4U

Specifications

Controller

USB Controller

Mechanical Specifications

Mechanical structure	Vertically articulated	
Weight	10.8 kg	23.8 lb
Operating radius	610 mm	24"
Maximum Payload		
With reduced acceleration:	2.5 Kg	5.5 lbs
Full speed:	1 Kg	2.2 lbs
End Effectors	DC servo gripper, with optical encoder, parallel finger motion Measurement of object's size by means of Gripper sensor and software.	
Max. gripper opening		
Without pads	75 mm	3"
With pads	65 mm	2.6"
Repeatability at TCP (tip of gripper)	± 0.18 mm	0.007"
Position Feedback	Optical encoders on each axis	
Homing	Fixed position on each axis found by means of micro switches	
Actuators	12 VDC servo motors	
Transmission	Gears, timing belts, lead screw	
Ambient operating temperature	2° – 40°C	36° – 104°F

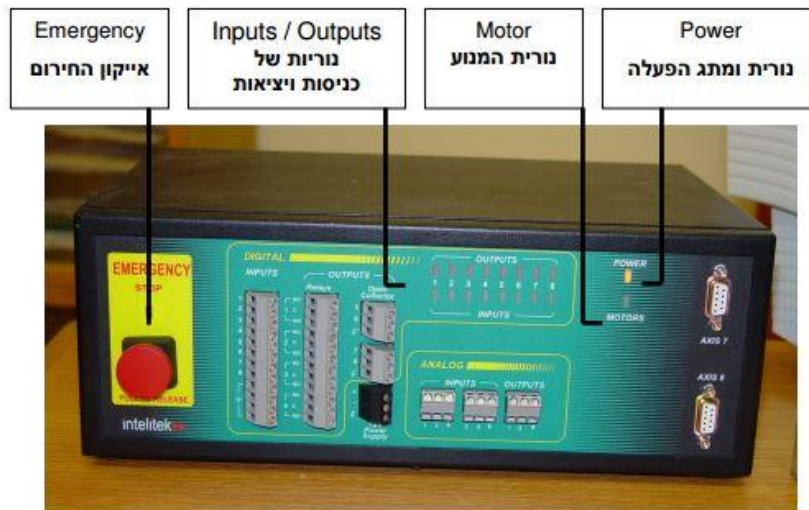
Axes Specifications

Number of Axes	5 rotational axes and gripper	
Axis Movement	Range	Effective Speed
Axis 1: Base rotation	310°	20°/sec
Axis 2: Shoulder rotation	158°	26.3°/sec
Axis 3: Elbow rotation	260°	26.3°/sec
Axis 4: Wrist pitch	260°	83°/sec
Axis 5: Wrist roll	Unlimited mechanically±570° electrically	106°/sec

להלן שני תרשימי בקר ה-USB: פאנל קדמי ופאנל אחורי.

1. התבונן בבקר ה-USB, וזהו את החלקים הבאים:

- מתג הפעלה ונורית הפעלה
- נורית המנוע
- נוריות של כניסות ויציאות
- אייקון החירום



▲ פאנל קדמי של בקר



▲ פאנל אחורי של בקר

Robot Accessories

Arm Accessories

Part #	Description
00-1710-0000	Teach Pendant
00-0609-0000	Multipurpose Gripper Attachment for SCORBOT-ER 4u
00-1020-0000	Linear slide base for SCORBOT-ER 4u: 1 m
00-1021-0000	Linear slide base for SCORBOT-ER 4u: 1.8 m
10-5803-000	Linear conveyor
00-1009-0000	Rotary table
00-1013-0000	X Positioning table, single-axis
00-1014-0000	XY Positioning table, dual-axis
001201:	Experiment table
001209:	Photoelectric sensor for conveyor
001203:	Photoelectric sensor for rotary table
21-0004-0000:	Dual-axis air vise
025234:	Solenoid Valve (24V) for use with dual-axis vise 21-0004-0000
025217:	Parts Feeder: Pneumatic, for rectangular parts
025210:	Parts Feeder: Pneumatic, for round parts
010074:	Parts Feeder: Gravity operated
001110:	Palletizing Rack
001249:	Workbench: Light duty extruded aluminum
001251:	Workbench: 59" Long
001250:	Workbench: 71" Long
00-1293-0000	Workbench with shelves: 59" Long
001284:	Workbench: Robot pedestal welded
001290:	Workbench: PC table

7.2 נספח ב' - סטטיסטיקות (SPSS)

נשים מול גברים

Case Processing Summary

	Cases					
	Included		Excluded		Total	
	N	Percent	N	Percent	N	Percent
num_of_cards * gender	132	100.0%	0	0.0%	132	100.0%
card1 * gender	132	100.0%	0	0.0%	132	100.0%
card2 * gender	115	87.1%	17	12.9%	132	100.0%
card3 * gender	90	68.2%	42	31.8%	132	100.0%
card4 * gender	41	31.1%	91	68.9%	132	100.0%
total_interactions * gender	132	100.0%	0	0.0%	132	100.0%
Total_idle_time * gender	132	100.0%	0	0.0%	132	100.0%

Report

gender		num_of_cards	card1	card2	card3	card4	total_interactions
m	Mean	2.91	59.22	192.72	161.07	208.95	8.06
	N	68	68	60	45	22	68
	Std. Deviation	1.033	27.489	54.121	51.565	52.413	1.892
f	Mean	2.86	70.67	191.16	177.69	234.89	9.44
	N	64	64	55	45	19	64
	Std. Deviation	1.006	37.437	79.026	39.830	36.228	1.194

	Mean	2.89	64.77	191.97	169.38	220.98	8.73
Total	N	132	132	115	90	41	132
	Std. Deviation	1.016	33.068	66.894	46.569	46.950	1.730

Report

gender		Total_idle_time
m	Mean	367.1176
	N	68
	Std. Deviation	36.00146
f	Mean	312.6563
	N	64
	Std. Deviation	74.56609
Total	Mean	340.7121
	N	132
	Std. Deviation	63.90087

ANOVA Table

			Sum of Squares	df	Mean Square
num_of_cards * gender	Between Groups	(Combined)	.090	1	.090
	Within Groups		135.205	130	1.040
	Total		135.295	131	
card1 * gender	Between Groups	(Combined)	4323.381	1	4323.381
	Within Groups		138925.801	130	1068.660
	Total		143249.182	131	

	Between Groups	(Combined)	69.211	1	69.211
card2 * gender	Within Groups		510053.711	113	4513.750
	Total		510122.922	114	
	Between Groups	(Combined)	6216.711	1	6216.711
card3 * gender	Within Groups		186798.444	88	2122.710
	Total		193015.156	89	
	Between Groups	(Combined)	6860.232	1	6860.232
card4 * gender	Within Groups		81312.744	39	2084.942
	Total		88172.976	40	
	Between Groups	(Combined)	62.667	1	62.667
total_interactions * gender	Within Groups		329.515	130	2.535
	Total		392.182	131	
	Between Groups	(Combined)	97789.564	1	97789.564
Total_idle_time * gender	Within Groups		437125.496	130	3362.504
	Total		534915.061	131	

ANOVA Table

			F	Sig.
	Between Groups	(Combined)	.087	.768
num_of_cards * gender	Within Groups			
	Total			
	Between Groups	(Combined)	4.046	.046
card1 * gender	Within Groups			
	Total			
	Between Groups	(Combined)	.015	.902
card2 * gender	Within Groups			

		Total		
	Between Groups	(Combined)	2.929	.091
card3 * gender	Within Groups			
	Total			
	Between Groups	(Combined)	3.290	.077
card4 * gender	Within Groups			
	Total			
	Between Groups	(Combined)	24.723	.000
total_interactions * gender	Within Groups			
	Total			
	Between Groups	(Combined)	29.082	.000
Total_idle_time * gender	Within Groups			
	Total			

Measures of Association

	Eta	Eta Squared
num_of_cards * gender	.026	.001
card1 * gender	.174	.030
card2 * gender	.012	.000
card3 * gender	.179	.032
card4 * gender	.279	.078
total_interactions * gender	.400	.160
Total_idle_time * gender	.428	.183

ילדים מול מבוגרים

Case Processing Summary

	Cases					
	Included		Excluded		Total	
	N	Percent	N	Percent	N	Percent
num_of_cards * type	167	100.0%	0	0.0%	167	100.0%
card1 * type	167	100.0%	0	0.0%	167	100.0%
card2 * type	148	88.6%	19	11.4%	167	100.0%
card3 * type	119	71.3%	48	28.7%	167	100.0%
card4 * type	66	39.5%	101	60.5%	167	100.0%
total_interactions * type	167	100.0%	0	0.0%	167	100.0%
Total_idle_time * type	167	100.0%	0	0.0%	167	100.0%

Report

	type	num_of_cards	card1	card2	card3	card4	total_interactions
adult	Mean	2.89	64.77	191.97	170.27	220.98	8.73
	N	132	132	115	90	41	132
	Std. Deviation	1.016	33.068	66.894	46.360	46.950	1.730
child	Mean	3.51	52.37	163.82	152.03	204.80	8.34
	N	35	35	33	29	25	35
	Std. Deviation	.951	25.259	35.135	34.133	52.219	2.195

	Mean	3.02	62.17	185.70	165.82	214.85	8.65
Total	N	167	167	148	119	66	167
	Std. Deviation	1.032	31.926	62.267	44.264	49.253	1.837

Report

type		Total_idle_time
adult	Mean	340.7121
	N	132
	Std. Deviation	63.90087
child	Mean	356.3714
	N	35
	Std. Deviation	34.63684
Total	Mean	343.9940
	N	167
	Std. Deviation	59.23656

ANOVA Table

			Sum of Squares	df	Mean Square
num_of_cards * type	Between Groups	(Combined)	10.908	1	10.908
	Within Groups		166.038	165	1.006
	Total		176.946	166	
card1 * type	Between Groups	(Combined)	4254.611	1	4254.611
	Within Groups		164941.353	165	999.645
	Total		169195.964	166	

card2 * type	Between Groups	(Combined)	20327.487	1	20327.487
	Within Groups		549625.831	146	3764.560
	Total		569953.318	147	
card3 * type	Between Groups	(Combined)	7290.729	1	7290.729
	Within Groups		223904.566	117	1913.714
	Total		231195.294	118	
card4 * type	Between Groups	(Combined)	4063.509	1	4063.509
	Within Groups		153616.976	64	2400.265
	Total		157680.485	65	
total_interactions * type	Between Groups	(Combined)	4.088	1	4.088
	Within Groups		556.068	165	3.370
	Total		560.156	166	
Total_idle_time * type	Between Groups	(Combined)	6783.762	1	6783.762
	Within Groups		575705.232	165	3489.123
	Total		582488.994	166	

ANOVA Table

			F	Sig.
num_of_cards * type	Between Groups	(Combined)	10.840	.001
	Within Groups			
	Total			
card1 * type	Between Groups	(Combined)	4.256	.041
	Within Groups			
	Total			
card2 * type	Between Groups	(Combined)	5.400	.022
	Within Groups			

		Total		
	Between Groups	(Combined)	3.810	.053
card3 * type	Within Groups			
	Total			
	Between Groups	(Combined)	1.693	.198
card4 * type	Within Groups			
	Total			
	Between Groups	(Combined)	1.213	.272
total_interactions * type	Within Groups			
	Total			
	Between Groups	(Combined)	1.944	.165
Total_idle_time * type	Within Groups			
	Total			

Measures of Association

	Eta	Eta Squared
num_of_cards * type	.248	.062
card1 * type	.159	.025
card2 * type	.189	.036
card3 * type	.178	.032
card4 * type	.161	.026
total_interactions * type	.085	.007
Total_idle_time * type	.108	.012

סטטיסטיקות על הנתונים עבור כלל האוכלוסיה

Case Processing Summary

	Cases					
	Valid		Missing		Total	
	N	Percent	N	Percent	N	Percent
card1	167	100.0%	0	0.0%	167	100.0%

Descriptives

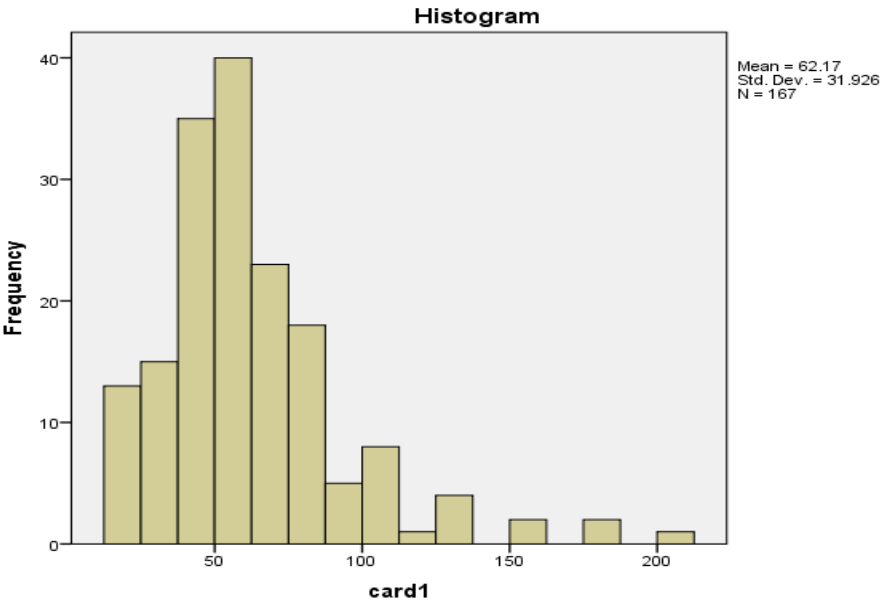
		Statistic	Std. Error
card1	Mean	62.17	2.470
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	57.30
		Upper Bound	67.05
	5% Trimmed Mean	59.36	
	Median	58.00	
	Variance	1019.253	
	Std. Deviation	31.926	
	Minimum	13	
	Maximum	208	
	Range	195	
	Interquartile Range	28	
	Skewness	1.614	.188
	Kurtosis	4.297	.374

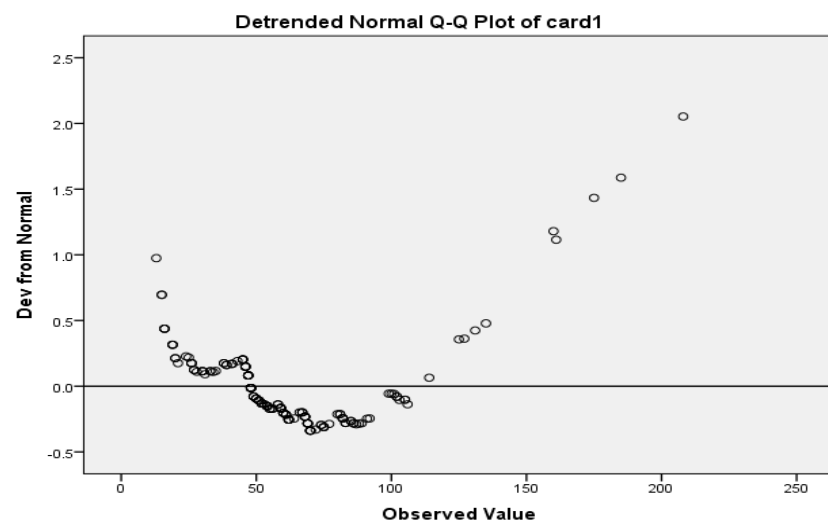
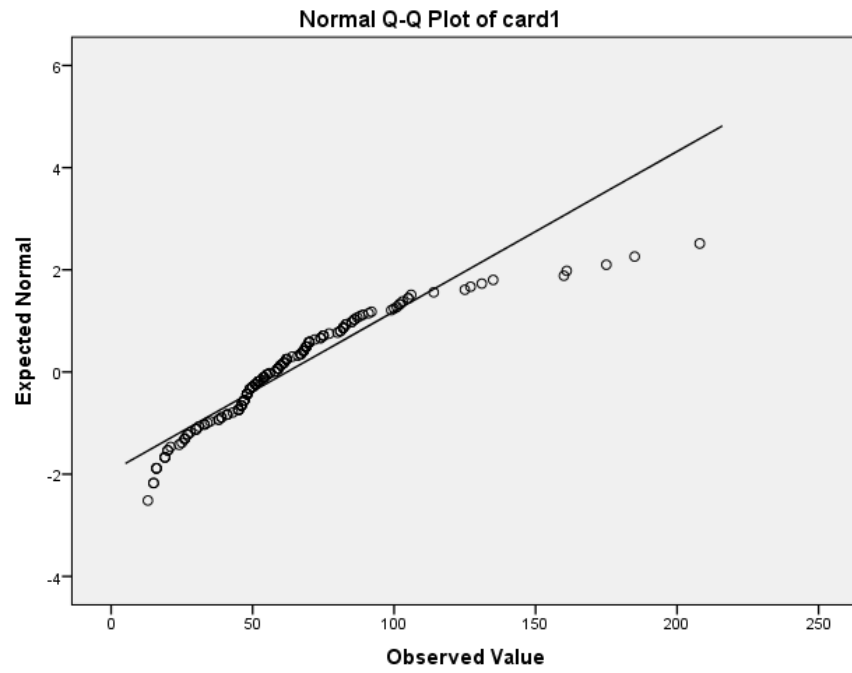
Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
card1	.140	167	.000	.883	167	.000

a. Lilliefors Significance Correction

card1





Case Processing Summary

Cases			
	Valid	Missing	Total

	N	Percent	N	Percent	N	Percent
card2	148	88.6%	19	11.4%	167	100.0%

Descriptives

		Statistic	Std. Error
card2	Mean	185.70	5.118
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	175.58
		Upper Bound	195.81
	5% Trimmed Mean	180.53	
	Median	174.00	
	Variance	3877.233	
	Std. Deviation	62.267	
	Minimum	71	
	Maximum	424	
	Range	353	
	Interquartile Range	56	
	Skewness	1.503	.199
	Kurtosis	2.719	.396

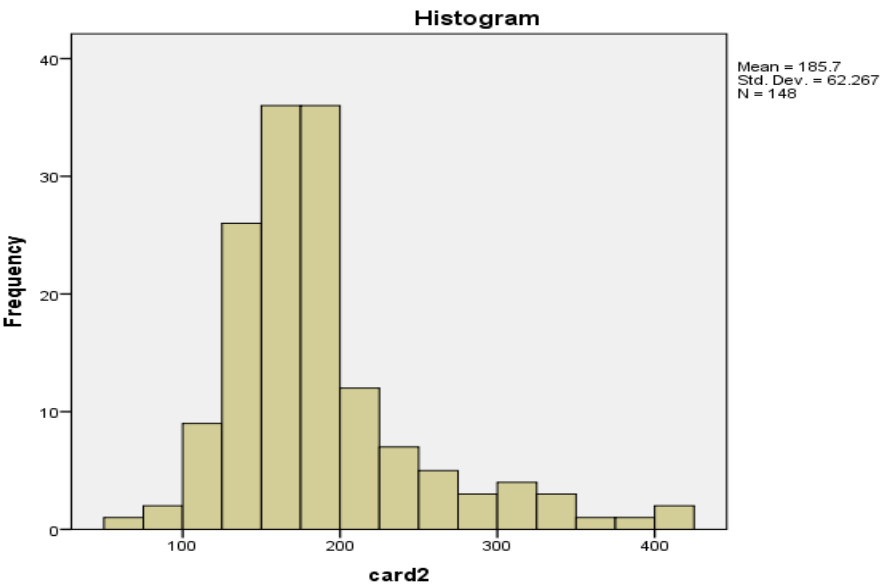
Tests of Normality

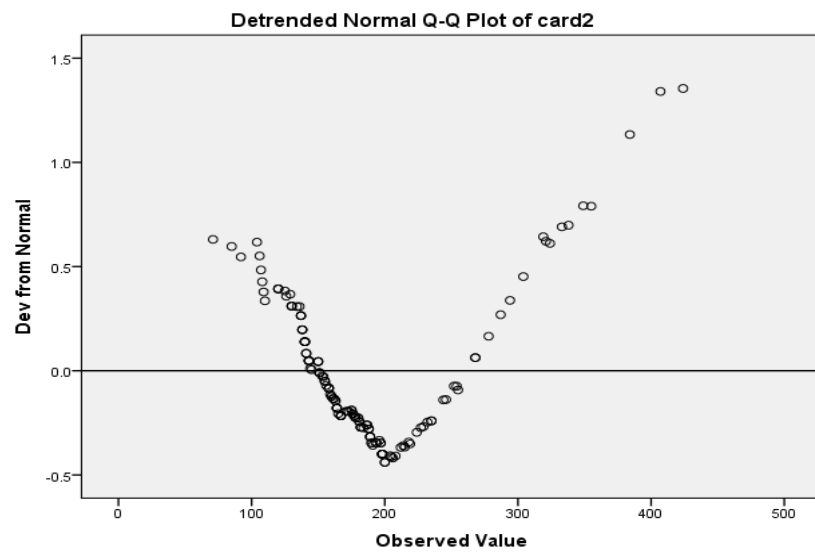
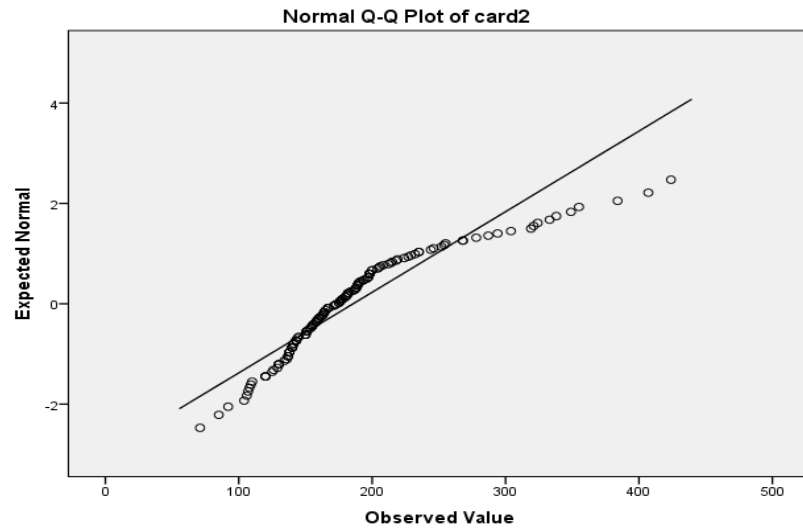
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.

card2	.166	148	.000	.877	148	.000
-------	------	-----	------	------	-----	------

a. Lilliefors Significance Correction

card2





Case Processing Summary

	Cases					
	Valid		Missing		Total	
	N	Percent	N	Percent	N	Percent
card3	119	71.3%	48	28.7%	167	100.0%

Descriptives

		Statistic	Std. Error
card3	Mean	165.82	4.058
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	157.79
		Upper Bound	173.86
	5% Trimmed Mean	161.93	
	Median	162.00	
	Variance	1959.282	
	Std. Deviation	44.264	
	Minimum	106	
	Maximum	459	
	Range	353	
	Interquartile Range	44	
	Skewness	3.080	.222
	Kurtosis	17.146	.440

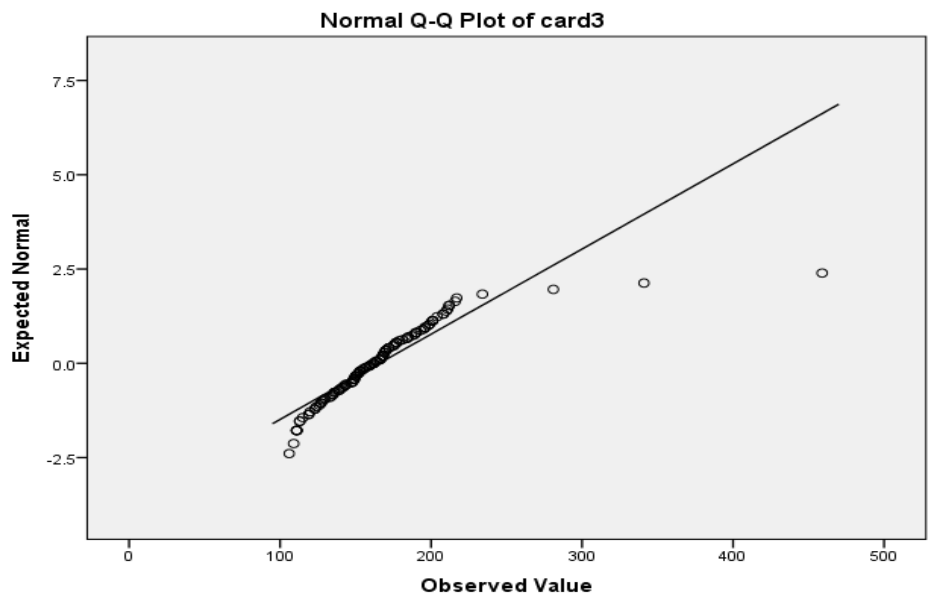
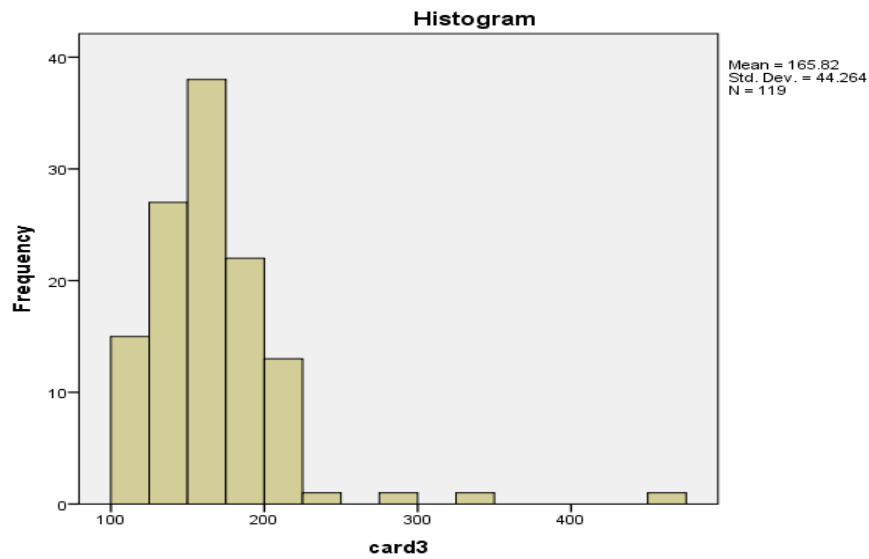
Tests of Normality

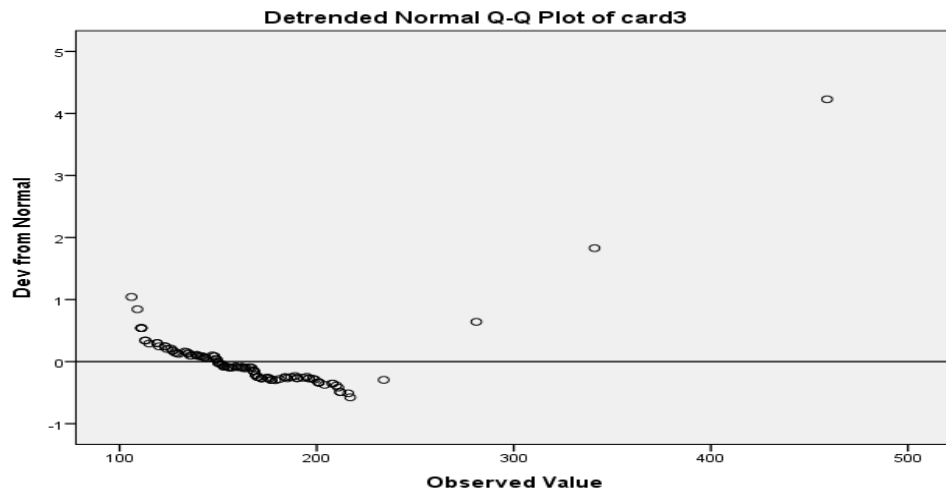
	Kolmogorov-Smirnov ^a	Shapiro-Wilk
--	---------------------------------	--------------

	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
card3	.123	119	.000	.772	119	.000

a. Lilliefors Significance Correction

card3





Case Processing Summary

	Cases					
	Valid		Missing		Total	
	N	Percent	N	Percent	N	Percent
card4	66	39.5%	101	60.5%	167	100.0%

Descriptives

		Statistic	Std. Error
card4	Mean	214.85	6.063
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	
		Upper Bound	
	5% Trimmed Mean	213.75	
	Median	213.00	
	Variance	2425.854	

Std. Deviation	49.253	
Minimum	105	
Maximum	337	
Range	232	
Interquartile Range	69	
Skewness	.334	.295
Kurtosis	-.079	.582

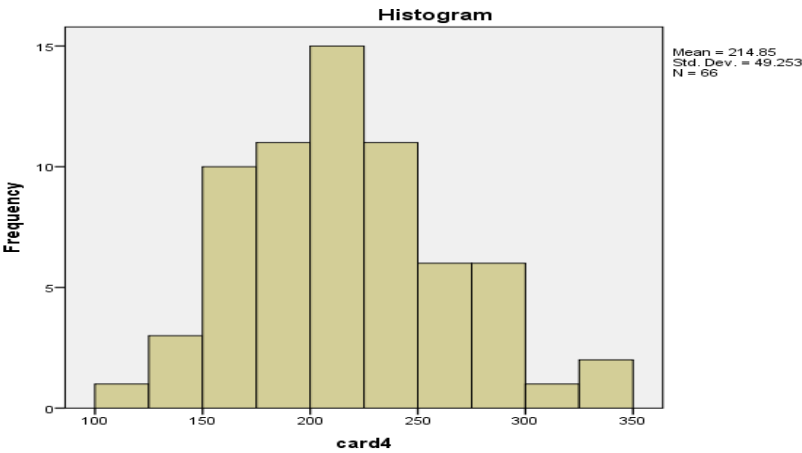
Tests of Normality

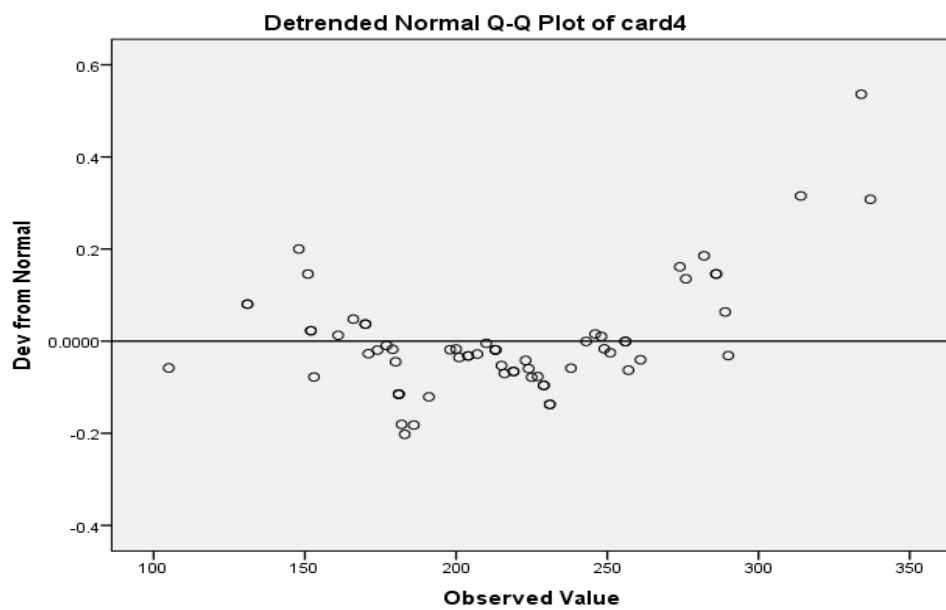
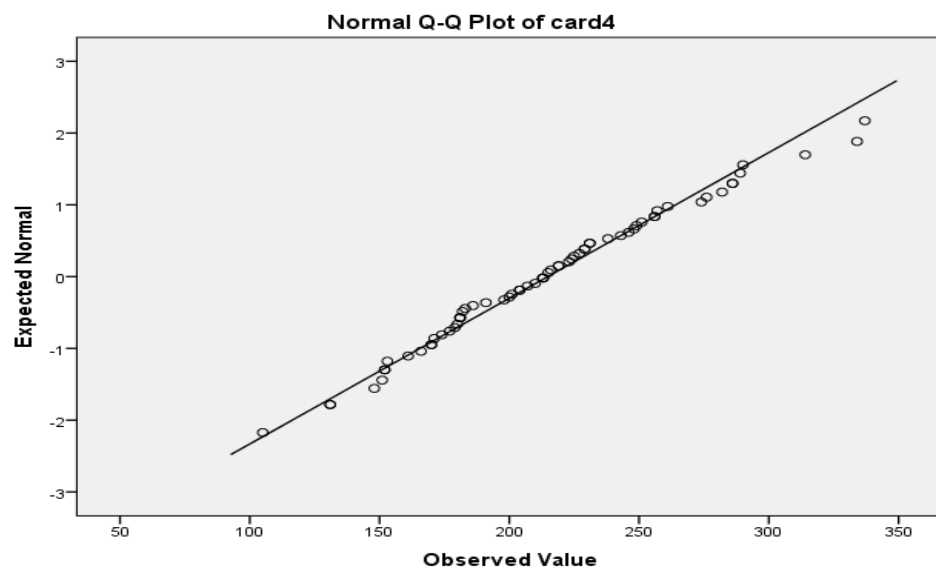
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
card4	.074	66	.200 [*]	.985	66	.632

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

card4





Case Processing Summary

	Cases					
	Valid		Missing		Total	
	N	Percent	N	Percent	N	Percent
total_interactions	167	100.0%	0	0.0%	167	100.0%

Descriptives

			Statistic	Std. Error
total_interactions	Mean		8.65	.142
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	8.37	
		Upper Bound	8.93	
	5% Trimmed Mean		8.69	
	Median		9.00	
	Variance		3.374	
	Std. Deviation		1.837	
	Minimum		3	
	Maximum		12	
	Range		9	
	Interquartile Range		2	

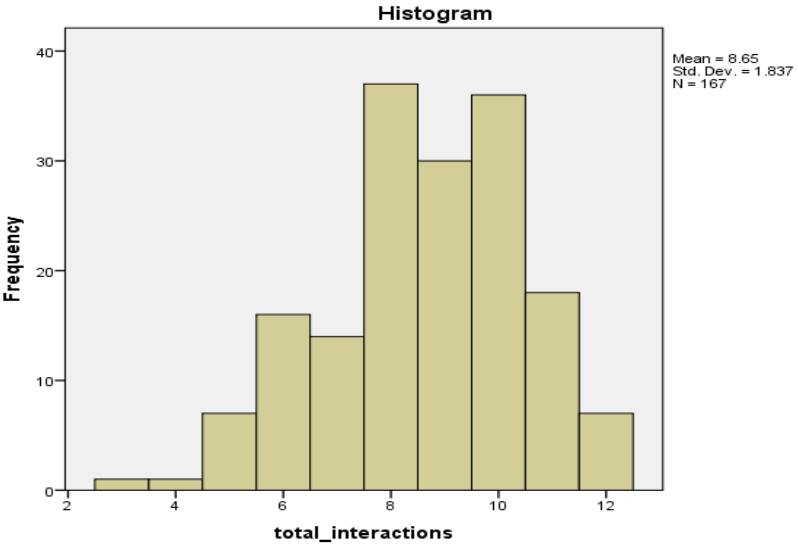
	Skewness	-.393	.188
	Kurtosis	-.217	.374

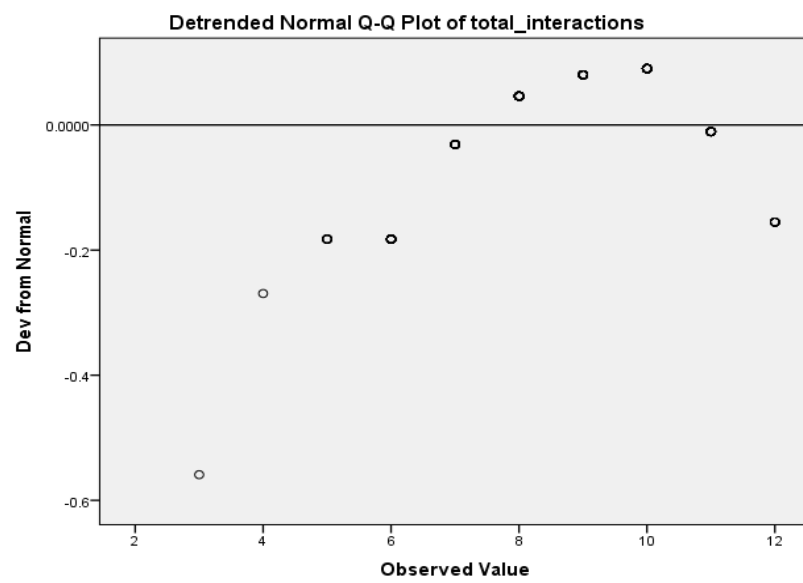
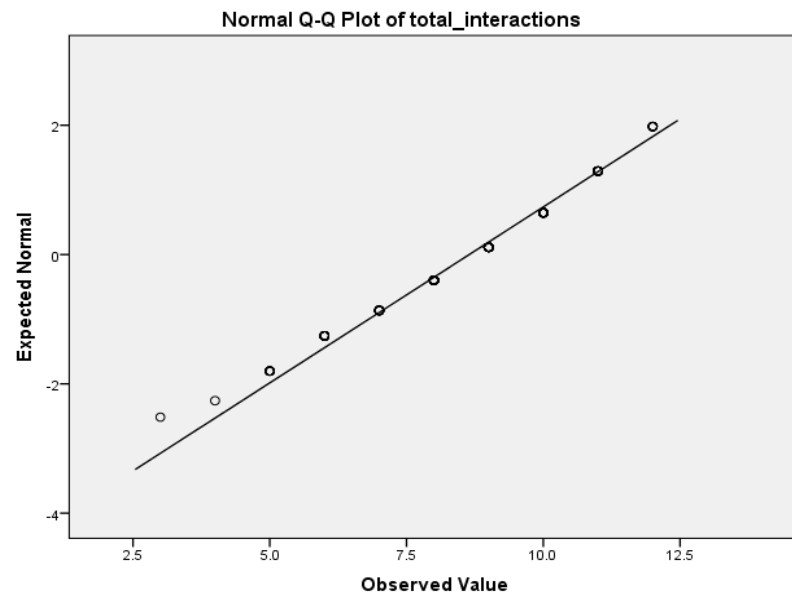
Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
total_interactions	.135	167	.000	.957	167	.000

a. Lilliefors Significance Correction

total_interactions





Case Processing Summary

	Cases					
	Valid		Missing		Total	
	N	Percent	N	Percent	N	Percent
Total_idle_time	167	100.0%	0	0.0%	167	100.0%

Descriptives

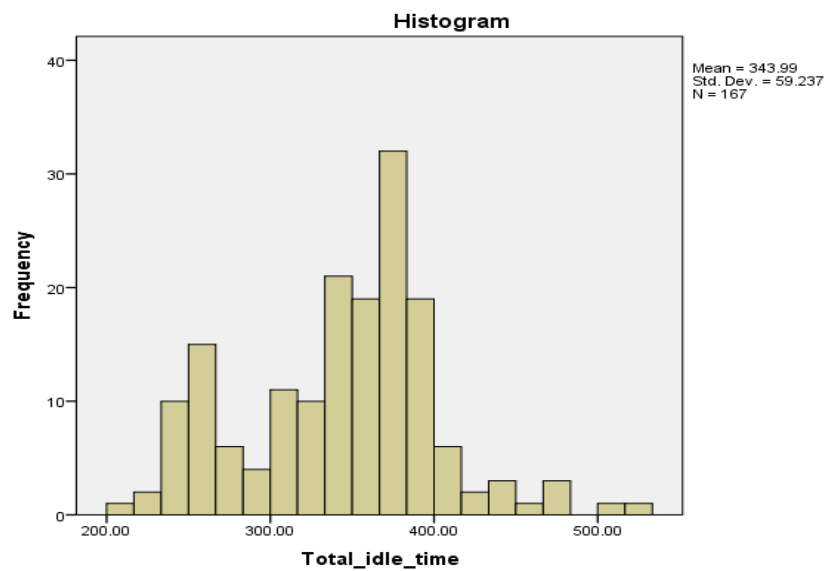
		Statistic	Std. Error
Total_idle_time	Mean	343.9940	4.58386
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	334.9438
		Upper Bound	353.0442
	5% Trimmed Mean	343.0739	
	Median	354.0000	
	Variance	3508.970	
	Std. Deviation	59.23656	
	Minimum	203.00	
	Maximum	531.00	
	Range	328.00	
	Interquartile Range	71.00	
	Skewness	-.060	.188
	Kurtosis	.058	.374

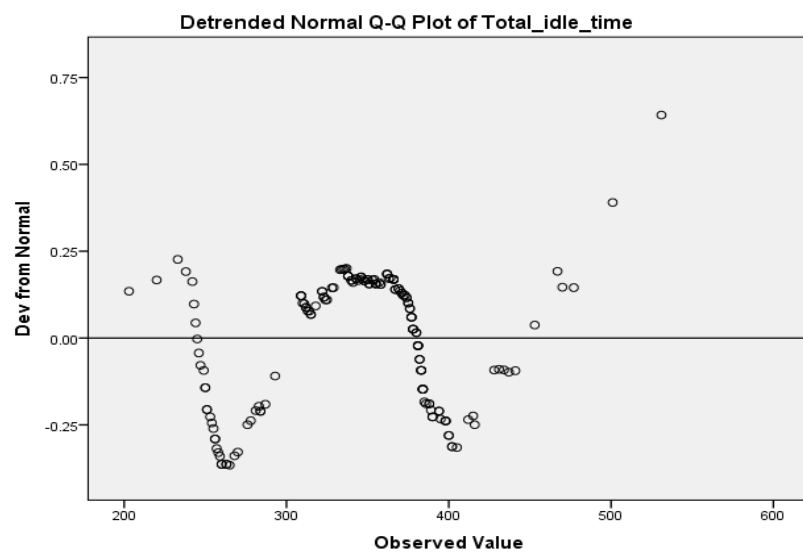
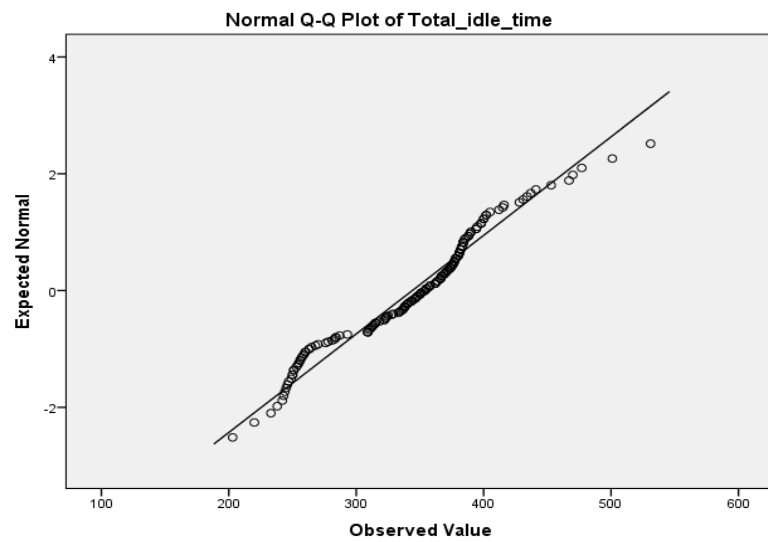
Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Total_idle_time	.082	167	.008	.965	167	.000

a. Lilliefors Significance Correction

Total_idle_time





Case Processing Summary

	Cases					
	Valid		Missing		Total	
	N	Percent	N	Percent	N	Percent
num_of_cards	167	100.0%	0	0.0%	167	100.0%

Descriptives

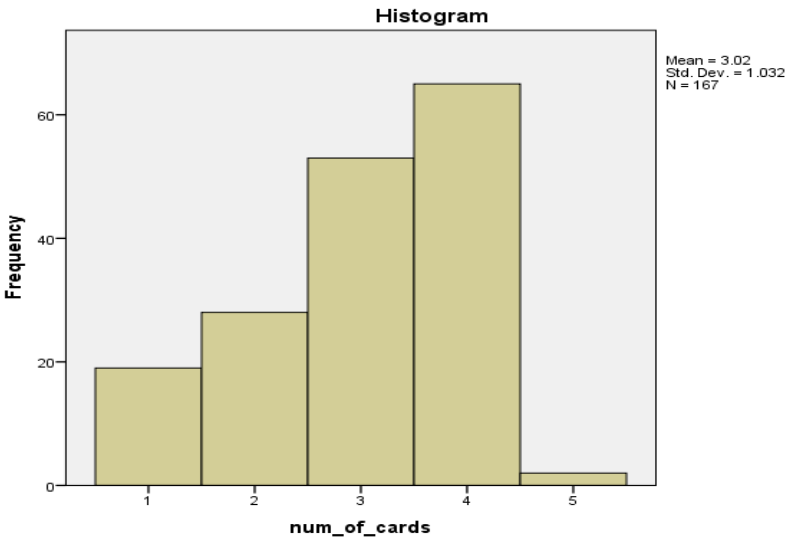
		Statistic	Std. Error
num_of_cards	Mean	3.02	.080
	95% Confidence Interval for Mean		
	Lower Bound	2.86	
	Upper Bound	3.18	
	5% Trimmed Mean	3.06	
	Median	3.00	
	Variance	1.066	
	Std. Deviation	1.032	
	Minimum	1	
	Maximum	5	
	Range	4	
	Interquartile Range	2	
	Skewness	-.601	.188
	Kurtosis	-.656	.374

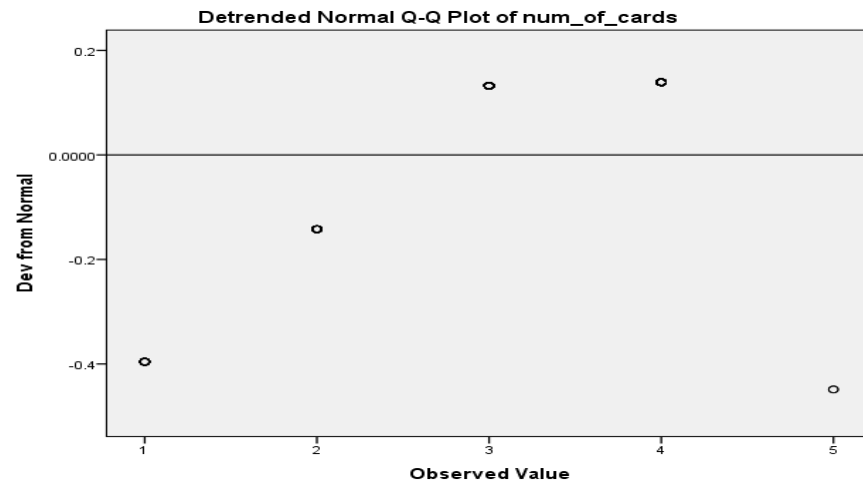
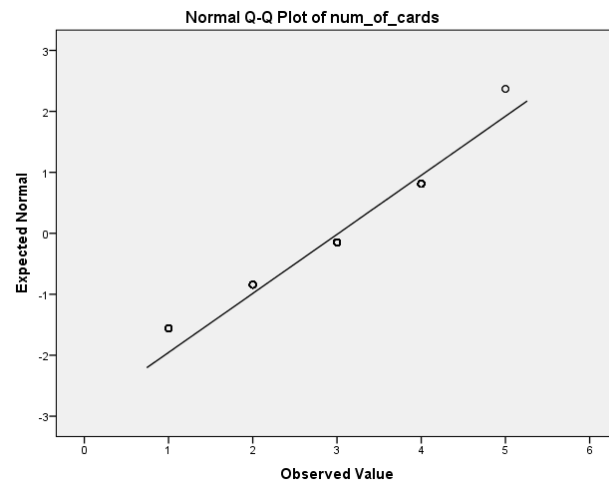
Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
num_of_cards	.230	167	.000	.848	167	.000

a. Lilliefors Significance Correction

num_of_cards





פלט SPSS מודלי רגרסיה לוגיסטית

מודל רגרסיה ראשון:

Block 1: Method = Enter

Omnibus Tests of Model Coefficients

		Chi-square	df	Sig.
Step 1	Step	60.999	5	.000
	Block	60.999	5	.000
	Model	60.999	5	.000

Model Summary

Step	-2 Log likelihood	Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square
1	143.496 ^a	.338	.451

a. Estimation terminated at iteration number 5 because parameter estimates changed by less than .001.

Hosmer and Lemeshow Test

Step	Chi-square	df	Sig.
1	15.213	8	.055

Contingency Table for Hosmer and Lemeshow Test

		gender = f		gender = m		Total
		Observed	Expected	Observed	Expected	
Step 1	1	15	14.012	0	.988	15
	2	14	12.776	1	2.224	15
	3	13	11.137	2	3.863	15
	4	7	9.027	8	5.973	15
	5	7	7.111	8	7.889	15
	6	3	5.743	12	9.257	15
	7	2	4.216	13	10.784	15
	8	3	2.963	12	12.037	15
	9	3	1.581	12	13.419	15
	10	2	.434	11	12.566	13

Classification Table^a

		Predicted		
		gender		Percentage Correct
		f	m	
Step 1	gender f	51	18	73.9
	m	12	67	84.8
	Overall Percentage			79.7

a. The cut value is .500

Variables in the Equation

	B	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)
Step 1 ^a						
card1	.000	.007	.001	1	.975	1.000
card2	-.002	.003	.531	1	.466	.998
card3	.000	.001	.008	1	.927	1.000
total_interactions	-.550	.133	17.102	1	.000	.577
Total_idle_time	.023	.005	23.979	1	.000	1.023
Constant	-2.232	1.921	1.350	1	.245	.107

a. Variable(s) entered on step 1: card1, card2, card3, total_interactions, Total_idle_time.

Observed Groups and Predicted Probabilities

[illegible]

Predicted Probability is of Membership for m

The Cut Value is .50

Symbols: f - f

$$m - m$$

Each Symbol Represents .5 Cases.

מודל רגרסיה שני:

Omnibus Tests of Model Coefficients

		Chi-square	df	Sig.
Step 1	Step	24.026	5	.000
	Block	24.026	5	.000
	Model	24.026	5	.000

Model Summary

Step	-2 Log likelihood	Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square
1	133.045 ^a	.150	.229

a. Estimation terminated at iteration number 5 because parameter estimates changed by less than .001.

Hosmer and Lemeshow Test

Step	Chi-square	df	Sig.
1	7.467	8	.487

Contingency Table for Hosmer and Lemeshow Test

		type = adult		type = child		Total
		Observed	Expected	Observed	Expected	
Step 1	1	15	14.744	0	.256	15
	2	15	14.079	0	.921	15
	3	14	13.474	1	1.526	15
	4	14	13.016	1	1.984	15
	5	12	12.600	3	2.400	15
	6	11	11.831	4	3.169	15
	7	10	10.996	5	4.004	15
	8	10	10.176	5	4.824	15
	9	6	8.843	9	6.157	15
	10	8	5.241	5	7.759	13

Classification Table^a

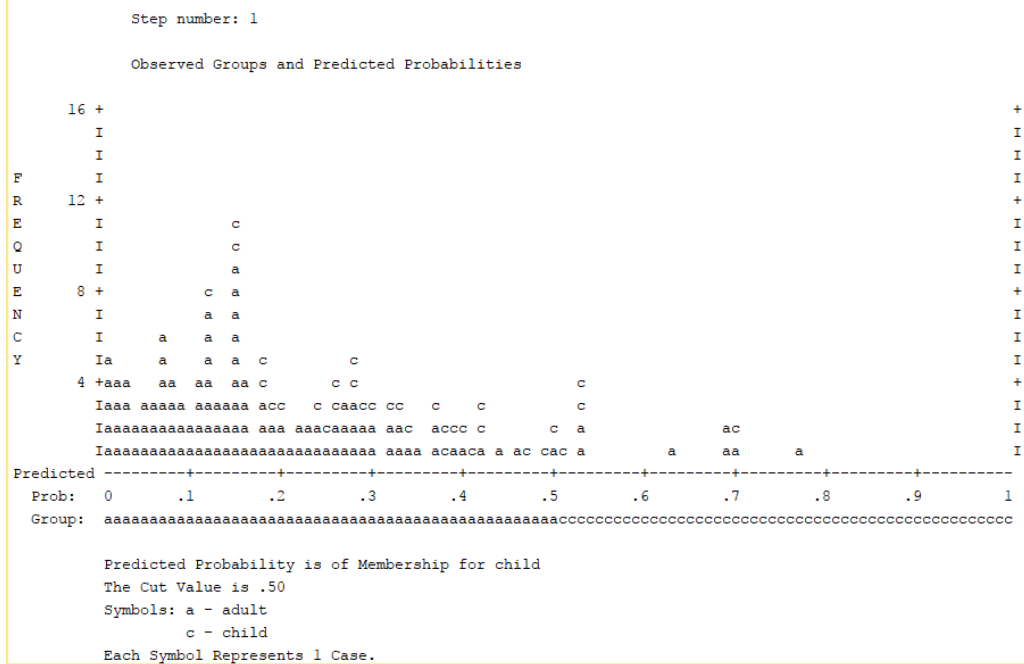
		Predicted		
		type		Percentage Correct
Observed		adult	child	
Step 1	type adult	108	7	93.9
	child	29	4	12.1
Overall Percentage				75.7

a. The cut value is .500

Variables in the Equation

		B	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)
Step 1 ^a	card1	-.026	.011	5.847	1	.016	.975
	card2	-.014	.005	7.187	1	.007	.986
	card3	-.002	.001	1.865	1	.172	.998
	total_interactions	-.019	.114	.027	1	.870	.982
	Total_idle_time	.010	.004	5.309	1	.021	1.010
	Constant	-.155	2.160	.005	1	.943	.857

a. Variable(s) entered on step 1: card1, card2, card3, total_interactions, Total_idle_time.



7.3 נספח ג' - קוד תוכנית ++C הפעלת הרובוט

```
// ManualMoveDlg.cpp : implementation file
//editors: Igal Peretz & Lior Sayfeld

#include "stdafx.h"
#include "ManualMove.h"
#include "ManualMoveDlg.h"
#include "CallBack.h"
#include <string.h>
#include <thread>
#include <iostream>
#include "Debug\NIDAQmx.h"
#include <ctime>
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <time.h>
#include <math.h>
using namespace std;

#define DAQmxErrChk(functionCall) if( DAQmxFailed(error=(functionCall)) ) goto
Error; else
#ifdef _DEBUG
#define new DEBUG_NEW
#undef THIS_FILE
static char THIS_FILE[] = __FILE__;

#endif
struct adaptclass
{
    int tasks;
    int waits;
};
static int robot_move = 0;
static int finish_work=1;
static int stop = 0;
static int robot_work2=0;
static int stopmodel2=1;
static int STaskCount=0;
static int model2task = 0;
static int dev1 = 0;
static int dev2 = 0;
static int model2on=0;
static int model1on = 0;
static int partnum = 1;
static time_t stoper[2][7]; //time[][0]=total time;time[][1]=cube 1
time;time[][2]=cube 2 time;time[][3]=cube 3 time;time[][4]=cube 4
time;time[][2]=robot idle time;time[][3]=human idle time
static double time_diff[7] = { 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 };
////////////////////////adpa
ver////////////////////////
static int pinscount = 1;
static clock_t pins[2][82];
static float pinsans[82];
static int cour = 39;
static float target = 75;
static float targets[82];
static float new_target=75;
static adaptclass initclass[60];
static int adapWorkisOn = 0;
static int adapTask;
```



```

static int adappart;
static int tasksnum = 0;
static int tasksnumlast = 0;
static int workdiste = 0;
static int sleeplast = 0;
static int taskdis = 0;
////////////////////////////////////////fun////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////
void work();
void task();
void givepart();
void timer(char action,int X);
void init();
void giveback();
void takepart();

////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////

void CManualMoveDlg::OnSysCommand(UINT nID, LPARAM lParam)
{
    if ((nID & 0xFFF0) == IDM_ABOUTBOX)
    {
        CAboutDlg dlgAbout;
        dlgAbout.DoModal();
    }
    else
    {
        CDialog::OnSysCommand(nID, lParam);
    }
}

// If you add a minimize button to your dialog, you will need the code below
// to draw the icon. For MFC applications using the document/view model,
// this is automatically done for you by the framework.

void CManualMoveDlg::OnPaint()
{
    if (IsIconic())
    {
        CPaintDC dc(this); // device context for painting

        SendMessage(WM_ICONERASEBKGND, (WPARAM) dc.GetSafeHdc(), 0);

        // Center icon in client rectangle
        int cxIcon = GetSystemMetrics(SM_CXICON);
        int cyIcon = GetSystemMetrics(SM_CYICON);
        CRect rect;
        GetClientRect(&rect);
        int x = (rect.Width() - cxIcon + 1) / 2;
        int y = (rect.Height() - cyIcon + 1) / 2;

        // Draw the icon
        dc.DrawIcon(x, y, m_hIcon);
    }
    else
    {
        CDialog::OnPaint();
    }
}

// The system calls this to obtain the cursor to display while the user drags

```

```

// the minimized window.
HCURSOR CManualMoveDlg::OnQueryDragIcon()
{
    return (HCURSOR) m_hIcon;
}

//-----
void CManualMoveDlg::OnInit()
{
    StartInitTimer();
    BOOL b = Initialization(INIT_MODE_ONLINE, (CallBackFun)&InitEnd,
(CallBackFun)&ErrorMessage);
}

//-----
LRESULT CManualMoveDlg::OnInitEnd( WPARAM wParam, LPARAM lParam )
{
    StopInitTimer(TRUE);
    short nMode = GetMode();

    switch(nMode)
    {
        case INIT_MODE_ONLINE:
        {
            GetDlgItem(IDC_EDIT_MODE)->SetWindowText("On-Line");
            if(AfxMessageBox("Control is off. Do you want to execute
Control On?", MB_OKCANCEL) == IDOK)
            {
                SendMessage(WM_COMMAND, IDM_CON);
            }
            break;
        }
        case INIT_MODE_OFFLINE:
        {
            GetDlgItem(IDC_EDIT_MODE)->SetWindowText("Off-Line");
            break;
        }
        default:
        {
            AfxMessageBox( "InitEnd invalid notification");
            break;
        }
    }
    Invalidate();
    return 0;
}

//-----
void CManualMoveDlg::OnCon()
{
    if(Control( '&', TRUE ) == FALSE)
    {
        return;
    }
}

void CManualMoveDlg::OnCoff()
{
    if(Control( '&', FALSE ) == FALSE)
    {
        return;
    }
}

```

```
//-----
LRESULT CManualMoveDlg::OnCtrlStatus( WPARAM wParam, LPARAM lParam )
{
    if(wParam == 0)
    {
        GetDlgItem(IDC_EDIT_MODE)->SetWindowText((LPCTSTR)lParam);
    }
    else if(wParam == 1)
    {
        GetDlgItem(IDC_EDIT_CON_OFF)->SetWindowText((LPCTSTR)lParam);
    }
    Invalidate();
    return 0;
}
```

```
//-----
void CManualMoveDlg::RunManual(int iButtonId)
{
    if(!UpdateData(TRUE))
        return;

    ConfigData Config;
    if(GetConfig(Config) == FALSE)
        return;

    static DWORD dwPrevTick = 0L;
    DWORD dwCurTick = GetTickCount();

    if(dwCurTick - dwPrevTick < (DWORD)(TIMER_MANUAL_PERIOD))
    {
        dwPrevTick = dwCurTick;
        return;
    }

    m_iComboSpeed += 1;
    if(iButtonId == IDC_BUTTON_MINUS)
        m_iComboSpeed *= -1;

    if(m_iCurrAxis < 0 || m_iCurrAxis > 5)
        return;

    EnterManual(MANUAL_TYPE_ENC);
    MoveManual((unsigned char)m_iCurrAxis, m_iComboSpeed * 10);

    SetTimer(TIMER_ID_MANUAL, TIMER_MANUAL_PERIOD, 0);
    dwPrevTick = dwCurTick;
}
```

```
//-----
void CManualMoveDlg::StopManual()
{
    m_iCurrAxis = -1;
    KillTimer(TIMER_ID_MANUAL);
    CloseManual();
}
```

```
//-----
void CManualMoveDlg::OnButtonOpenGripper()
{
    OpenGripper();
}
```

```

//-----
void CManualMoveDlg::OnButtonCloseGripper()
{
    CloseGripper();
}

//-----
void CManualMoveDlg::OnTimer(UINT nIDEvent)
{
    if(nIDEvent == TIMER_ID_INIT)
    {
        StopInitTimer(FALSE);
    }
    if(nIDEvent == TIMER_ID_MANUAL)
    {
        MoveManual(m_iCurrAxis, m_iComboSpeed * 10);
    }

    CDialog::OnTimer(nIDEvent);
}

//-----
void CManualMoveDlg::StartInitTimer()
{
    SetWindowText("Initialization please wait ...");
    DisableAll();
    SetTimer(TIMER_ID_INIT, 15000, 0);
}

//-----
void CManualMoveDlg::StopInitTimer(BOOL bIsDone)
{
    SetWindowText("Manual Movement");
    DisableAll(FALSE);
    KillTimer(TIMER_ID_INIT);
}

//-----
void CManualMoveDlg::DisableAll(BOOL bIsDisable)
{
    CWnd* pWnd = this->GetWindow(GW_CHILD);
    while( pWnd )
    {
        pWnd->EnableWindow(!bIsDisable);
        pWnd = pWnd->GetWindow(GW_HWNDNEXT);
    }
}

void CManualMoveDlg::OnBnClickedButtonHoming()
{
    Home('A', (CallBackFun)&HomingNotif);
}

afx_msg LRESULT CManualMoveDlg::OnHoming(WPARAM wParam, LPARAM lParam)
{
    UCHAR ucHomingNotifCode = (UCHAR)wParam;
    if(ucHomingNotifCode == HOME_NOTIF_FINISH)
    {
        AfxMessageBox("Homing completed");
    }
}

```

```

        return 0;
    }

void CManualMoveDlg::OnBnClickedButton1()//teach point function
{
    WatchMotion((CallBackFun) MotionEnd);//enable motion detection moe for
the robot
    DefineVector('A',"TEST",100);//creation of point vector
    long* plCoorArray = new long[5];
    // the scale is mm
    plCoorArray[0] = 369000;//X axis
    plCoorArray[1] = 0;//Y axis
    plCoorArray[2] = 403000;//Z axis
    plCoorArray[3] = -63000;//Pitch axis
    plCoorArray[4] = 0;//roll axis
    Teach("TEST",10,plCoorArray,5,ABS_XYZ_A);//push the array into the
vector to create a point **point number 5
    plCoorArray[0] = 41458;
    plCoorArray[1] = 378042;
    plCoorArray[2] = 68734;
    plCoorArray[3] = -45734;
    plCoorArray[4] = 3584;
    Teach("TEST",11,plCoorArray,5,ABS_XYZ_A);
    plCoorArray[0] = 76539;
    plCoorArray[1] = 584170;
    plCoorArray[2] = 228876;
    plCoorArray[3] = -11397;
    plCoorArray[4] = 1290;
    Teach("TEST",12,plCoorArray,5,ABS_XYZ_A);
    plCoorArray[0] = 169000-360000+190000;
    plCoorArray[1] = 0+100000+100000;
    plCoorArray[2] = 503000-303000+17000;
    plCoorArray[3] = -63000;
    plCoorArray[4] = 0+10000;
    Teach("TEST",13,plCoorArray,5,ABS_XYZ_A);
    plCoorArray[0] = -314204;
    plCoorArray[1] = 241291;
    plCoorArray[2] = 221390;
    plCoorArray[3] = -92401;
    plCoorArray[4] = 0 ;
    Teach("TEST", 14, plCoorArray, 5, ABS_XYZ_A);
    plCoorArray[0] = 169000 - 360000 + 260000;
    plCoorArray[1] = 0 + 100000 + 265000;
    plCoorArray[2] = 503000 - 203000 + 137000;
    plCoorArray[3] = -33000;
    plCoorArray[4] = 0 + 10000;
    Teach("TEST", 15, plCoorArray, 5, ABS_XYZ_A);
    plCoorArray[0] = -240715;
    plCoorArray[1] = 99135;
    plCoorArray[2] = 31402;
    plCoorArray[3] = -92616;
    plCoorArray[4] = -28351;
    Teach("TEST", 16, plCoorArray, 5, ABS_XYZ_A);
    plCoorArray[0] = -298226;
    plCoorArray[1] = 91573;
    plCoorArray[2] = 28571;
    plCoorArray[3] = -92616;
    plCoorArray[4] = -8745;
    Teach("TEST", 17, plCoorArray, 5, ABS_XYZ_A);
    plCoorArray[0] = -355770;
    plCoorArray[1] = 96204;

```

```

    plCoorArray[2] = 30283;
    plCoorArray[3] = -87168;
    plCoorArray[4] = -17060;
    Teach("TEST", 18, plCoorArray, 5, ABS_XYZ_A);
    plCoorArray[0] = -242363;
    plCoorArray[1] = 187357;
    plCoorArray[2] = 33462;
    plCoorArray[3] = -87526;
    plCoorArray[4] = -41863;
    Teach("TEST", 19, plCoorArray, 5, ABS_XYZ_A);
    plCoorArray[0] = -307207;
    plCoorArray[1] = 177786;
    plCoorArray[2] = 31031;
    plCoorArray[3] = -87132;
    plCoorArray[4] = -32186;
    Teach("TEST", 20, plCoorArray, 5, ABS_XYZ_A);
    plCoorArray[0] = -357623;
    plCoorArray[1] = 176383;
    plCoorArray[2] = 30330;
    plCoorArray[3] = -87132;
    plCoorArray[4] = -32186;
    Teach("TEST", 21, plCoorArray, 5, ABS_XYZ_A);
}

```

```

void CManualMoveDlg::OnBnClickedButton2()
{

```

```

    model2on = 0;
    adapWorkisOn = 0;
    finish_work = 1;
    model1on = 1;
    for (int i = 0; i < 7; i++)//init
        time_diff[i] = 0;
    for (int i = 0; i < 2; i++)
        for (int j = 0; j < 7; j++)
            stoper[i][j] = NULL;
    std::thread t1(work);//enable model 1
    t1.detach();
}

```

```

void CManualMoveDlg::Change_robot_move(){//change the static variable that
tell is the robot finshed his work

```

```

    if (robot_move == 1){
        robot_move = 0;
    }
    else{
        robot_move = 1;
    }
}

```

```

void CManualMoveDlg::OnBnClickedButton4()//emerngy stop
{

```

```

    Stop('&');//& = all axis
    stop=1;
    stopmodel2 = 0;
    finish_work = 0;
}

```

```

void CManualMoveDlg::OnBnClickedButton5()
{

```

```

        takepart();
    }

    void work()//the function that gives the human a part
    {
        do{
            while (robot_move == 1)
                Sleep(150);
            Speed('A', 100);
            OpenGripper();
            robot_move = 1;
            while (robot_move&&!stop){
                if (tasksnumlast < floor((target - 11) / 22) &&
adapWorkisOn == 1){//if the human changed is speed and the robot can do anther
secondary work
                    workdiste = 1;
                    goto end;
                }

                Sleep(150);
            }
            double tempw;
            sleeplast += 1000;
            tempw = target - 23 - 22 * (tasksnumlast - 1) - 9;//create
target time
            while (sleeplast < (int)(tempw *
1000)&&adapWorkisOn==1&&partnum!=1){

                Sleep(150);
                sleeplast +=
                tempw = target - 23 - 22 * (tasksnumlast - 1) - 9;
            }
            if (stop) goto end;
            MoveJoint("TEST", 13, NULL, 0);//go to position 13
            robot_move = 1;
            while (robot_move&&!stop){
                if (tasksnumlast < floor((target - 11) / 22)
&& adapWorkisOn == 1){
                    workdiste = 1;
                    goto end;
                }

                Sleep(150);
            }
            sleeplast += 3000;
            tempw = target - 23 - 22 * (tasksnumlast - 1) - 9;
            while (sleeplast < (int)(tempw * 1000) && adapWorkisOn ==
1 && partnum != 1){

                Sleep(150);
                sleeplast += 150;
                tempw = target - 23 - 22 * (tasksnumlast - 1) - 9;
            }
            if (stop) goto end;
            MoveJoint("TEST", 11, NULL, 0);
            robot_move = 1;
            while (robot_move&&!stop){
                if (tasksnumlast < floor((target - 13) / 22)
&& adapWorkisOn == 1){
                    workdiste = 1;
                    goto end;
                }
            }
        }
    }
}

```

```

    }

    Sleep(150);
}
sleeplast += 2000;
tempw = target - 23 - 22 * (tasksnumlast - 1) - 9;
while (sleeplast < (int)(tempw * 1000) && adapWorkisOn ==
1 && partnum != 1){//check if the robot need to wait some more

    Sleep(150);
    sleeplast += 150;
    tempw = target - 23 - 22 * (tasksnumlast - 1) - 9;
}
if (stop) goto end;
CloseGripper();
robot_move = 1;
while (robot_move&&!stop){
    if (tasksnumlast < floor((target - 16) / 22) &&
adapWorkisOn == 1){
        workdiste = 1;
        while (robot_move == 1)
            Sleep(150);
        OpenGripper();
        robot_move = 1;
        while (robot_move&&!stop){
            Sleep(150);
        }
        goto end;
    }

    Sleep(150);
}
tempw = target - 23 - 22 * (tasksnumlast - 1) - 9;
while (sleeplast < (int)(tempw * 1000) && adapWorkisOn ==
1 && partnum != 1){

    Sleep(150);
    sleeplast += 150;
    tempw = target - 23 - 22 * (tasksnumlast - 1) - 9;
}
if (stop) goto end;
MoveJoint("TEST", 13, NULL, 0);
robot_move = 1;
while (robot_move&&!stop){
    if (tasksnumlast < floor((target - 18) / 22) &&
adapWorkisOn == 1){
        workdiste = 1;
        giveback();
        goto end;
    }

}
if (stop) goto end;
MoveJoint("TEST", 10, NULL, 0);
robot_move = 1;
while (robot_move&&!stop){
    if (tasksnumlast < floor((target - 22) / 22) &&
adapWorkisOn == 1){
        Stop('&');
        giveback();
    }
}

```



```

        workdiste = 1;
        goto end;
    }

    Sleep(150);
}
if (stop) goto end;
givepart();
if (model1on == 1){
    std::thread t2(detectmodel2);
    t2.detach();
}
if (partnum == 1)
    timer('S', 0);
else{
    timer('P', 0);
    time_diff[0] = time_diff[0] +
difftime(stoper[1][0], stoper[0][0]);
    timer('S', 0);
}
if (model1on == 1 && partnum != 5){
    for (int i = 0; i < 2; i++){//secondery task for
model 1
        task();
    }
    Sleep(10000);
}
end:
while (robot_move == 1)
    Sleep(150);
robot_move = 0;
stop = 0;
} while (finish_work&&model1on==1&&partnum!=5);//stop condtion for
model 1

robot_work2 = 0;
model2task = 1;
pins[0][pinscount-1] = clock();
}

void timer(char action,int X){//function that starts or stops the timmer
    if (action == 'S')
        time(&stoper[0][X]);
    else{
        time(&stoper[1][X]);
    }
}

}

void CManualMoveDlg::OnBnClickedButton11();//write the collected data to txt
file named "example.txt"
{
    CString str;
    CString model;
    if (model1on == 1)
        model = "model 1";
    if (model2on == 1)
        model = "model 2";
    if (adapWorkisOn == 1){
        model = "model 3";
        str.Format(model + "\n Total=%g ", pinsans[81]);
    }
}

```

```

        for (int i = 1; i < 81; i++){
            if (i%20==0)
                str.Format(str + "%g \n", pinsans[i]);
            else
                str.Format(str + "%g ", pinsans[i]);
        }
        str.Format(str + "targets \n");
        for (int i = 1; i < 81; i++){
            if (i % 20 == 0)
                str.Format(str + "%g \n", targets[i]);
            else
                str.Format(str + "%g ", targets[i]);
        }
        ofstream myfile;
        myfile.open("example.txt", std::ios_base::app);
        if (myfile.is_open())
        {
            myfile.end();
            myfile << str + "\n";
            myfile.close();
        }
        else cout << "Unable to open file";
    }
    else{
        str.Format(model + "\n Total=%g Cube 1=%g Cube 2=%g Cube 3=%g
Cube 4=%g", time_diff[0], time_diff[1], time_diff[2], time_diff[3],
time_diff[4]);
        ofstream myfile;
        myfile.open("example.txt", std::ios_base::app);
        if (myfile.is_open())
        {
            myfile.end();
            myfile << str + "\n";
            myfile.close();
        }
        else cout << "Unable to open file";
    }
}

```

7.4 נספח ד' - נתוני ביצוע כפי שנאספו בעמדה

child/a dult	gend er	idle_rob ot_1	interactions_r obot_2	idle_rob ot2	interaction_ro bot_1	num_of_c ards	car d1	car d2	car d3	car d4	car d5	total_interac tions	Total_idle_ time
1	2	189	7	87	4	4	30	106	150	334		11	276
1	1	175	3	187	5	4	54	182	152	314		8	362
1	1	173	5	145	3	4	30	219	113	289		8	318
1	2	170	4	84	4	4	70	175	190	286		8	254
1	2	189	6	74	3	4	82	177	160	274		9	263
1	2	176	5	44	5	4	86	158	155	231		10	220
1	2	195	6	89	5	4	31	180	150	227		11	284
1	2	171	7	71	4	4	61	138	155	215		11	242
1	2	178	5	72	3	4	74	198	150	256		8	250
1	1	180	4	178	2	4	59	227	162	256		6	358
1	1	196	4	176	4	4	61	178	159	251		8	372
1	2	188	4	68	4	4	125	187	201	248		8	256
1	2	178	6	82	5	4	54	137	187	246		11	260
1	2	160	5	73	5	4	67	137	198	243		10	233
1	1	184	4	185	4	4	62	197	139	286		8	369
1	2	179	6	65	3	4	70	188	208	231		9	244
1	2	181	5	82	3	4	59	110	184	229		8	263
1	2	187	5	201	3	4	58	92	133	229		8	388
1	2	112	5	91	5	4	60	134	153	225		10	203
1	2	188	7	71	3	4	85	167	179	223		10	259
1	1	205	5	178	4	4	89	191	159	261		9	383
1	1	165	4	178	3	4	39	158	123	219		7	343
1	1	189	6	199	5	4	70	154	157	216		11	388
1	1	169	3	221	3	4	19	140	168	213		6	390
1	1	179	4	172	4	4	48	190	177	213		8	351
1	2	165	7	150	4	4	41	205	168	207		11	315
1	1	181	5	190	3	4	49	198	127	201		8	371
1	1	119	4	119	2	4	82	141	128	200		6	238
1	2	117	5	130	4	4	46	287	141	198		9	247
1	1	187	4	160	5	4	75	186	119	191		9	347
1	1	195	3	167	3	4	47	167	172	186		6	362
1	2	183	5	77	5	4	88	165	148	181		10	260
1	2	181	5	76	3	4	62	150	168	180		8	257
1	1	202	5	175	3	5	25	167	167	179	182	8	377
1	1	242	5	127	2	4	16	108	129	177		7	369
1	1	194	4	190	4	4	58	184	177	204		8	384
1	1	163	5	160	3	4	101	71	459	170		8	323
1	1	166	4	215	4	4	26	214	111	204		8	381
1	1	249	2	156	3	4	15	164	143	131		5	405
1	1	186	4	152	4	4	69	181	149	131		8	338
1	1	213	7	170	3	4	47	173	149	105		10	383
1	1	227	1	210	2	1	83					3	437
1	1	194	2	182	3	2	51	212				5	376

1	1	178	5	155	2	4	106	338				9	333
1	1	173	3	258	2	3	100	140	196			5	431
1	1	269	3	201	3	2	86	215				6	470
1	2	287	6	244	4	1	59					10	531
1	1	216	3	173	3	1	26					6	389
1	2	205	7	296	4	2	82	140				11	501
1	1	196	3	142	3	2	50	407				6	338
1	1	225	4	141	2	3	19	294	153			6	366
1	1	159	4	239	2	3	92	232	115			6	398
1	1	183	3	183	3	3	46	151	170			6	366
1	1	139	4	170	2	3	43	235	201			6	309
1	1	205	3	272	4	2	102	120				7	477
1	1	128	4	220	3	1	45					7	348
1	1	193	7	165	3	1	35					10	358
1	1	112	4	197	3	3	103	254	152			7	309
1	2	256	4	178	3	3	45	130	140			7	434
1	2	179	4	76	3	3	81	125	162			7	255
1	1	166	4	168	3	3	102	278	169			7	334
1	2	163	5	115	2	2	52	138				7	278
1	1	198	5	200	3	3	60	182	172			8	398
1	2	206	5	196	3	1	81					8	402
1	2	242	4	211	4	1	46					8	453
1	1	190	5	210	3	2	105	137				8	400
1	1	196	5	179	3	2	56	182				8	375
1	2	212	5	203	3	2	28	324				8	415
1	1	140	4	188	4	3	61	198	134			8	328
1	2	155	5	167	3	3	30	252	135			8	322
1	1	190	5	177	3	3	59	319	135			8	367
1	1	185	5	179	3	3	48	194	168			8	364
1	2	177	4	74	4	3	68	193	175			8	251
1	2	182	5	69	3	3	82	145	189			8	251
1	1	142	5	220	3	3	34	197	190			8	362
1	2	172	4	74	4	3	85	151	211			8	246
1	2	268	5	199	4	1	185					9	467
1	2	162	6	220	3	1	161					9	382
1	2	189	5	186	4	1	68					9	375
1	1	195	4	179	5	1	66					9	374
1	2	185	5	210	4	2	114	85				9	395
1	1	185	5	166	4	2	62	176				9	351
1	1	189	6	161	3	2	54	167				9	350
1	2	196	5	159	4	2	45	200				9	355
1	1	170	4	178	5	2	46	224				9	348
1	2	182	6	133	3	2	48	255				9	315
1	1	238	5	190	4	2	20	268				9	428
1	1	194	5	187	4	3	175	172	126			9	381
1	2	209	6	154	3	3	48	333	136			9	363
1	2	178	6	147	3	3	68	349	166			9	325

1	1	199	4	185	5	3	55	176	170			9	384
1	2	191	6	59	3	3	68	109	172			9	250
1	2	147	6	146	3	3	39	229	176			9	293
1	2	181	6	84	3	3	69	138	195			9	265
1	2	202	5	68	4	3	50	143	204			9	270
1	2	147	6	234	4	1	131					10	381
1	2	153	6	188	4	1	87					10	341
1	1	174	6	161	4	1	64					10	335
1	1	179	7	159	3	1	62					10	338
1	1	190	6	183	4	1	27					10	373
1	2	187	6	170	4	2	208	155				10	357
1	1	175	5	195	5	2	53	196				10	370
1	2	179	5	158	5	2	48	321				10	337
1	2	234	5	207	5	2	45	304				10	441
1	2	133	7	151	3	2	33	384				10	284
1	2	157	6	156	4	3	47	218	124			10	313
1	1	177	5	178	5	3	62	175	144			10	355
1	2	181	5	64	5	3	127	198	156			10	245
1	1	192	7	190	3	3	56	189	166			10	382
1	1	178	6	175	4	3	77	200	168			10	353
1	2	188	6	70	4	3	83	163	170			10	258
1	1	203	6	191	4	3	48	188	175			10	394
1	2	197	6	180	4	3	48	355	181			10	377
1	2	177	7	66	3	3	68	155	190			10	243
1	2	147	6	189	4	3	41	424	193			10	336
1	2	175	6	74	4	3	99	143	212			10	249
1	2	130	5	193	5	3	24	244	281			10	323
1	1	185	5	193	6	3	80	150	119			11	378
1	2	127	7	154	4	1	41					11	281
1	1	197	6	183	5	2	47	190				11	380
1	1	175	5	165	3	3	55	159	139			8	340
1	2	193	6	209	5	3	16	208	147			11	402
1	1	182	3	184	2	3	67	188	151			5	366
1	1	143	4	167	2	3	27	198	184			6	310
1	2	192	7	76	4	3	74	141	201			11	268
1	2	188	6	65	5	3	52	120	208			11	253
1	2	180	6	76	5	3	91	143	234			11	256
1	2	183	6	202	5	3	49	104	341			11	385
1	1	195	7	176	5	2	51	153				12	371
1	1	189	7	191	5	2	69	161				12	380
1	2	164	7	148	5	3	160	204	199			12	312
1	1	196	7	182	5	3	51	158	212			12	378
3	1	190	5	210	3	2	105	107				8	400
3	1	186	4	152	4	4	69	181	149	181		8	338
3	1	121	5	162	5	3	16	155	164			10	283
3	1	249	2	156	3	4	15	164	143	181		5	287
3	1	166	4	215	4	4	26	164	111	151		8	340

3	1	169	3	221	3	4	19	140	168	213		6	390
3	1	173	3	258	2	3	60	130	196			5	398
3	1	309	2	211	3	1	135					5	346
3	1	238	5	190	4	2	20	268				9	377
3	1	183	3	183	3	3	46	151	210			6	366
3	1	205	2	272	2	2	70	120				4	412
3	1	165	4	178	3	4	21	158	123	219		7	343
3	1	189	2	192	4	2	13	246				6	381
3	1	139	4	170	2	3	33	235	201			6	309
3	1	206	6	177	4	1	59					10	312
3	1	205	7	178	5	5	67	144	216	224	68	12	383
3	1	193	7	211	5	4	75	143	127	171		12	350
3	1	182	4	196	3	4	62	171	113	282		7	378
3	1	181	7	205	3	4	52	162	106	152		10	386
3	1	181	4	193	3	4	72	130	142	174		7	374
3	1	186	6	198	5	4	75	156	149	161		11	384
3	2	171	5	196	4	4	38	151	153	276		9	367
3	2	201	5	196	4	4	47	206	111	238		9	311
3	2	202	7	200	5	4	38	163	111	152		12	394
3	2	204	4	212	3	4	52	189	217	257		7	416
3	2	168	5	187	5	4	47	178	185	182		10	355
3	2	189	5	210	3	4	59	180	148	249		8	324
3	2	194	5	194	4	4	49	160	136	210		9	346
3	2	171	4	205	3	4	48	136	109	337		7	376
3	2	165	6	194	4	4	54	129	130	170		10	329
3	2	191	5	193	5	4	54	160	120	166		10	384
3	2	174	4	202	5	4	50	164	169	183		9	322
3	2	190	7	204	4	4	48	189	163	290		11	344
3	2	186	7	199	4	4	70	126	177	153		11	314
3	2	199	4	213	4	4	69	150	162	148		8	354

7.5 נספח ה' - קוד C# עבור תוכנית שעות

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;

namespace WindowsFormsApplication1
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
        }
        int min1, sec1, milsec1, min2, sec2, milsec2, min3, sec3, milsec3, min4, sec4, milsec4,
flag1, flag2 = 0;
        int indx1 = 1, indx2 = 1, indx3 = 1;
        int[] arr1 = new int[20];
        int[] arr2 = new int[20];
        int[] arr3 = new int[20];
        int multipli = 1;

        private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            timer1.Start();
            timer4.Start();
            arr1[0] = 0;
            arr2[0] = 0;
            arr3[0] = 0;

        }

        private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            timer2.Start();
            timer3.Stop();
            multipli = 2;
            flag1 = 1;
            if (flag2 == 1)
            {
                flag2 = 0;
                arr2[indx2] = sec3 + 60 * min3 - arr2[0];
                arr2[0] += arr2[indx2];
                indx2++;
            }
        }

        private void button3_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            timer3.Start();
            timer2.Stop();
            multipli = 4;
            flag2 = 1;
            if (flag1 == 1)
            {
                flag1 = 0;
                arr1[indx1] = sec2 + 60 * min2 - arr1[0];
```

```

        arr1[0] += arr1[indx1];
        indx1++;
    }
}

private void timer1_Tick(object sender, EventArgs e)
{
    label1.Text = min1 + ":" + sec1 + ":" + milsec1.ToString();
    milsec1 += 1 * multipli;
    if (milsec1 > 10) {
        sec1++;
        milsec1 = 0;
    }
    else
        milsec1++;
    if (sec1 > 59)
    {
        min1++;
        sec1 = 0;
    }
    if (min1 == 15 && sec1 == 0 && milsec1 == 0)
    {
        string text = "";
        timer1.Stop();
        timer2.Stop();
        timer3.Stop();
        if (flag1 == 1)
        {
            arr1[indx1] = sec2 + min2 * 60 - arr1[0];
            arr1[0] += arr1[indx1];
        }
        if (flag2 == 1)
        {
            arr2[indx2] = sec3 + min3 * 60 - arr2[0];
            arr2[0] += arr2[indx2];
        }
        MessageBox.Show("GAME OVER");
        text = " robot 1 idle: ";
        foreach (int i in arr1)
        {
            if (i > 0)
                text = text + ", " + i.ToString();
        }
        text = text + " robot 2 idle: ";
        foreach (int i in arr2)
        {
            if (i > 0)
                text = text + ", " + i.ToString();
        }
        text = text + " card assembly: ";
        foreach (int i in arr3)
        {
            if (i > 0)
                text = text + ", " + i.ToString();
        }
        MessageBox.Show(text);
    }
}

}

private void button4_Click(object sender, EventArgs e)
{

```



```

multipli = 1;
timer2.Stop();
timer3.Stop();
if (flag1 == 1)
{
    flag1 = 0;
    arr1[indx1] = sec2 + 60 * min2 - arr1[0];
    arr1[0] += arr1[indx1];
    indx1++;
}
if (flag2 == 1)
{
    flag2 = 0;
    arr2[indx2] = sec3 + 60 * min3 - arr2[0];
    arr2[0] += arr2[indx2];
    indx2++;
}
}

private void button5_Click(object sender, EventArgs e)
{
    multipli = 1;
    timer2.Stop();
    timer3.Stop();
}

private void button5_Click_1(object sender, EventArgs e)
{
    timer2.Start();
    timer3.Start();
    multipli = 6;
    flag1 = 1;
    flag2 = 1;
}

private void timer2_Tick(object sender, EventArgs e)
{
    label5.Text = min2 + ":" + sec2 + ":" + milsec2.ToString();
    milsec2 += 1;
    if (milsec2 > 10)
    {
        sec2++;
        milsec2 = 0;
    }
    else
        milsec2++;
    if (sec2 > 59)
    {
        min2++;
        sec2 = 0;
    }
}

private void timer3_Tick(object sender, EventArgs e)
{
    label6.Text = min3 + ":" + sec3 + ":" + milsec3.ToString();
    milsec3 += 1;
    if (milsec3 > 10)
    {
        sec3++;
        milsec3 = 0;
    }
    else
        milsec3++;
}

```

```

        if (sec3 > 59)
        {
            min3++;
            sec3 = 0;
        }
    }

    private void timer4_Tick(object sender, EventArgs e)
    {
        //label6.Text = min3 + ":" + sec3 + ":" + milsec3.ToString();
        milsec4 += 1;
        if (milsec4 > 10)
        {
            sec4++;
            milsec4 = 0;
        }
        else
            milsec4++;
        if (sec4 > 59)
        {
            min4++;
            sec4 = 0;
        }
    }

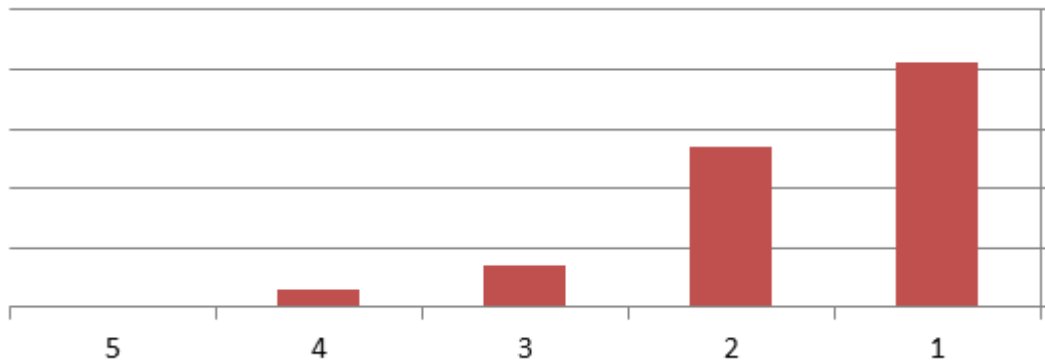
    private void button6_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        arr3[indx3] = sec4 + min4 * 60 - arr3[0];
        arr3[0] += arr3[indx3];
        indx3++;
    }
}

```

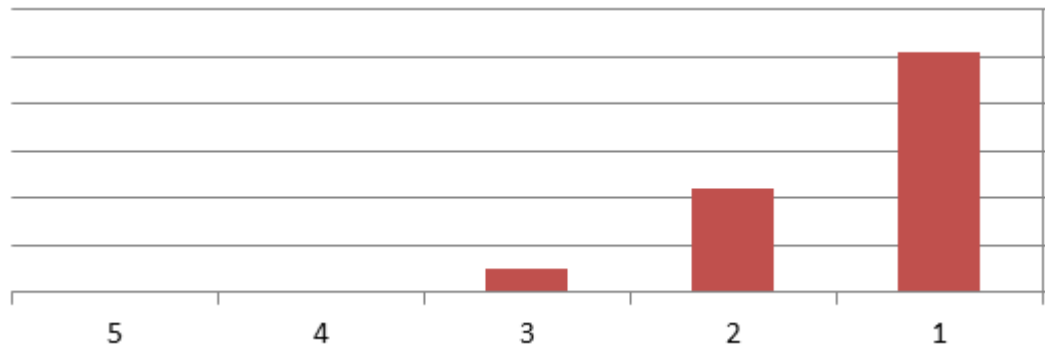
7.6 נספח ו' - תוצאות השאלונים

התפלגות התשובות לשאלות שנשאלו בשאלון סיום הניסוי

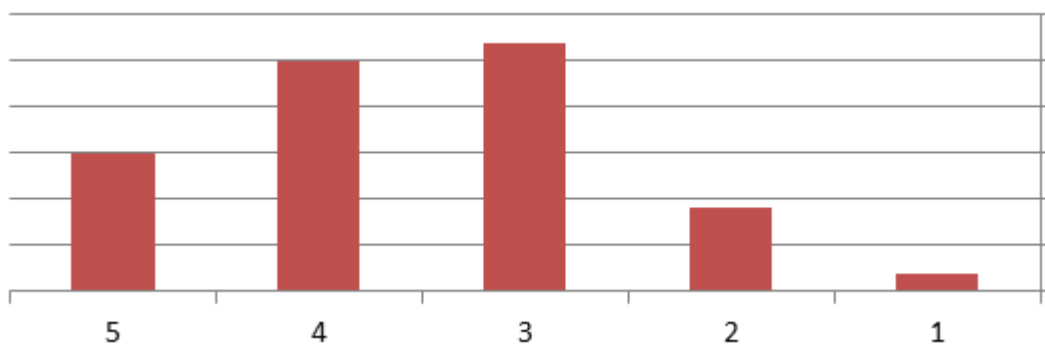
1. המטלה הייתה קשה לביצוע?



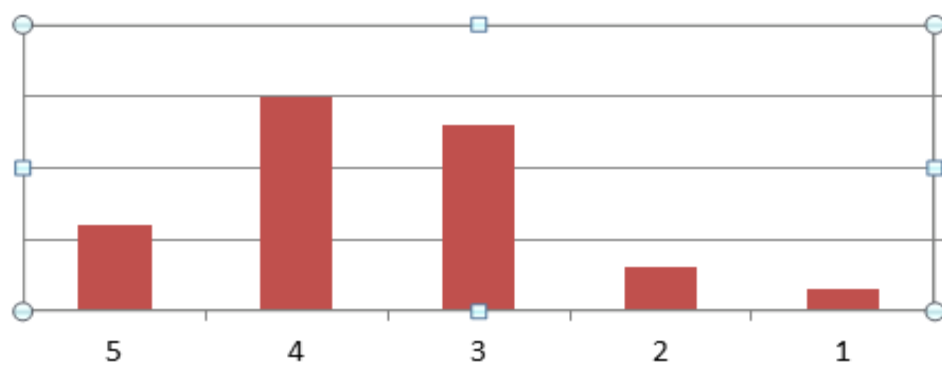
2. האם נדרשו ממך מאמצים מנטלים לביצוע המטלה?



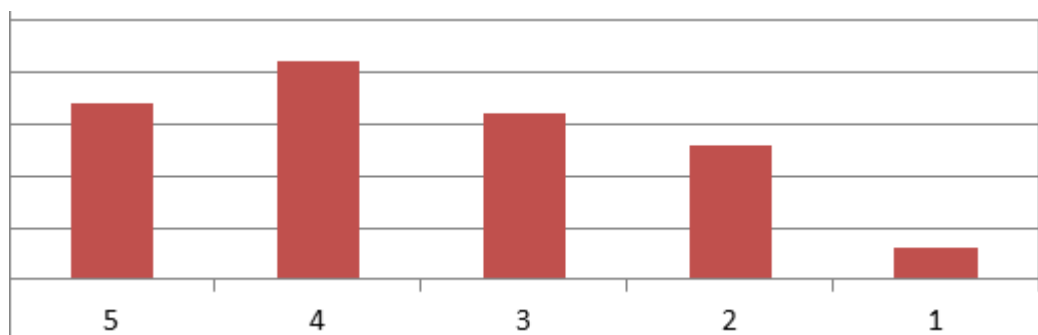
3. הרגשתי שהצלחתי במשימה?



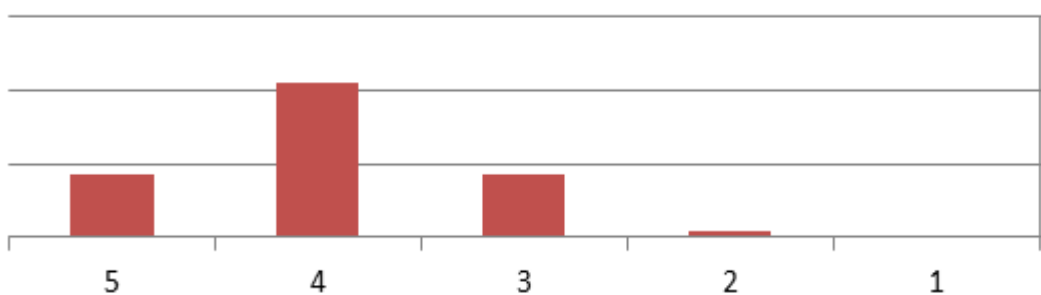
4. הרגשתי שהרובוט המתין הרבה זמן לקבלת החלקים?



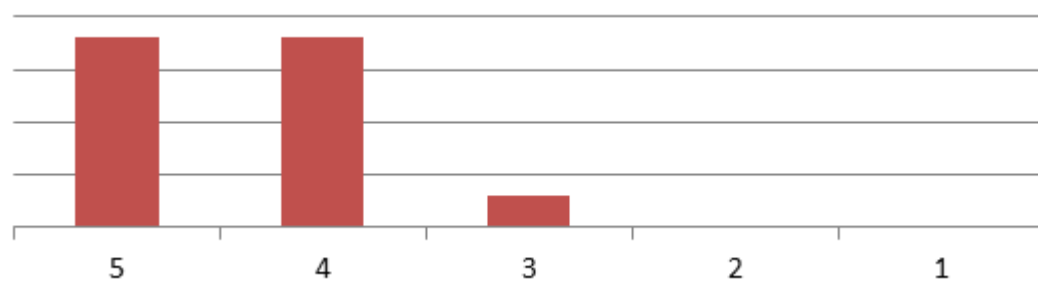
5. אני מנוסה בעבודה עם רובוטים?



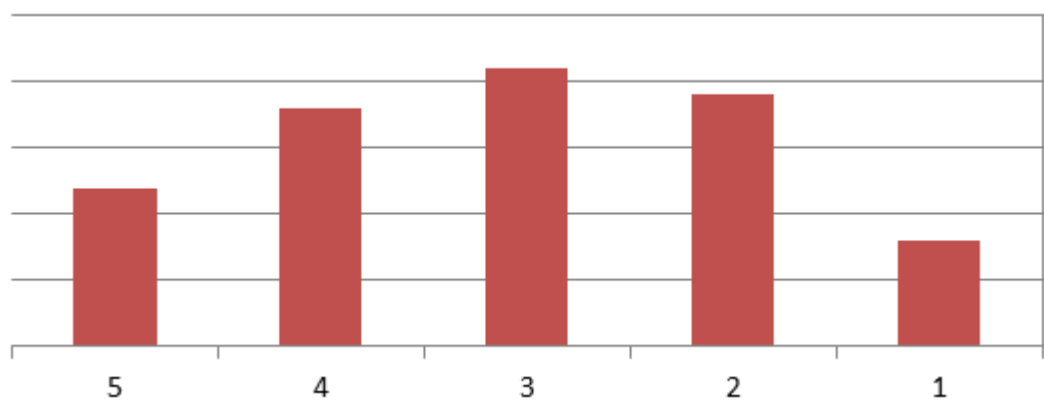
6. העברת החלקים לרובוט הפריעה לי לפתרון הבעיה?



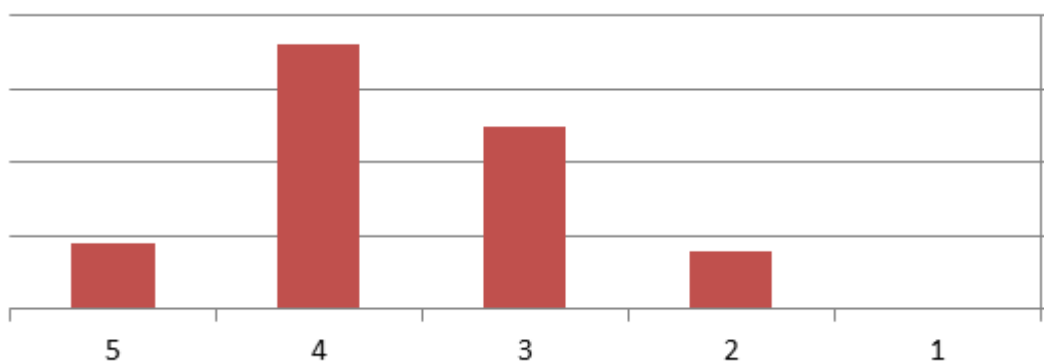
7. נתתי את כל כולי בכדי להצליח?



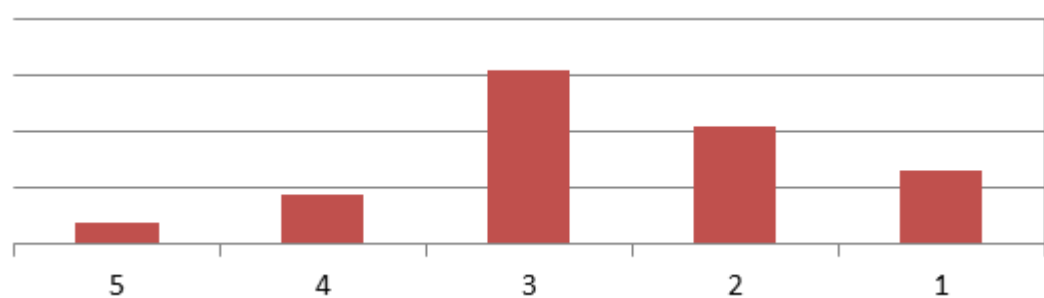
8. האם ידעת מה הרובוט מבצע בכל שלב?



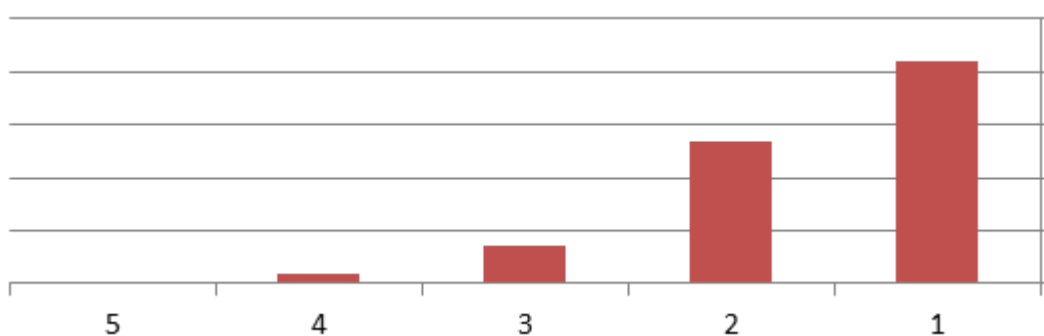
9. ככל שהזמן עבר ביצועי השתפרו?



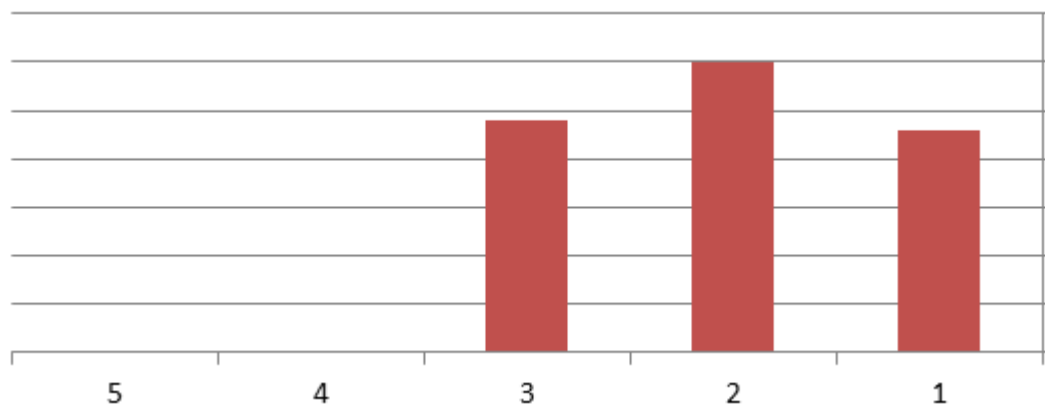
10. שיתוף הפעולה עם הרובוט היה טוב?



11. האם היה לך קשה להישאר מרוכז/ת לאורך כל הניסוי?



12. היה לי קשה לחלק את הקשב בין הגורמים השונים?



7.7 נספח ז - פרוטוקול ניסוי

מטרת המחקר כולו: בחינת אוכלוסיות ופיתוח והשוואה בין אלגוריתמים לשת"פ אדם רובוט במסגרת מחקר הנדסי במחלקה להנדסת תעשייה וניהול.

מטרתו של ניסוי זה: בחינת מדדי ביצוע בעמדת עבודה בשת"פ עם רובוט.

כלי המדידה: הניסוי יתבצע במעבדת SCORBASE באוניברסיטת בן-גוריון. במעבדה זו ממוקמת עמדת עבודה בה הניסוי יתבצע. הציווד בו יעשה שימוש הוא: שני רובוטים מסוג SCOREBOT ER4U שהינו רובוט המיועד לצורכי לימוד ומחקר ונעשה בו שימוש בקורסי האוטומציה במחלקה, מחשב אישי של אחד החוקרים, מחשב נייד השייך למעבדה, 2 בקרים, חלקי לגו, תבנית הזנה, מצלמה עבור תיעוד הניסוי.

פרוטוקול הניסוי כולל: טופס הסכמה להשתתפות בניסוי, טופס הוראות לנסיין, שאלון סוף ניסוי, טופס הסכמה למתן נקודת בונוס בקורס, טופס אישור הועדה לביצוע ניסוי במחלקה. כל הטפסים חתומים ע"י מנחת הפרוייקט. במהלך הניסוי ינטרו זמני הבטלה של הנסיין והרובוט, זמני הרכבה של תתי הרכבות וזמני הרכבה כוללים ועוד ממדי ביצוע נוספים. הניסוי יכלול כ - 70 נבדקים בכל סבב, סטודנטים במחלקה בקורס אוטומציה וילדים ממרכז חוסידמן, אשר יתבקשו לבצע פעולת הרכבה מלגו בשיתוף פעולה עם הרובוט כפי שמוסבר בטופס "הסבר לנבדק" המצורף.

תרשים זרימה לניסוי:



דוגמה למהלך ונוהל הניסוי: המשתתפים בניסוי יתנסו במערכת נסיין אחד בכל פעם (רק הנסיין ומבצעת הניסוי נמצאים בעמדה בעת הניסוי). כל נסיין יתנסה בממשק עם הרובוט כשמטרתו היא לבצע פעולת הרכבה שתוסבר בתחילת הניסוי בשיתוף פעולה עם הרובוט שמותקן בעמדה. הרובוט והנסיין עובדים בנפרד (כל אחד בחלקה שלו) עד לרגע בו האדם מגיש לרובוט חלקים קריטיים להמשך משימת ההרכבה. כשההרכבה שלמה עובדת הנסיין והרובוט מסתיימת.

7.8 נספח ח' - טופס הסכמה להשתתפות בניסוי

מחקר בנושא: מודלים לשת"פ אדם רובוט

נבדק יקר,

בבקשה קרא דף הסבר זה באשר לניסוי. במידה יש שאלות, נשמח לענות.

בבקשה וודא/י כי את/ה מבין/ה היטב את שלבי המחקר. לאחר קריאת דף זה, נא מלא/י את נספח מספר 2 – טופס הסכמה להשתתף בניסוי.

המחקר הנוכחי נערך באוניברסיטת בן-גוריון ועוסק בחקר שיתוף הפעולה בין אדם לרובוט. במסגרת המחקר תידרש לבצע פעולת הרכבה תוך כדי שיתוף פעולה עם זרוע רובוטית. משך המחקר הינו כחצי שעה. הניסוי בהתנדבות אך במידה ותשלים את הניסוי תקבל נקודת בונוס בקורס אוטומציה, הנתונים שיאספו הינם חסויים ויהיו גלויים רק לעורכי המחקר. בתום המחקר כל הטפסים ימסרו לחוקר הראשי הממונה על המחקר וישמרו באחריותו.

בכל עת ובכל שלב תוכל/י אם תרצה/י להפסיק את השתתפותך במחקר.

אם מכל סיבה שהיא הינך חש שלא בנוח, בבקשה עצור את הניסוי ועורך הניסויים ייגש אליך באופן מיידי. במקרה כזה הניסוי יפסק והנבדק ישוחרר מהמעבדה לאחר שייבדק ויצהיר באופן ברור שהוא חש בטוב.

תודה רבה על שיתוף הפעולה!

במידה ומתעוררות אצלך שאלות כלשהן לגבי הניסוי הינך רשאי לפנות לאחד האחראים.

יגאל פרץ igalperetz@gmail.com

ליאור סייפלד sayfeld@gmail.com

מבצעי הניסוי: יגאל פרץ וליאור סייפלד

טופס הסכמת הנבדק לעריכת הניסוי

אני מצהיר/ה בזאת כי אני מסכים/ה להשתתף בניסוי, כמפורט במסמך המפרט את חלקי הניסוי.

שם מלא:

ת"ז:

חתימה _____

תאריך

7.9 נספח ט' - טופס אישור הועדה לביצוע ניסויים במחלקה



Ben-Gurion University of the Negev ~ Human Subjects Research Committee

APPLICATION FOR APPROVAL TO USE HUMANS AS SUBJECTS IN EMPIRICAL STUDY

I. General

Name of Research Project: Human-robot collaboration models comparison.

To which agency is the proposal being submitted (or has been submitted): Not supported -
Department committee

Principal Investigator/s (or academic supervisor/s):

Name: Edan Yael

Department: Industrial Engineering &
Management

Academic position: Prof.

University Telephone:

Mobile Phone:

University Email: yael@bgu.ac.il

Other Email:

Name: Someshwar Roy

Department: Industrial Engineering &
Management

Academic position: P.H.D student

University Telephone:

Mobile Phone:

University Email: someshwar.roy@eu4m.eu

Other Email:

Name(s) of those conducting the research (if different from above):

Name: Ygal peretz

Department: Industrial Engineering &
Management

Academic position: Undergraduate Student

University Telephone:

Mobile Phone: 0507967532

Name: Lior Sayfeld

Department: Industrial Engineering &
Management

Academic position: Undergraduate Student

University Telephone:

Mobile Phone: 0544885518



APPLICATION FOR APPROVAL TO USE

HUMANS AS SUBJECTS IN EMPIRICAL STUDY

Email: igalperetz@gmail.com

Email: sayfeld@gmail.com

II. Consent to Participate

Are the subjects able to legally consent to participate in the research?

☒ Yes / ☐ No

If yes, proceed to 1. If no, proceed to 2 and complete a, b, c.

1. Will the subjects be asked to sign a consent form?

☒ Yes / ☐ No

If you answered no, please explain here:

2. If a subject cannot legally consent (minors, mentally incapacitated, etc.):

a. Will the subject's legal guardian be asked to sign a consent form?

☐ Yes / ☐ No

If you answered no, please explain here:

b. Will the subject be asked to give oral consent?

☐ Yes / ☐ No

c. Are the instructions appropriate to the subjects' level of understanding?

☐ Yes / ☐ No

Comments:

III. Discomfort:

3. Will the participants be subjected to physical discomfort?

☐ Yes / ☒ No

4. Will the participants be subjected to psychological discomfort?:

☐ Yes / ☒ No

If you answered yes to question 3 or 4 above, add here a detailed explanation of the circumstances

IV. Deception

5. Does the research involve deceiving the subjects?

☐ Yes / ☒ No

6. Is the decision on the part of the subject to participate in the study based on deception? (For example, if they are informed only after the event of their participation.)



APPLICATION FOR APPROVAL TO USE
HUMANS AS SUBJECTS IN EMPIRICAL STUDY

☐ Yes / ☒ No

If you answered yes to question 5 or 6 above, add here a detailed explanation why deception is necessary:

V. Debriefing of Subjects

If the study involves any discomfort or deception, it is necessary to personally debrief the subjects after the experiment in order to explain the reasons for the discomfort and/or deception. If the study does not involve any discomfort or deception, the subject should be provided, upon completion of the experiment, with a brief written description of the study's objectives.

7. Will the subjects be debriefed orally? ☐ Yes / ☒ No

8. Will the subjects be debriefed in writing? ☐ Yes / ☒ No

If you answered no to both 7 and 8 above, explain below: The study does not involve any discomfort or deception, the subject will be provided with a brief written description of the study objectives.

VI. Compensation for Participation

9. Will the subjects receive compensation for participation? ☒ Yes / ☐ No

If the compensation is monetary, give details: No.

Other type of compensation detail here: The subjects will receive 1 bonus point in automation course.

If you answered no to question 9, explain the basis for participation:

VII. Privacy:

10. Will audio and/or visual recordings be made of the subjects? ☒ Yes / ☐ No

11. If yes, are they informed of this fact in the consent form? ☒ Yes / ☐ No

12. Will the data collected contain identifying details about the subjects? ☐ Yes / ☒ No

13. If the data contains identifying details, what steps will you take to ensure the confidentiality of the information? How will the data be stored? What will be done with identifying information or recordings of the subjects at the end of the research?



APPLICATION FOR APPROVAL TO USE

HUMANS AS SUBJECTS IN EMPIRICAL STUDY

I

VIII. Withdrawal from the Study:

14. Will subjects be informed that they may withdraw

from the study at any time?

☒ Yes / ☐ No

15. Will the subjects incur any loss, monetary or other, if they withdraw from the study before its completion?

☐ Yes / ☒ No

If you answered yes to question 15, specify the loss that will be incurred and why:

IX. Research equipment

16. Does the research entail the use of equipment other than standard equipment, such as computers, video recording equipment?

☒ Yes/ ☐ No

17. If yes, does the equipment being used meet safety standard for use with human subjects? Please specify which standards.

☒ Yes/ ☐ No

The SCORBOT ER4U robot is a versatile and reliable system for educational use.



APPLICATION FOR APPROVAL TO USE
HUMANS AS SUBJECTS IN EMPIRICAL STUDY

Signatories:

Name: Ygal peretz Position: Researcher

Name: Lior sayfeld Position: Researcher

Signature: _____ Date: 23.3.14

Signature: _____ Date: 23.3.14

Title of Research Project: Human-Robot adaptive collaboration model

This section is to be filled out by a member of the Human Subjects Research Committee only

7.10 נספח י' - הזמנה להשתתפות בניסוי

הורים נכבדים שלום רב,

אנו מתכבדים להזמין את ילדכם לניסוי קצר בתחום הרובוטיקה אשר יערך באוניברסיטת בן גוריון בבאר שבע במחלקה להנדסת תעשייה וניהול (בניין 16).

מטרת המחקר כולו: פיתוח אלגוריתמים לשם "פ" אדם רובוט במסגרת עבודת תיזה הנדסית במחלקה להנדסת תעשייה וניהול.

מטרתו של ניסוי זה: השוואה בין אוכלוסיות בשיתוף פעולה עם רובוט ע"י מדדי ביצוע. הניסוי יערך במעבדת SCORBASE בבניין להנדסת תעשייה וניהול (16). במעבדה זו ממוקמת עמדת עבודה בה הניסוי יתבצע. הציוד בו יעשה שימוש הם שני רובוטים מסוג SCOREBOT ER4U שהינו רובוט המיועד לצורכי לימוד ומחקר ונעשה בו שימוש בקורסי האוטומציה במחלקה ובמוסדות לימוד בין היתר בבתי ספר יסודיים והוא בטיחותי מאוד. הניסוי יכלול כ- 30 ילדים, אשר יתבקשו לבצע פעולת הרכבה מכלי משחק יעודיים בשיתוף פעולה עם הרובוט. הניסוי מאוד מעניין ומאתגר מחשבתית, בנוסף התלמיד מתנסה בעבודה עם רובוט.

מהלך ונוהל הניסוי:

התלמיד מגיע למעבדה ועובר תדריך בטיחות קצר, לאחר מכן ממלא את פרטיו ומגיש את טופס ההסכמה להשתתפות בניסוי החתום ע"י הוריו. לאחר מכן הנבדק מתיישב אל מול הרובוטים בעמדה ומקבל תדריך מפורט על מהלך הניסוי. מיד בסיום התדריך התלמיד מתחיל בביצוע פעולות ההרכבה תוך כדי שת"פ עם הרובוטים בעמדה. זמן העבודה הוא 15 דקות ברוטו בהם הנבדק מתנסה במשימת הגיון תלת מימדית בשילוב עבודה מול רובוט שמגיש לו חלקים.

לאורך כל הניסוי ישנה השגחה מצד שני המפעילים (מסטרנטים לתואר שני במחלקה) שהכל מתנהל כשורה. כמובן שבכל שלב התלמיד רשאי להפסיק את הניסוי.

תודה מראש על ההיענות,

יגאל פרץ 0507967532

ליאור סייפלד 0544885518



אני מאשר שבני/בתי תשתתף בניסוי

שם ההורה _____

חתימת ההורה _____

7.11 נספח כ' - מדריך לפתיחת פרוייקט חדש

תוכנות להתקנה

1. Visual studio 2013
2. Scorebase
3. NI MAX

פתיחת פרוייקט

לנוחיותכם הוכנה תיקיה בשם Manual Move אשר מכילה את כל תכולת הפרוייקט כולל הקישוריות הנדרשת על מנת להפעיל את הרובוט והבקר NI MAX אין לשנות את תכולת התיקיה אך ניתן להוסיף.

כדי לפתוח את הפרוייקט יש לפתוח את הקובץ ManualMove.Sln

קבצים חשובים

בתיקיית Debug תחת תיקיית Manual Move נמצאים כל קבצי הקונפיגורציה וקבצי ה-Header כגון USB.C.Dll, NIDAQmx.lib וכו' ולכן כאשר מבצעים מעקב (Debug) או ממליצים לבצע אותו ב Debug mode ולא ב Release mode או Configuration manager.

יצירת אובייקטים

על מנת ליצור אובייקטים באפליקציה ראשית יש לפתוח את הדיאלוג של האפליקציה, דיאלוג זה נמצא תחת "מקורות" כדי לגשת למסך זה יש לפעול כך:

1. בלשוניות למעלה גש ל - view->other windows->resource view

2. פתח את הדיאלוג ב- ManualMove->ManualMove.rc->Dialog->IDD_ManualMove_Dialog

3. בדיאלוג יש בנוסף לכפתורי ההפעלה הידניים שטח ריק שעל גביו אפשר לגרור את האובייקטים

-מסמך זה נועד אך ורק לפתיחת פרוייקט חדש ויש צורך בידיעת ++C לפני התעסקות בקוד או במאפייני הפרוייקט.

-פירוט מלא של הפונקציות המגיעות עם USBC מפורטות במסמך "DESCRIPTION USB.C" אשר נמצא בתיקיה זו.

בתקליטור המצורף לנספחים אלו נמצא פרוייקט ריק בתוספת מדריכים נוספים לעבודה עם ה- VISUAL STUDIO.

7.12 נספח ל' - תוצרי פרוייקט נוספים

1. תקליטור ובו כל הקוד שנכתב ב ++C ב- visual studio, מצורף גם פרוייקט חדש ריק ומדריכי הפעלה.
2. עותקים קשיחים של השאלונים שמולאו ע"י הנבדקים.
3. עותקים קשיחים של טפסי ההשתתפות בניסוי.
4. עותקים קשיחים של פרוטוקול הניסוי ואישור של הועדה האתית.
5. תקליטור ובו כל הסרטונים שצולמו במהלך הניסויים.
6. תקליטור ובו קבצי אקסל עם כלל הנתונים שנאספו בניסויים.

Abstract

In order to implement a collaborative human-robot system several factors must be considered to facilitate smooth work between the two. The main challenge is to plan the operation of the robot so that it will assist the person and will lead to successful task performance while working together. This study focuses on evaluation of performance measures of different populations (men/woman, children/adults) when they cooperate with a robot, aiming to understand whether these measures can be used to develop a tool for classifying the human population while working with the robot so as to enable the robot to adapt to the population. A parallel study of this study (Peretz, 2017) focused on developing an adaptive algorithm for the robot operation according to the human experience. In order to give the robot the ability to adapt to the person it is working with, it is necessary to develop adaptive algorithms that can change the way the robot works according to the way the person is working.

In this study, a human-robotic system was developed and designed and its performance was examined in real time. The developed system simulates a cognitive assembly cell where a person has an assembly task that requires cognitive resources. The assembly task is performed by the human in the course of ongoing work of two robots; the person must transfer parts needed for them to continue their work. The system development included several stages. First, a specification document was created defining the system that formed the basis of the development. Then, the work station was established, along with selection of both the assembly task selected for the human and the kind of cooperation performed with the robots. Finally, an experiment was conducted and performance measures were analyzed.

The experiment include 163 industrial engineering students aged 21-29 and 44 high school students between the ages of 13 and 14. The purpose of the experiments was to examine the performance measures of populations that differ in gender (male, female) and age (children versus adults) and to understand if there are significant differences in their performance measures while executing the

collaborative task. The selected performance measures were the assembly times of each of the first 4 tasks, total idle time of the two robots and the total number of interactions with the robot during the experiments.

The results showed significant differences between women and men in the number of interactions with the robot and overall robots idle time (women performed better by 17 % and 9% on average respectively). In addition, there were differences in the assembly time of the first assembly tasks (men performed faster by 19% than women, add stats). There were also differences between adults and children in the assembly time of the first assemblies in which the children performed faster than adults (by 23% for the first assembly, 17% for the second assembly, 21% for the successful tasks).

The results obtained from the experiments served to create a database to enable the development of a statistical model, which aims to classify the collaborator to the population to which he or she belongs (adult / child, women / men). This study provides an infrastructure for further research that can use such tools to develop algorithms that will enable the robot to adapt to the human operator based on user classification. The classification model was tested using 25 subjects (16 adult students and 9 children) who underwent the experiments and presented 64% success in classifying the person to the population to which they belong (children / adults, men / women).

Parts of this study were presented at several conferences:

- Sayfeld L, Peretz Y., Someshwar R., Edan Y. (2014), "Evaluation of human-robot collaboration models for fluent operations in industrial tasks", RSS 2015 - July 17, 2015 - Sapienza University of Rome.
- Sayfeld L, Peretz Y., Someshwar R., Edan Y. (2014),"Evaluation of human-robot collaboration models for fluent operations in industrial tasks", ICR 2016 – 5th Israeli Conference of Robotics, April 2016, Herzelia

An article about this research is in advanced writing:

Sayfeld L, Peretz Y., Someshwar R., Edan Y. Performance evaluation of different populations in human-robot collaborative systems.

Early research was conducted in 2014:

Sayfeld L, Peretz Y. 2014. Testing an adaptive robot using human-robot collaboration models. Final Project. Department of Industrial Engineering and Management, BGU

This study was carried out in parallel with the study of (Peretz, 2017), which examined an adaptive algorithm for human experience in a system that integrates a human and a robot. The experiments performed in this study were done in parallel with the experiments performed by (Peretz, 2017) on the same robotic system and at the same work station, but with various tasks and elements. In addition, the parallel study dealt with the performance measures of experienced collaborators. working with a robot in comparison to those who had never experienced such work. The performance measures examined were similar to those examined in this study.

Peretz, Y. 2017. Adaptive algorithm for human experience in a human-robot handover task . M.Sc thesis. Dept. of Industrial Engineering and Management, Ben-Gurion University of the Negev, Beer Sheva, Israel.

Ben-Gurion University of the Negev
Faculty of Engineering Sciences
Department of Industrial Engineering and
Management



Human-robot collaboration: Performance measures of different populations working with a robotic system

Thesis submitted in partial fulfillment of the
requirements for the M.Sc. degree

By
Lior Sayfeld

Under the supervision of: Prof. Yael Edan

June 2017

Ben-Gurion University of the Negev
Faculty of Engineering Sciences
Department of Industrial Engineering and
Management



Human-robot collaboration: performance measures of different populations working with a robotic system

Thesis submitted in partial fulfillment of the
requirements for the M.Sc. degree

Lior Sayfeld

Under the supervision of: Prof. Yael Edan

Author: _____

Supervisor: Prof. Yael Edan _____

Chairman of Graduate Studies Committee: Dr. Yisrael Parmet _____

June 2017