

הכללות-מוחשיות בפענוח התנהגות רובוט בקרב ילדי גן¹

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

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

Concrete-Abstractions in Deciphering a Robot's Behavior among Preschool Children

Sharona T. Levy
University of Haifa

David Mioduser
Tel-Aviv University

Abstract

This study explores young children's evolving understanding of an adapting robot's behaviors, as they construct such behaviors with rules. It was conducted individually with six children along five sessions that included explanation and construction tasks of increasing difficulty. A robotic control interface was developed. To capture the children's changing conceptions of the robot's behavior, we employed a framework that highlights increasing generality in moving from *episodes to scripts to rules*. The number of rules the children could reason with was explored, as well as the impact of an adult's support on this reasoning. The results are discussed in terms of phases in deciphering emergent behaviors, concrete-abstractions that support this process of learning, and with regard to educational implications of incorporating robotic learning environments in early childhood classes.

Keywords: Adaptation, Cybernetics, Preschool education, Programming, Robotic systems.

תקציר

מחקר זה בוחן את הבנתם המתפתחת של ילדים צעירים לגבי התנהגויותיו המסתגלות של רובוט במהלך סדרת מפגשים בהם תכנתו התנהגויות אלה באמצעות כללים. המחקר נערך עם שישה ילדים באופן יחידני לאורך חמישה מפגשים, שכללו משימות הסבר ומשימות בנייה ברמת מורכבות עולה. לצורך המחקר, פותח ממשק רובוטי. על-מנת ללכוד את תפיסותיהם המשתנות של הילדים, שימשה מסגרת מושגית המבליטה את ההבדלים בכלליות ובמופשטות שבין *אפיזודה, תרחיש (script) וכלל*. כמו-כן נבחנו מורכבות תיאורי הכללים חשיבתם של הילדים ומקום תמיכתו של מבוגר בתהליכי חשיבה אלה. התוצאות נידונות בהתייחס לשלבים בתהליך פענוח התנהגויות אמרגינטיות, הכללות-מוחשיות התומכות בתהליך זה, וביחס להשלכות החינוכיות של שילוב סביבות למידה רובוטיות בחינוך הקדם-יסודי.

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

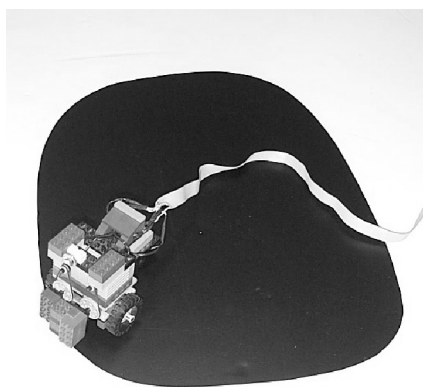
¹ מבוסס בחלקו על המאמר:

Levy, S.T., Mioduser, D., & Talis, V. (in press). Episodes to script to rules: Concrete-abstractions in kindergarten children's explanations of a robot's behavior. *International Journal of Technology and Design Education*.

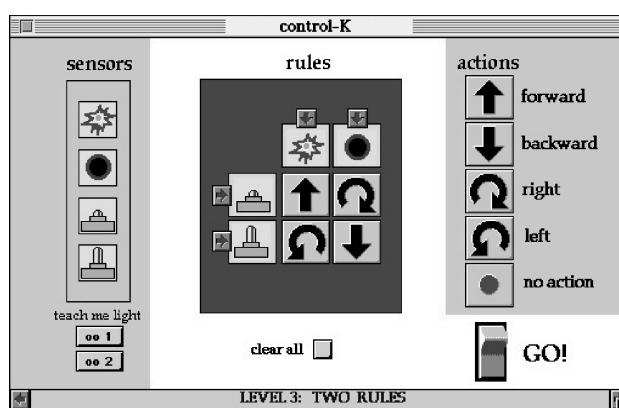
מבוא

מאמר זה עוסק בדרך שבה אנו מפענחים ומסבירים לעצמנו את אופן הפעולה של "יצורים" מלאכותיים אינטליגנטיים. יצור אינטליגנטי מוכר הוא המחשב עימו אנו משתפים פעולה ולפעמים מתנגחים; אך, למעשה כל מערכת מבוקרת, כמו הקומקום החשמלי, ש-"מחליט לבד" מתי לכבות את עצמו, מכילים יסודות של קבלת החלטות אוטונומית, מאפיין מרכזי של יצור תבוני.

כדי לאפשר את למידתם של ילדים צעירים אודות מושגים כמו תפקוד, מערכת, קבלת-החלטות והסתגלות של יצורים מלאכותיים, עיצבנו סביבת למידה, המאפשרת בנייה של "מוח" לרובוט, "רובוגן" (Talis, Mioduser, & Levy, 1998). הסביבה כוללת ממשק תכנות אייקוני (איור 1), רובוט פיזי (הבנוי מחלקי לגו) ו"מרחבים" גמישים בהם הרובוט מנווט. הממשק האייקוני מאפשר הגדרה של כללי בקרה בצורה פשוטה ואינטואיטיבית וברמות מורכבות גמישות. כל ריבוע מציג פעולה שהרובוט יבצע כאשר התנאים (שורה ועמודה) מתקיימים.



איור 2. הרובוט, "שומר האי"



איור 1. ממשק "רובוגן"

הסביבה פותחה כדי לאפשר ולבחון אפשרויות חדשות לפיתוח אינטלקטואלי בקרב ילדים צעירים: פיתוח חשיבה א-זמנית אודות התנהגויות. בדור הקודם של פיתוח ומחקר בתחום זה בגיל הרך התמקדו בחשיבה ממוקדת-רצף, תיאור סדרה של אירועים בזמן. סביבת ה"רובוגן" תומכת בפיתוח חשיבה ממוקדת-כללים, ומאפשרת לרובוט התנהגויות מסתגלות. כדוגמה, נתאר רובוט שלו חיישן בקצה אפו, הפונה כלפי מטה (איור 2). החיישן מבחין בין צבעים כהים ובהירים, במקרה זה אי כהה על רקע בהיר. אם נלמד את הרובוט: "על שחור, סע ישר; על לבן, הסתובב לימין" ונפעיל את הרובוט, נצפה בהתנהגות הבאה: בתחילה, הרובוט נע בקו ישר; מרגע שאפו עבר את קצה האי, התנהגותו משתנה; הוא עוקב בהתמדה אחר קו-המתאר של האי. מתוך שני כללים חסרי משמעות כשלעצמם, נולדה התנהגות צרופה וברורה הניתנת לניסוח במונחי מטרות ואולי אף האנשה - "שומר האי".

מחקר זה התקיים במהלך פעילויות ושיחות עם ילדי גן, שתכנתו את הרובוט. מוקד המאמר הוא בדרך שבה הם פענחו את כללי הפעולה של הרובוט.

מחקר זה הוא ראשון בניסיונו להבין כיצד ילדים צעירים מבינים ופועלים עם יצורים אינטליגנטיים מלאכותיים. נשאלת השאלה האם ילדים צעירים יכולים להתאים בין מבני הייצוג המרכיבים את מוח הרובוט לבין התנהגויותיו? ואם כן, הכיצד?

מבני ייצוגי ידע שונים משמשים להגדרת התנהגותו של רובוט. ייצוג הידע הפחות כללי הוא אפיזודה, ייצוג של רצף אירועים חד-פעמי (Flavell et al, 1993). תדמיש (script) הוא כללי יותר, סדרה של אירועים המאורגנים בזמן ובמרחב סביב רוטינה חוזרת עם מטרה (Schank & Abelson, 1977). כללים הם ייצוג הידע המופשט ביותר מבין השלושה ומנוסחים של תנאים ופעולות "אם... אז...". מחקרים מראים שבייצוגי אירועים ילדים צעירים משתמשים בעיקר בתרחישים (Flavell et al., 1993). ספרות המחקר אודות ידע אירועים אינה עוסקת בכללים.

כדי להבין כיצד ילדים מפיקים כללים מתוך מצב או אירוע נתון, פנינו לשאלה: מה ידוע לגבי הסקה סיבתית של ילדים צעירים מתוך רצף של אירועים כמו במקרה של רובוט הנע בסביבה? שני קווי מחקר מיידיים אותנו לגבי יכולתם של ילדים צעירים להפיק כללים מתוך רצף אירועים. האחד הוא תחום ההסקה (למשל, Sobel et al, 2004) והאחר הוא חשיבה מדעית (למשל: Zimmerman, 2000). שני קווים אלה מובילים למסקנות הפוכות בדבר יכולותיהם של הילדים בזיהוי כללים מתוך התנהגות הרובוט. ספרות אודות חשיבה מדעית מציעה כי הילדים לא יצליחו במשימת הפענוח, שכן כשלים רבים מלווים את ההסקה הסיבתית, כגון: ניהול ניסויים שקשה לפרש, וקושי בהסקת מסקנות לא-סבירות (Klahr et al., 1993; Schauble, 1990; Kuhn, 1989). לעומתם, מחקרים בתחום של ההסקה הסיבתית מצאו שילדים צעירים יכולים לזהות דגמים בנתונים נצפים ולהשתמש בהם כדי לנבא ולתכנן.

ההבחנה המדגישה את ההבדלים **בכלליות** שבין אפיזודות, תרחישים וכללים שימשה מסגרת למחקר זה. בנוסף, רצינו לבחון את התמודדותם של הילדים עם מורכבות המטלות, על-ידי בדיקת מספר הכללים שהם יכולים להפיק ממצב נתון, עם וללא תמיכה של מבוגר, שכן בגיל זה צפויה יכולת התמודדות עם כלל אחד בלבד (Siegler, 1986).

שאלות מחקר

1. אילו סוגים של תבניות תיאור משמשים ילדים צעירים בהסבר התנהגותו של רובוט? (אפיזודות, תרחישים, כללים)
2. כאשר הילדים משתמשים בכללים, איזו תצורת מסד-כללים² הם יוצרים? (כללים חלקיים, שלמים או משולבים)
3. מה הקשר בין תבניות התיאור ותצורות מסד-הכללים של הילדים, בתיאורים ספונטאניים לעומת תיאורים הנתמכים על-ידי מבוגר, בשיח המקדם מיקוד בקידוד של מאפיינים רלוונטיים של המשימה?

שיטה

מדגם

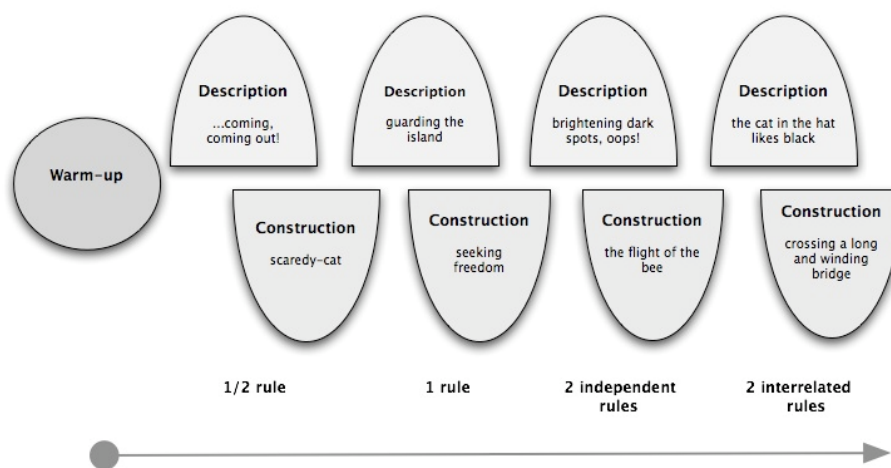
שישה ילדים השתתפו במחקר, שלושה בנים ושלוש בנות, שנבחרו באופן אקראי מתוך 60 ילדים בבית-ספר עירוני במרכז (שתי חטיבות צעירות). ממוצע גילאים הילדים היה 5.10 (SD=0.3).

כלים והליך

שלושה כלים פותחו לצורך המחקר: סביבה ממוחשבת לבקרה על רובוט, סדרת משימות תיאור במסגרת ראיונות וסדרת משימות בנייה לפעילות עם הרובוט. במשימת תיאור, הילד מתאר ומסביר התנהגות רובוט שהוכנה על-ידי המראיין והוצגה בפניו. במשימת בנייה, הילד מתכנת את הרובוט לפי מטרה המוצגת על-ידי המראיין. המשימות עוצבו כמדרג של תצורת מסד-כללים, לפי סדר קושי עולה (תצורת מסד-כללים היא מספר הזוגות של צמדי "תנאי-פעולה").

המחקר התקיים לאורך חמישה מפגשים בני 30-45 דקות כל אחד, במרווחים של כשבוע (איור 3), כאשר כל מפגש הורכב ממשימת תיאור ומשימת בנייה באחת מרמות המדרג שתוארו לעיל. לדוגמה, במשימת תיאור ברמה של כלל שלם או שני צמדי "תנאי-פעולה", הילד מתבקש לתאר את ההתנהגות שתוארה לעיל בהתייחס לרובוט "שומר האיי" באיור 2 (על כהה... על בהיר...); במשימת הבניה, הילד מתכנת את הרובוט כך שיעבור במגרש מחסומים בלי להיתקע (אם נתקע... אם לא נתקע...). הילדים פעלו ורואיינו באופן יחידני. התערבות של מבוגר התקיימה באחת משתי צורות: *התנעה*, כלומר שאלה או גירוי שנועדו לעודד את הילד לשוחח ולהסביר את הבנתו, או *דקומפוזיציה* של הבעיה, הפניית קשב הילדים לתנאים סביבתיים או פעולות מסוימות של הרובוט, שלא הופיעו בתיאוריהם הספונטאניים. המפגשים צולמו במצלמת וידיאו.

² תצורת מסד-כללים הוא תרגום של המונח rule-base configuration, המתאר את מערך הכללים המשמשים להגדרה – מספרם ומידת הכיסוי של טווח האפשרויות.



איור 3. הליך המחקר

ניתוח נתונים

צילומי המפגשים שוקלטו וחולקו ל-341 היגדים. נערך ניתוח תוכן של היגדים אלה במונחים של תמיכת המראיין, תבנית התיאור של הילד, וכאשר השתמשו בכללים, מספר הכללים בתיאור. תמיכות המראיין נותחו ביחס לעצמאות הילדים ותבנית התיאור ששימשה אותם (טבלה 1) וכתצורת מסד-הכללים (המספר הגדול ביותר של צמדי כלל-פעולה).

טבלה 1. קידוד המשתנים במחקר

Coding scheme for children's responses.

Variable	Category	Definition	Examples
Interviewer support	Spontaneous	The interviewer has asked a general question or requested an elaboration	"What is happening here?" "Can you tell me some more about...?" "What do you mean...?"
	Supported	The interviewer has asked specific questions that focus on previously unmentioned environmental conditions or robot action	"What is the robot doing on the rug?" "Does it always turn?"
Construct	Episode	Description of an event with no repetition or pattern	"It's going backwards, forwards, turning..."
	Script	Description of a temporal sequence of events, which includes repetition	"That it turns, you put a hat on him, so where you... here – he's turning to here. You put a hat on him, so he..."
	Rule	Description in terms of a-temporal condition-action units	"When someone puts a hat on it, it turns." [technological] "It wants to be only on black squares." [psychological]

שלושה חוקרים (שני הכותבים וסטודנטית לתואר שני) קידדו 20% מן ההיגדים. מהימנות בין שופטים הייתה 0.9. שאר הנתונים קודדו על-ידי הסטודנטית ונבדקו על-ידי השופטים האחרים.

תוצאות

שאלת מחקר 1: אילו סוגים של תבניות תיאור משמשים את הילדים בהסבר התנהגותו של רובוט? (אפיזודות, תרחישים, כללים)

טבלה 2 מציגה את אפיונם של שני חלקי הראיון לגבי התנהגות רובוט נתונה – תיאור חופשי ותיאור נתמך. כאשר ניתנה יותר מאשר תבנית תיאור אחת, מתוארות כלל התבניות בראיון, השונות זו מזו. איורים 4 ו-5 מתארים את חלק ההיגדים בכל אחת מן התבניות במשימות השונות. ניתן לראות כי שלושת תבניות התיאור שימשו את הילדים, אך בתדירויות שונות (טבלה 2, איורים 4 ו-5). ניתן לראות כי רוב התיאורים הספונטאניים הם מסוג של תרחיש. המשימות הקלות יותר הניבו בעיקר כללים, שהוחלפו בהדרגה בתרחישים עם העלייה במורכבות. תדירות האפיזודות נמוכה ועולה מעט במשימות המורכבות ביותר.

טבלה 2. תבניות התיאור

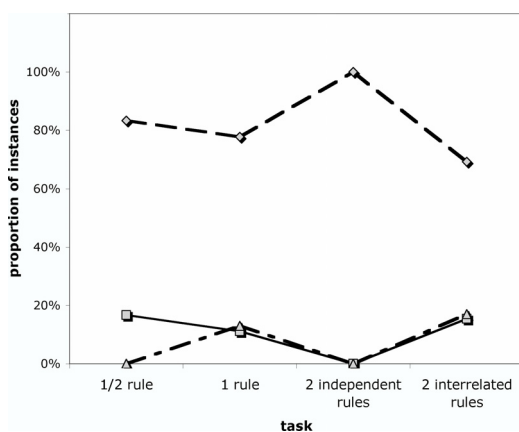
Tasks	1/2 rule		Complete rule		2 independent rules		2 interrelated rules	
	spont ^b .	supp.	spont.	supp.	spont.	supp.	spont.	supp.
S1	r ^c	r	r	r	s,r	r	e	r,e,r
S2	r	r, s	s	r,s,r	s	r	s	s,r,s,r
S3	r	r	r*	r,e,r	s	r	r	r
S4	r*	r	s	r	s	r	s	r
S5	r	r	s,r	r	-	r	s	r
S6	/ ^d	/	/	/	r,e	r	s,e	r,e,r

^a Codes refer to different utterances only when they are different in construct. E.g. when more than one rule is provided in a single utterance, only one "r" is used.

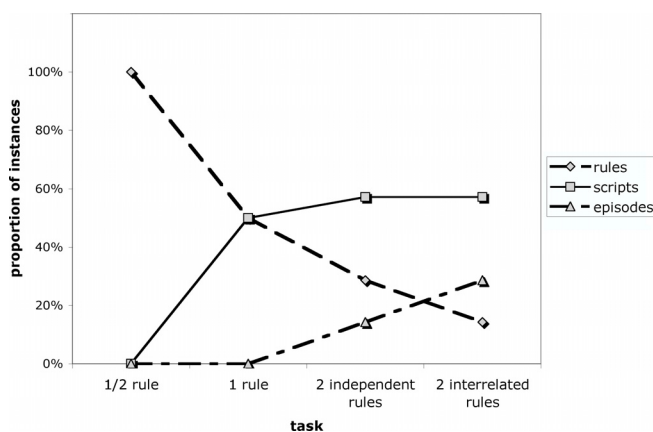
^b spont. = spontaneous description; supp. = description supported by decomposing the task.

^c r = rule / s = script / e = episode / r* = incomplete rule

^d The missing data results from technical difficulty in the interview's recording.



איור 5. תיאורים נתמכים



איור 4. תיאורים ספונטאניים

ניתן לראות כי עם תמיכה של מבוגר (עיבוד תהליך דקומפוזיציה - לא הוראה), כל הילדים, ברוב המשימות תיארו את התנהגות הרובוט באמצעות כללים.

אנו מעוניינים במיוחד בתיאורים מסוג אפיזודה שכן אלה מסמנים זמנים שבהם קיים קשב רב לפעולותיו המדויקות של הרובוט "הוא זו אחורה, קדימה, מסתובב....". בטבלה 2, ניתן לראות שכל האפיזודות מצויות בין סוגי תיאורים אחרים. בנייתו נוסף, נמצא כי מיקום האפיזודות הוא באחד משני מצבים: מוקדם בראיון, כאשר הוצגה התנהגות חדשה (שלוש פעמים), או כאשר קרה שינוי שמביא לסתירה של הכללה קודמת של הילד (שלוש פעמים).

שאלת מחקר 2: כאשר הילדים משתמשים בכללים, איזו תצורת מסד-כללים הם יוצרים? (כללים חלקיים, שלמים או משולבים)

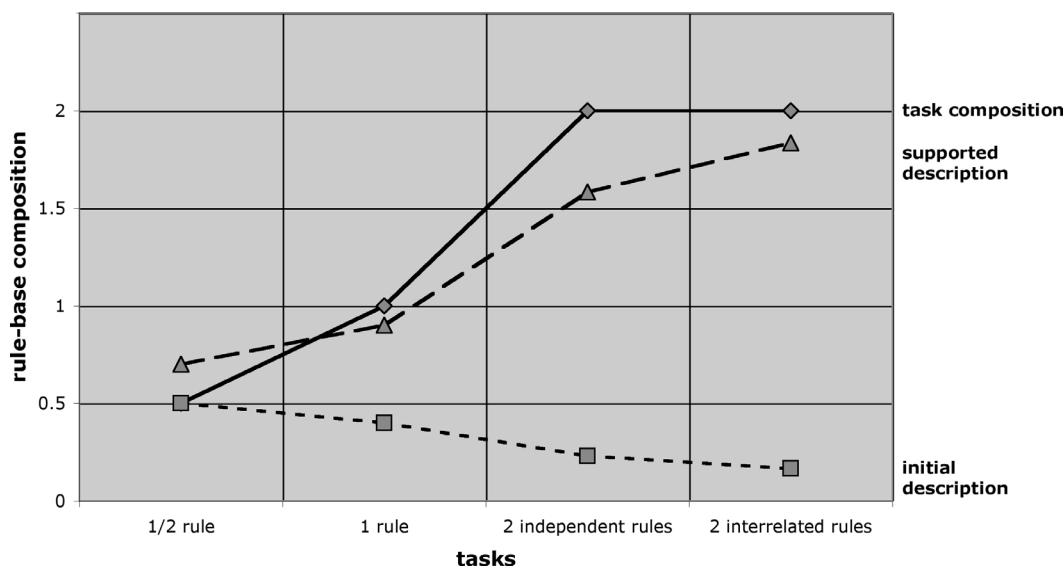
נחקרו יכולותיהם של הילדים לשלב מספר כללים בהסבר של התנהגות הרובוט (טבלה 3, איור 6). במשימה הראשונה, עם צמד תנאי-פעולה אחד (חצי כלל), כל הילדים תיארו את התנהגות הרובוט בדרך זו. במשימות רבות בהמשך, כאשר היה שימוש בכללים אלה נבנו גם מצמד תנאי-פעולה אחד. אולם, עם תמיכתו של מבוגר, תיאורי הילדים עלו במורכבותם, בדרך-כלל בהפרש הנע בין 0.5-1.5 כללים. רוב הילדים הגיעו למורכבות תיאור הקרובה לזו של המשימה.

טבלה 3. תצורת מסד-הנתונים

Tasks	1/2 rule		Complete rule		2 independent rules		2 interrelated rules	
	spont. ^a	supp.	spont.	supp.	spont.	supp.	spont.	supp.
S1	1/2	1	1	1	1	2	0	1 1/2
S2	1/2	1/2	0	1/2	0	1 1/2	0	2
S3	1/2	1/2	1/2	1	0	1 1/2	1	2
S4	1/2	1/2	0	1	0	1	0	2
S5	1/2	1	1/2	1	0	2	0	1 1/2
S6	/ ^b	/	/	/	1/2	1 1/2	0	2

^{aa} spont. = spontaneous description; supp. = description supported by decomposing the task

^b The missing data results from technical difficulty in recording the interview.



איור 6. מורכבות תצורת מסד-הכללים

דיון

מאמר זה עוסק בהשתנות ייצוגי הידע של ילדים צעירים בעת תיאור והסבר התנהגות סתגלנית של רובוט נייד, יצור מלאכותי-מיחשובי.

באופן ספונטאני, ילדים צעירים דנים בהתנהגותו של רובוט באמצעות כללים במשימות פשוטות, כאשר עליה במורכבות המשימה קשורה בירידה במופשטות ההסברים. רוב תיאורי הילדים הם מסוג של תרחיש ומורכבות הטיפול בהתנהגות הרובוט כמעט קבועה לאורך המשימות השונות – צמד תנאי-פעולה אחד. עם תמיכה של מבוגר, המעודדת דקומפוזיציה של הבעיה או ההתנהגות, תיאורי הילדים נעים למופשטות גבוהה יותר (כללים) ולמורכבות גבוהה יותר.

בדיון בתוצאות אלה, נתמקד בשלוש נקודות עיקריות: תהליך מיצוי של כללים מהתנהגויות; הכללות-מוחשיות כתומכות בפענוח של התנהגות הרובוט; השלכות חינוכיות של המחקר.

מיצוי של כללים מהתנהגויות

תהליך הפענוח של הכללים המתארים את התנהגותו של רובוט כרוך בלכידה של מאפיינים עיקריים מהסביבה ומפעולות הרובוט וקישורם, וקשור בשלושה שינויים: מידת הכללה גוברת, מעבר מתבניות זמניות לתבניות א-זמניות ודצנטרציה מהרובוט לסביבתו. טענתנו שהמשימות הקשות יותר מאתגרות את חשיבת הילדים מעבר ליכולתם הנוכחית במיצוי כללים. בכך, הם חוזרים לצורות חשיבה מוקדמות יותר ובכך מגלים תהליכים שמתרחשים מהר גם במשימות הקלות יותר. ממצאים דומים התקבלו במחקריהם של Schwartz & Black, 1996; Siegler, 1986; Granott, 1991b. גם אוכלוסיות אחרות או בתחומים אחרים.

מוצע כי הילדים ממצים כללים מתוך התנהגות הרובוט בשלבים הבאים: (1) צופים בסדרת הפעולות והתנועות של הרובוט במרחב (אפיזודות), תוך מיקוד בפעולות הרובוט ולא במרחב בו הוא פועל, בגישה "רובו-צנטרית"; (2) מחפשים הליכים חוזרים בפעולות הרובוט הניצתים מאובייקט או מאפיין מסוים במרחב (תרחישים), כאשר התנאים המרחביים זוכים בחשיבות מסוימת, ומתאפשרת דצנטרציה חלקית מהרובוט; (3) מזקקים יחסים א-זמניים מתוך התאמה בין התנאים הסביבתיים ופעולות הרובוט (כללים), כאשר חשיבות דומה מוקנית גם לתנאים וגם לפעולות לצורך הסבר הרובוט, ובכך הושלמה הדצנטרציה מן הרובוט.

הכללות-מוחשיות

מאפיין מרכזי של סביבת למידה המקדמת "הכללות-מוחשיות" בכך שהיא מאפשרת הפשטה והסמלה של תהליך קבלת ההחלטות של הרובוט בקשר רצוף, מיידית ומחזורית עם ההתנהגות המוחשית שלו. המבנה המופשט שתול בתוך האובייקט הממשי, והסביבה מאפשרת מעבר מחזורי בין המוחשי למופשט בדרך של חקירה משחקית ובעיצוב יצירתי. עבור הילדים במחקר הנוכחי, גורם זה תמך במיפוי בין מבנה הכלל המופשט לבין ההתנהגות הנצפית של הרובוט. דבר זה נוגד את הספרות המחקרית המעידה על כך שהם אינם יכולים להסיק אודות מבני כללי מופשטים, ותומך בספרות המראה את יכולותיהם בהסקה אודות סיבתיות או בניסוח כללים אותם בנו לתוך הסביבה הממוחשבת. כך, המערכת הרובוטית משמשת את הילד כסביבה מוחשית לחקירה של מושגים מופשטים, תחום לו אנו קוראים איזור "ההכללות המוחשיות".

השלכות חינוכיות

מחקר זה הוא חקירה ראשונה לתוך הבנתם של ילדים בדבר יצורים מלאכותיים אינטליגנטיים, המציגים התנהגויות אמרג'נטיות. בשעה שהמחקר העמיק את הבנתנו אודות למידתם של הילדים, המדגם הקטן וחוסר הקשר ליישום בגן מגבילים את מידת ההיסק שניתן לבצע. כיום, אנו מצויים במהלכו של מחקר בגן המרחיב את המחקר הנוכחי. על בסיס המחקר, הוכנה גרסה חדשה של הסביבה. אנו מצפים כי בעתיד הנראה לעין, נוכל לדווח על תוצאות המחקר החדש.

מקורות

- Braitenberg, V. (1984). *Vehicles: Experiments in synthetic psychology*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Cheng, P. W. (1997). From covariation to causation: A causal power theory. *Psychological Review*, 104, 367-405.
- Flavell, J.H., Miller, P.H. & Miller, S.A., (1993). *Cognitive Development*. Third edition. NJ: Prentice Hall
- Frye, D., Zelazo, P.D., Brooks, P.J. & Samuels, M.C. (1996). Inference and action in early causal reasoning. *Developmental Psychology*, 32(1), 120-131.
- Granott, N. (1991a). Puzzled minds and weird creatures: Phases in the spontaneous process of knowledge construction. (In I. Harel & S. Papert (Eds.), *Constructionism* (pp. 295-310). Norwood, New-Jersey: Ablex Publishing Corporation.)
- Granott, N. (1991b). *From macro to micro and back: On the analysis of microdevelopment*. Paper presented at the meeting of the Jean Piaget Society, PA.
- Klahr, D., Fay, A.L. & Dunbar, K. (1993). Heuristics for scientific experimentation: A developmental study. *Cognitive Psychology*, 25, 111-146.
- Kuhn, D. & Dean, D. Jr. (2004). Connecting scientific reasoning and causal inference. *Journal of Cognition and Development*, 5(2), 261-288.
- Papert, S. (1980, 1993). *Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas*. (First and second editions. Cambridge, MA: Basic Books)
- Piaget, J. & Inhelder, B. (1948/56). *The child's conception of space*. (New-York: Norton)
- Schank, R. C. & Abelson, R.P. (1977). *Scripts, plans, goals, and understanding: An inquiry into human knowledge structures*. Hillsdale, New-Jersey: Lawrence Erlbaum.
- Talis, V., Mioduser, D., & Levy, S.T. (1998). RoboGan. A software environment for programming robots. Tel-Aviv University.
- Schauble, L. (1990). Belief revision in children: The role of prior knowledge and strategies for generating evidence. *Journal of Experimental Child Psychology*, 49, 31-57.
- Schwartz, D.L. & Black, J.B. (1996). Shuttling between depictive models and abstract rules: Induction and fallback. *Cognitive Science*, 20, 457-497.
- Shanks, D.R. (1995). Is human learning rational? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 48A(2), 257-279
- Siegler, R. S. (1986). *Children's Thinking*. (Prentice-Hall International)
- Siegler, R.S. & Chen, Z (1998). Developmental differences in rule learning: A microgenetic analysis. *Cognitive Psychology*, 36, 273-310.
- Sobel, D.M., Tenenbaum, J.B. & Gopnik, A. (2004). Children's causal inferences from indirect evidence: Backwards blocking and Bayesian reasoning in preschoolers. *Cognitive Science*, 28, 303-333.
- Zimmerman, C. (2000). The Development of Scientific Reasoning Skills. *Developmental Review*, 20, 99-149.
- Zuga, K.F. (2004). Improving technology education research on cognition. *International Journal of Technology and Design Education*, 14, 79-87.