

הבנה מתוך בניית מובן: ילדי גן משחקים עם כללים כדי לבנות שכל והתנהגות של רובוט

דוד מיודוסר
אוניברסיטת תל-אביב
miodu@tau.ac.il

שרונה ט' לוי
אוניברסיטת חיפה
stlevy@construct.haifa.ac.il

Making Sense by Building Sense: Kindergarten Children Play with Rules to Construct a Robot's Mind and Behavior

Sharona T. Levy
University of Haifa

David Mioduser
Tel-Aviv University

Abstract

Young children's learning through constructing adaptive robot behaviors is explored. A robotic interface "Robogan" was created. A study was conducted individually with six children along five sessions that included explanation and construction tasks of increasing difficulty. Results show that the children's understanding of the robot system gradually became more rule-based and complex. They succeeded in programming the robot within a small number of debugging turns and used specific affordances of the software to develop and debug their programs. Central transitions pertained to adopting the formal language and understanding the recurring nature of the robot's rules, and included participatory explorations, mental simulation, strategies to reducing complexity, and coordination of spatial perspectives.

Keywords: Adaptation, cybernetics, preschool education, programming, robotic systems.

תקציר

למידתם של ילדים צעירים דרך בניית התנהגויות סתגלניות של רובוט נחקרת בעבודה זו. לצורך כך, עוצב ממשק רובוטי, "רובוגן", המותאם לפתרון בעיות של ילדים צעירים. נערך מחקר עם שישה ילדים באופן יחידני לאורך חמישה מפגשים, שכללו משימות הסבר ומשימות בנייה ברמת מורכבות עולה. התוצאות מראות את קידום הבנת הילדים, כאשר זו נעשתה בהדרגה יותר מבוססת-כללים ומורכבת. הם הצליחו בתכנות הרובוט במספר קטן של סבבים והשתמשו ביתרונות ייחודיים של הממשק לפיתוח ושיפור תכניותיהם. מעברים מרכזיים קשורים באימוץ השפה הפורמאלית והבנת טבעם התמידי של כללי הרובוט וכללו חקירה שיתופית של הילד והרובוט, סימולציה מנטאלית, אסטרטגיות לצמצום מורכבות הבעיה ותיאום בין פרספקטיבות מרחביות.

מילות מפתח: הסתגלות, קיברנטיקה, חינוך קדם-יסודי, תכנות, מערכות רובוטיות.

מבוא

מוקד מאמר זה בלמידה בקרב ילדים צעירים כאשר הם מעצבים ומתכנתים התנהגויות של רובוט, המצוי ביחסי גומלין עם סביבתו, כמו הליכה לאורך שביל פתלתל או הימנעות ממחסומים. רובוט מסוג זה הינו "יצור" כלאיים בין העולם החי המאופיין בכוונות ויכולת החלטה לבין עצמים דוממים ללא תבונה – הבחנה זו הולכת ומיטשטשת עם התפתחותן של טכנולוגיות אינטליגנטיות המשולבות

בסביבתנו, בגופנו ובחשיבתנו. ילדים צעירים מבינים את התנהגותו של רובוט כמשלבת אלמנטים של "דומם" ושל "חיי" (Levy & Mioduser, 2008). יתרה מזאת, כאשר התנהגות הרובוט אינה מורכבת מדי הם מתארים אותה במונחים של כללים אל-זמניים (Mioduser, Levy & Talis, in press), בניגוד למתואר בספרות ההתפתחותית (Flavell et al, 1993). בהתבסס על כך, הערכנו שהרובוט יהווה אובייקט מרתק ואתגר אינטלקטואלי, שיספק כר לפיתוח יכולות חשיבה ולתפיסת מושגים מורכבים כגון מערכת, תפקוד, הסתגלות וקבלת-החלטות.

יתרונותיה של הבניה ללמידה מתוארת בספרות הגישה הקונסטרוקציוניסטית (Papert, 1983), החינוך הטכנולוגי ואף החינוך המדעי (Fortus et al., 2005; Kolodner et al., 2003). למרות העיסוק המרובה בבנייה וחומרי מניפולציה בגיל הרך (Brosterman, 1997), מעטים המחקרים המתייחסים לתרומתה של בנייה ללמידה של נושאים מדעיים וטכנולוגיים (Hughes, 1999).

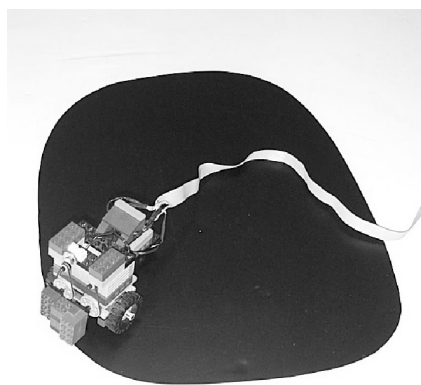
הילדים במחקר זה בנו "שכל" של רובוט הפועל ביחסי גומלין עם סביבתו. יתרה מזאת, הם עצמם באו במגע עם הרובוט לאחר הפעלתו וחקרו את פעולותיו במרחב הפיזי. על רקע זה, אנו בוחנים האם וכיצד מתפתחת הבנתם של ילדים צעירים את התנהגותם האדפטיבית של רובוטים.

שאלות המחקר

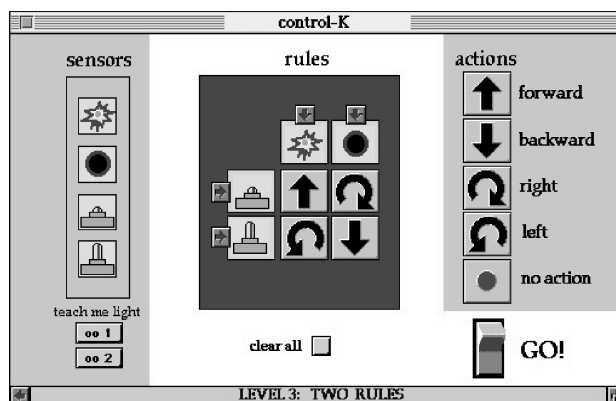
1. באיזו מידה מצליחים ילדים צעירים להתמודד עם אתגר בניית התנהגות הרובוט?
2. כיצד מבינים ילדים צעירים את ההתנהגות שיצרו?
3. מה מאפיין את תהליך הלמידה של הילדים בעת התקדמותם לקראת הצלחה במשימה?

רובוט: סביבה לבניית התנהגות

הסביבה שעיצבנו, "רובוטגן" (Talis, Mioduser, & Levy, 1998), מאפשרת בנייה של "מוח" לרובוט. הסביבה כוללת ממשק תכנות אייקוני (איור 1), רובוט פיזי (הבנוי מחלקי לגו) ומרחבים גמישים בהם הרובוט מנווט (איור 2). הממשק מאפשר הגדרה של כללי בקרה בצורה פשוטה ואינטואיטיבית וברמות מורכבות גמישות. כל ריבוע מציג פעולה שהרובוט יבצע כאשר התנאים מתקיימים. ייצוג המטריצה, מבנה של קו-וריאציה, מאפשר התאמה בין תנאים לבין פעולה, וכן תיאום בין הכללים שני מאפיינים בייצוג מזמנים אסטרטגיות מתקדמות בפתרון בעיות: (1) ייצוג הכללים כאקוויוולנטיים ועצמאיים בריבועים שווי-גודל – ניתן לתכנת כל כלל בנפרד ולהמיר כלל בכלל, כאשר הייצוג מקל על דקומפוזיציה של מרחב הבעיה (2) הריבועים יכולים להיות ריקים – ובפתרון בעיה בעלת מורכבות גבוהה, הריבועים הריקים משמשים שומרי-מקום ומאפשרים פתרון חלקי המתפתח באופן מודולארי.



איור 2. הרובוט, "שומר האי"



איור 1. ממשק "רובוטגן"

השיטה

מדגם

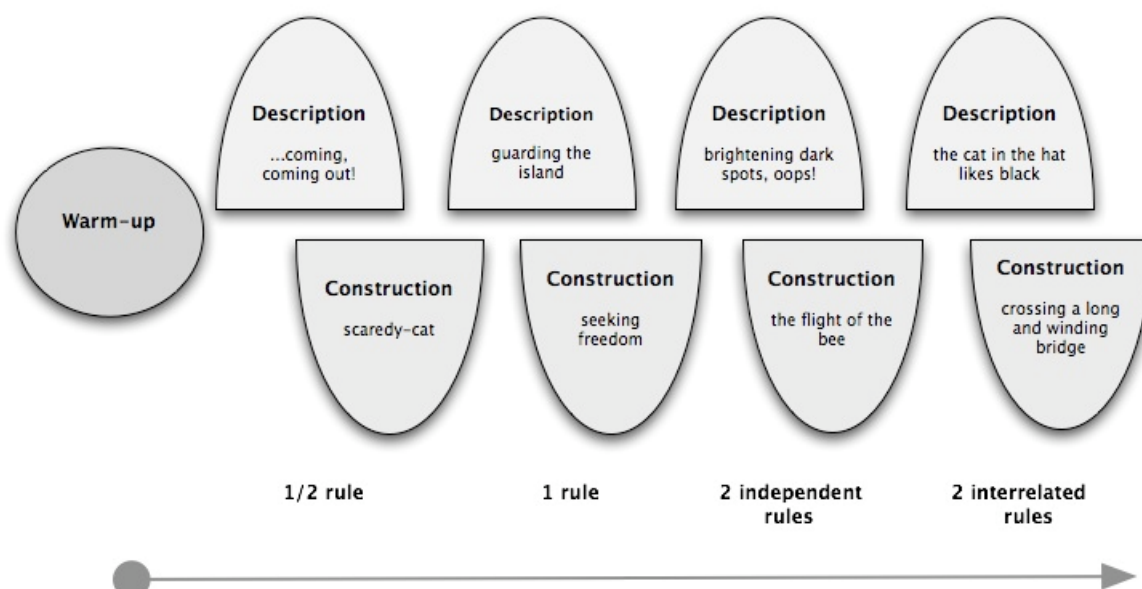
שישה ילדים השתתפו במחקר, שלושה בנים ושלוש בנות, שנבחרו באופן אקראי מתוך 60 ילדים בבית-ספר עירוני במרכז. ממוצע גילאים הילדים היה 5.10 (SD=0.3).

כלים

לצורך המחקר פותחו סדרת משימות תיאור וסדרת משימות בנייה. במשימת תיאור, הילד מתאר ומסביר התנהגות רובוט שהוכנה מראש. במשימת בנייה, מתכנת את הרובוט לפי מטרה. המשימות עוצבו כמדרג של תצורות כלל (rule configuration), בסדר קושי עולה (תצורת כלל מוגדרת על פי מספר צמדי "תנאי-פעולה"). במאמר זה, אנו מתמקדים במשימות הבניה.

הליך

המחקר התקיים לאורך חמישה מפגשים שבועיים בני 30-45 דקות (איור 3). הילדים פעלו ורואינו באופן יחידני. תמיכה של מבוגר ניתנה באחת משתי צורות: כאשר ילד לא הצליח להמשיך באופן עצמאי במשימה, ניתנה תמיכה "קלה" שהתבטאה בשאלה המבקשת המללה של התנהגות הרובוט או עידוד לחקירה נוספת. אם תמיכה קלה לא קידמה את הילד בפתרון, שימשה תמיכה "כבדה" שעזרה לילד לפרק את התנהגות הרובוט למרכיביה. המפגשים צולמו בווידיאו.



איור 3. הליך המחקר

מקורות מידע

בזמן בניית התנהגותו של הרובוט, הילד מיעטו לדבר. העדפנו לא להפריע לזרימת הפעילות על-מנת ללמוד על יכולותיהם להתמודד עם משימות הבניה בעצמם. לכן, גוף הנתונים העיקרי משלב: (1) התכניות שבנו בכל שלב; (2) תשובותיהם לשאלות בתום הבנייה בהן הסבירו את שבנו; (3) סרטי וידיאו של מפגשי הבניה. שני שופטים קודדו 20% מהתמלילים; מהימנות בין-שופטים הייתה 89%.

תוצאות

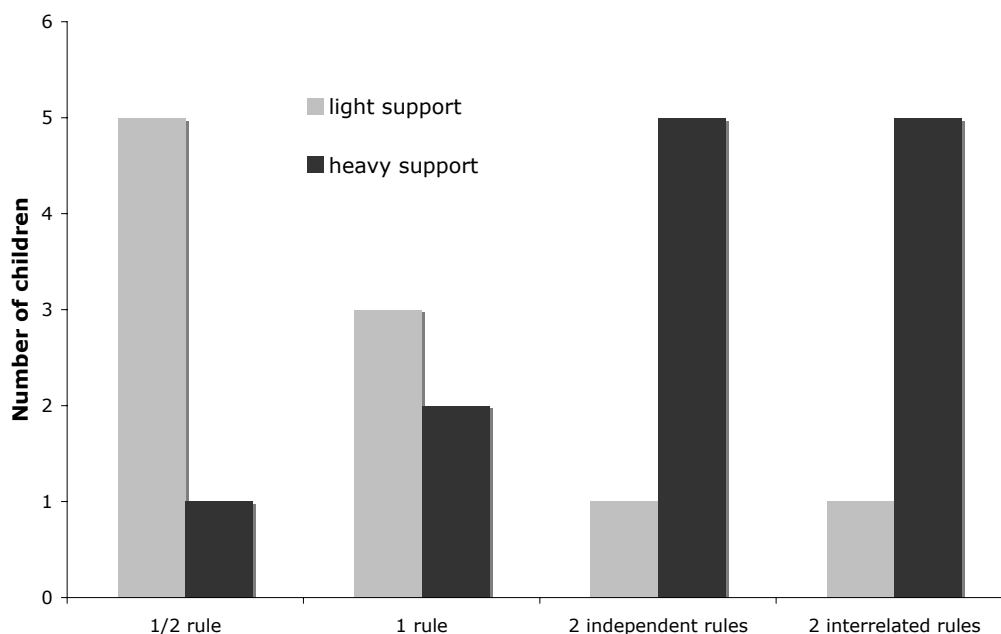
שאלת מחקר 1: באיזו מידה מצליחים ילדים צעירים להתמודד עם אתגר בניית התנהגות הרובוט?

הצלחה: הילדים הצליחו בתכנות הרובוט ב-23 מתוך 24 מפגשים. כמדד לקושי המשימות נבחן מספר הסבבים להצלחה. סבב מוגדר כתכנית שנבחנה במציאות השונה מקודמותיה. ניתן לראות כי מספר הסבבים להצלחה קטן יחסית ועולה עם מורכבות המשימה (טבלה 1).

תמיכת מבוגר : תמיכת המבוגר עלתה עם מורכבות המשימה והייתה בעיקר "כבדה" עבור משימות ששילבו ארבע צמדי תנאי-פעולה (איור 4).

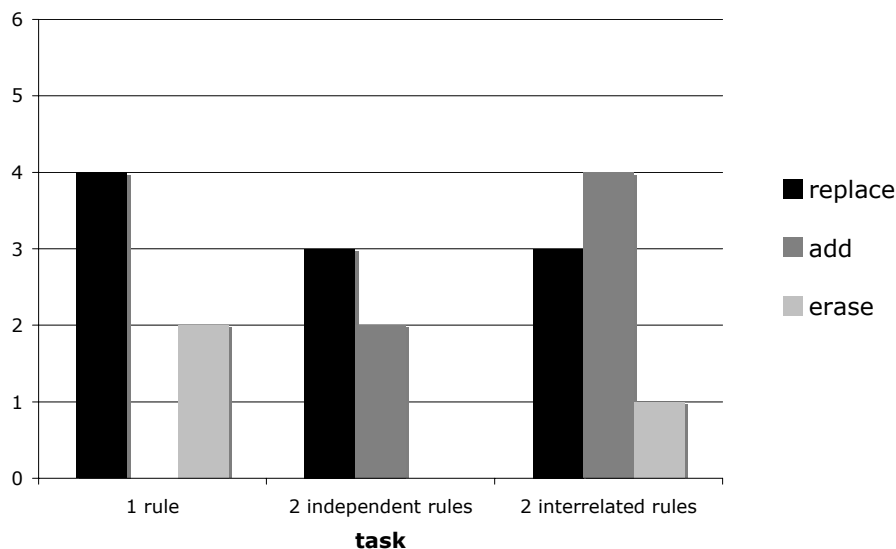
טבלה 1. סבבי תכנות עד להצלחה

Task	Cycles to success		
	<i>M</i>	<i>SD</i>	Range
Half rule	1.2	0.4	1-2
One rule	2.3	1.0	1-4
Two independent rules	3.0	2.3	1-6
Two interrelated rules	3.0	0.6	2-4



איור 4. תמיכת מבוגר

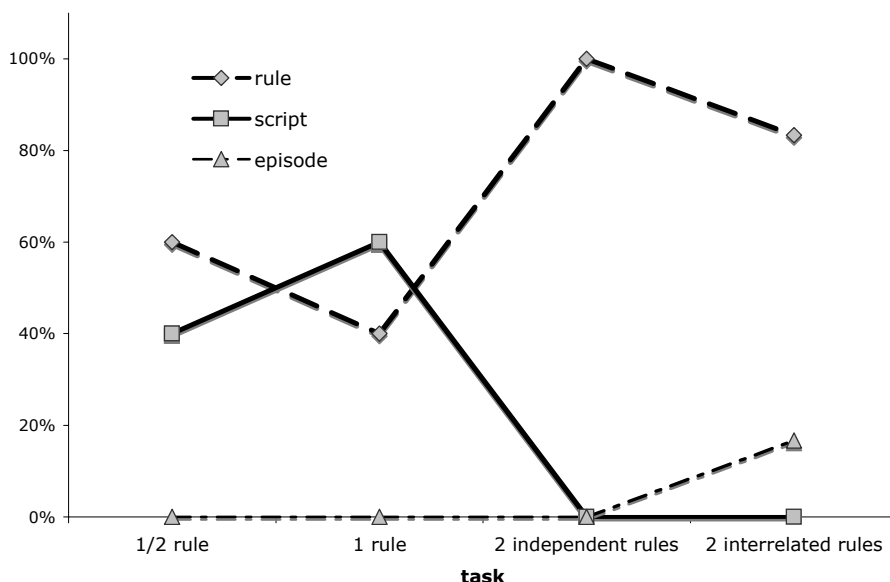
תמיכת ייצוג הממשק: הממשק עוצב כדי לאפשר דקומפוזיציה של הבעיה ובנייה מדורגת של פתרון. כדי להבין באיזו מידה ממשק זה אכן מעודד אסטרטגיות אלו, נבחנו התכניות של הילדים בכל מפגש ואופיינו המעברים בין תכנית לתכנית: *מחיקה* של התכנית הקיימת והתחלה מחדש, *החלפה* של חלק מן הכללים (*דקומפוזיציה*), *הוספה* של כלל לסט (בנייה מדורגת). מתוך 18 מפגשים, 10 כללו לפחות החלפה אחת (56%), ששה כללו הוספה (33%) ובשלושה מפגשים התקיימה מחיקה מוחלטת של התכנית והחלפתה בחדשה (7%). לאורך המפגשים, ניתן לראות אחידות בהחלפה, ירידה במחיקה ועליה בהוספה (איור 5). כך, ניתן לראות שהילדים ניצלו את תכונות הייצוג הממוחשב לצורך פירוק הבעיה והתמודדות עם מורכבות גדולה יותר על-ידי בנייה מודולארית.



איור 5. מאפייני מעבר בין תכניות עוקבות

שאלת מחקר 2: כיצד מבינים ילדים צעירים את ההתנהגות שיצרו?

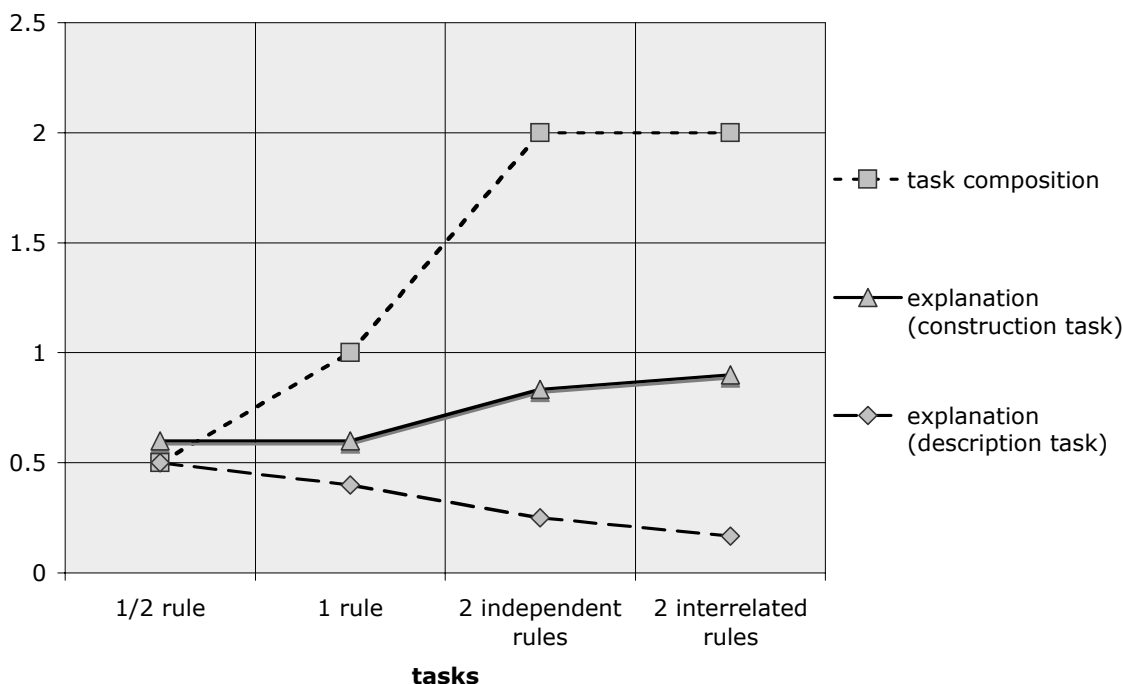
תבניות תיאור. הסברי הילדים (ביטוייהם הספונטניים, ללא תמיכת מבוגר) קודדו כאפיזודות (מהלך אירועים בזמן ללא חזרות), תסריטים (מהלך אירועים בזמן עם דגמים חוזרים) וכללים (תיאורים אל-זמניים מסוג "תנאי-פעולה"). במשימות המוקדמות והפשוטות יותר, חלק מן הילדים מתארים את התנהגות הרובוט כתסריט וחלק ככללים (איור 6). עם העלייה במורכבות המשימה והניסיון בתכנות הרובוט, רוב הילדים מתארים את הרובוט באמצעות כללים, תבנית מופשטת יותר.



איור 6. תבניות התיאור בהסברי הילדים

מורכבות החשיבה בכללים. לאפיון מורכבות חשיבתם של הילדים, שימש מספר הכללים בהסבריהם. באיור 7 מתוארת השוואה בין מורכבות המשימה, מורכבות הסבריהם להתנהגות רובוט נתונה (שלא בנו), והסבריהם לאחר משימת הבנייה בה הצליחו. ניתן לראות שככל שהמשימות מורכבות יותר, כך עולה מספר הכללים בתיאורי הילדים לאחר בנייה עד לגבול של כלל אחד. בתיאוריהם של התנהגות רובוט שלא בנו, ניתן לראות פער הולך וגדל עם מורכבות המשימה.

הפער בין שני אלה משקף את תרומתה של הבנייה. הפער בין שביצעו בפועל לבין שיכולים היו לתאר עומד אף הוא על כלל שלם.



איור 7. מורכבות הסברי הילדים

שאלת מחקר 3: מה מאפיין את תהליך הלמידה של הילדים במעברים קריטיים לקראת ההצלחה במשימה?

לאור הצלחתם של הילדים בבניית התנהגות הרובוט, האסטרטגיות המתקדמות ביחס לגילם ששימשו אותם בשיפור תכניותיהם, יחד עם העלייה במופשטות ומורכבות הסבריהם, נשאל: כיצד הם פורצים את המגבלות ההתפתחותיות המדווחות בספרות? כיצד הם מגשרים על הפער בין שהם יכולים להסביר לבין שהם מצליחים לבצע?

חקירה משתתפת. יתרון ייחודי של הרובוט הפיזי ביחס לתכנות (שכולו בתוך המחשב) הוא האפשרות להצטרף לרובוט בתוך סביבתו ולמעשה להפוך לחלק מן המערכת, תוך שימוש בגוף לפעולה ולחקירה. לדוגמה, הילדים חסמו את דרכו של הרובוט בידיהם והרגישו כיצד הוא מסתובב, או האירו בפנס על חיישן האור של הרובוט וראו אותו "בורח". הילדים "צוללים אל תוך" המערכת ומהווים חלק ממנה אך גם "צועדים אחור" ומתבוננים בה ממבט של צופה חיצוני (Ackermann, 1996). מעברים דו-סטריים אלו מאפשרים קישור בין האינטראקציות המקומיות של הרובוט לבין ההתנהגות הכוללת.

בנייה מבוססת-ציפיות. בחלק מן המפגשים הילדים נתנו ביטוי לציפיותיהם בדבר התנהגות הרובוט טרם הפעלתו, עדות לבנייה מנטאלית של ההתנהגות. לדוגמה, נוגה תכנתה את הרובוט כדי שיברח מאור. עוד לפני הפעלת הרובוט, היא מתארת: "... אז קודם הוא מסתובב, והוא לא ירצה לראות אל האור כל הזמן... והוא תמיד יסתכל לצד שיש לו חושך". עושר התיאור עומד בניגוד לכלל הפשוט עימו תכנתה את הרובוט: "אם-אור-אז-הסתובב-לימין". הגשר בין השנים מבוסס על יכולתה לדמייין את הרובוט נע במרחב – הרצה מנטאלית של התכנית.

אסטרטגיות לצמצום מורכבות. נמצאו שני אסטרטגיות ששימשו את הילדים לצמצום כמות המידע במערכת – גיזום ואיחוי.

אסטרטגיית גיזום מתמקדת בחלק מן הכללים ומתעלמת מן האחרים. מתוך 18 מפגשים, בשבעה נמצאו אירועי גיזום אצל חמישה מתוך ששה הילדים. לדוגמה, תומר מנסה לתכנת את הרובוט כך שישתובב במגרש עם מחסומים בלי להיתקע. הוא אומר: "הוא ינסה לברוח מכל אלה [המחסומים]". הוא מתמקד באירוע בעל בולטות, התנגשות במחסום, ומתעלם מהתנהגות הרובוט בשדה החופשי.

אסטרטגיית איחוי מכילה את מרכיבי ההתנהגות השונים של הרובוט, אך מצמצמת את הרזולוציה שלה. קבוצה של כללים מאוחדת לכלל אחד. נמצאו חמישה אירועי "איחוי". לדוגמה, מלי תכנתה את הרובוט כך שיעבור על-פני גשר (שחור) מתפתל. היא השתמשה בארבעה צמדי תנאי-פעולה, המבוססים על מידע הנקלט מזוג חיישנים בקדמת הרובוט: (שחור-שחור) ישר; (לבן-שחור) שמאלה; (שחור-לבן) ימינה; (לבן-לבן) עצור. היא מתארת: "כשהוא על הלבן הוא הולך לשחור, וכשהוא על השחור הוא ממשיך ללכת". שלושת הכללים שתכנתה כדי להחזיר את הרובוט אל הגשר מאוחדים ככלל אחד: "כשהוא על הלבן הוא חוזר לשחור".

מעבר משפה יומיומית לשפה פורמאלית. לילדים הוצגה שפה חדשה לבניית התנהגות הרובוט, המבוססת על פעולות ניווט ומידע מהחיישנים (תנאים), אשר חייב מעבר מתיאור התנהגות הרובוט בשפה יומיומית לתיאור פורמאלי. לדוגמה: המונח "להסתובב" להסתובב בשפת הרובוט, משמעו סיבוב על ציר. אצל רוב הילדים "להסתובב" משמעו לנוע אנה אנה במרחב. בעת תכנות הרובוט כדי שינוע במגרש וישתחרר ממחסומים, ארבעה מהילדים תכנתו את הרובוט כך ש"ישתובב" כאשר אינו נוגע במחסום. בפועל, הרובוט מסתובב כמו סביבון במקומו. השינוי העוקב בתכניותיהם היה כרוך באימוץ השפה החדשה.

מאירועים בודדים לכללים תמידיים. אחד הקשיים בסימולציה מנטאלית של התנהגויות מכללים קשורה במעבר מתפיסת הכלל כאירוע בודד לאפשרות תמידית. לדוגמה, בתכנות הרובוט לעבור במגרש מכשולים, ארבעה מששת מהילדים תכנתו את הרובוט שיעד לאחור לאחר התנגשות (לחיצת חיישן המגע). כאירוע בודד, אסטרטגיה זו עובדת. אך אופיו התמידי של הכלל מביא לכך שברגע שהרובוט משתחרר (חיישן המגע אינו לחוץ) הוא נע ישר ומתנגש שוב במחסום וחוזר חלילה באופן תמידי. שכלול התכנית כרוך במעבר לתפיסת הכללים כתמידיים ולא כאירועים בודדים, שינוי משמעותי בהבנת המערכת.

תיאום בין פרספקטיבות במרחב. כדי לבנות את התנהגות הרובוט, צריך המתכנת לראות את העולם מזווית הרובוט, שפעולותיו מתקיימות במערכת ייחוס פרטית, הנעה עם תנועתו. אך גם מנקודת-מבט גלובלית כדי לעצב את ההתנהגות בסביבה. תיאום זה מאתגר את חשיבת הילדים ובחלק מן המקרים ניתן לצפות בהם "משחקים רובוט" כדי להבין את שיקוליו. הם נכנסים למגרש ומבצעים את פעולות הרובוט, כדי לפתור ולקדם את תכניותיהם (איור 8). מעברים אלה בין נקודת מבט אישית לבין נקודת מבט כללית מרכזיים בהבנת המערכת.



איור 8. נקיטת מבט הרובוט

דיון

מחקר זה עוסק בלמידת ילדי גן תוך כדי בנייה של התנהגויות מסתגלות של רובוט. בעקבות הבניה ולאורכה, נמצא שהילדים הבינו את המערכת כמבוססת-כללים, הישג משמעותי בגיל זה. יתרה מזאת, יכולתם להתמודד עם מורכבות מערכת הכללים עולה עם מורכבות המשימה ועם הניסיון, אך מוגבלת בכלל שלם, שני צמדי כלל-פעולה. התחכום בהבנה זו של הילדים פורצת את גבולות הציפיות המתוארות בספרות ההתפתחותית.

בבחינת התמודדות של הילדים עם המשימות ואינטראקציה בין זו לבין תמיכות של מבוגר ושל סביבת הבניה עצמה, נמצא כי הילדים הצליחו בתכנות הרובוט תוך מספר קטן של סבבים. נדרשה תמיכה רבה יותר של מבוגר במשימות מורכבות יותר (ארבעה צמדי תנאי-פעולה), תמיכה שעזרה במיקוד וקשב למאפיינים מסוימים בפעולות הרובוט או מאפייני הסביבה. ממשק הרובוט תמך בילדים בתהליכי פירוק המשימה, כאשר אסטרטגיות השיפור של הילדים כללו צעדה חלקית אחורה (backtracking) שאינה אופיינית בפתרון-בעיות של ילדים צעירים ובנייה מודולארית במשימות המורכבות.

התמודדות הילדים עם מורכבות משימה שגדולה מזו שהם יכולים להמשיג לבדם נתמכה על-ידי הממשק שאפשר לילדים לחשוב ולבנות את ההתנהגות באופן מודולארי. מציאנו שגם ללא הממשק, הילדים נקטו באסטרטגיות דומות: הם התעלמו מחלקים של הבעיה (אסטרטגיית גיזום) ואיחדו מספר כללים לכלל אחד (אסטרטגיית איחוי) כדי לצמצם את הבעיה למימדים עימה הם מסוגלים להתמודד באופן מאוחד. מעברים מרכזיים בהבנת המערכת היו כרוכים במעבר משפה יומיומית לשפה פורמאלית ומהבנה של הכללים כאירוע בודד להבנתם כמתקיימים תמידית.

לסיכום, תוצאות מחקר זה תומכות בהצעה בה פתחנו, כי סביבת פעילות, משחק ולמידה זו עבור ילדי גן מקדמת את חשיבתם תוך התמודדות עם מערכת מורכבת. מן הצד המעשי, עמדנו על סוגי התמיכה והמעברים הקריטיים בחשיבת הילדים הנדרשים כדי לאפשר קידום זה.

מקורות

- Ackermann, E. (1996). Perspective-taking and object construction: twokeys to learning. In Y. Kafai & M. Resnick (Eds.), *Constructionism in practice: Designing, thinking and learning in a digital world* (pp. 25-35). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Brosterman, N. (1997). *Inventing kindergarten*. NY: Harry N. Adams Inc.
- Flavell, J. H., Miller, P. H. & Miller, S. A., (1993). *Cognitive development* (3rd Ed.). NJ: Prentice Hall.
- Fortus, D., Krajcik, J., Dersheimer, R. C., Marx, R. W., & Mamlok-Naaman, R. (2005). Design-based science and real-world problem-solving. *International Journal of Science Education*, 27(7), 855-879.
- Hughes, F. P. (1999). *Children, play, and development*. Boston, MA: Allyn and Bacon.
- Kolodner, J. L., Camp, P. J., Crismond, D., Fasse, B., Gray, J., Holbrook, J., et al. (2003). Problem-based learning meets case-based reasoning in the middle-school science classroom: Putting learning by design(tm) into practice. *Journal of the Learning Sciences*, 12(4), 495-547.
- Levy, S. T., & Mioduser, D. (2008). Does it "want" or "was it "programmed to..."? Kindergarten children's explanations of an autonomous robot's adaptive functioning. *International Journal of Technology and Design Education*, 18(4), 337-359.
- Mioduser, D., Levy, S. T., & Talis, V. (in press). Episodes to scripts to rules: concrete-abstractions in kindergarten children's explanations of a robot's behavior. *International Journal of Technology and Design Education*.
- Papert, S. (1980, 1993). *Mindstorms: Children, computers, and powerful ideas*. (1st and 2nd editions). Cambridge, MA: Basic Books.
- Talis, V., Mioduser, D., & Levy, S. T. (1998). *RoboGan. A software environment for programming robots*. Tel-Aviv University.