

האוניברסיטה הפתוחה
המחלקה למתמטיקה ומדעי המחשב

ויזואליזציות של אלגוריתמים ככלי עיקרי ללמידה

עבודה מסכמת זו הוגשה כחלק מהדרישות לקבלת תואר
מוסמך למדעים M.Sc. במדעי המחשב
באוניברסיטה הפתוחה
החטיבה למדעי המחשב

מגיש
שמואל שוקרון
ת.ז. 314379215

העבודה הוכנה בהנחייתה של פרופסור יהודית גל-עזר

מאי 2013

תוכן עניינים

2	.....		תקציר
3	.....	1	מבוא
3	.....	2	רקע על תחום הוויזואליזציות של אלגוריתמים
	4	2.1	המרכיבים של AV (ALGORITHM VISUALIZATION) יעיל
	5	2.2	התרומה החינוכית של AV
	6	2.3	מדדי האיכות של AV
	7	2.4	כלים ליצירת AV איכותיים
	8	2.5	מציאת AV קיים
9	.....	3	הפיכת הוויזואליזציה לכלי למידה עיקרי
	10	3.1	אלמנטים קיימים וחדשים בוויזואליזציות
	10	3.1.1	ויזואליזציה גרפית של אופן פעולת האלגוריתם ואנימציות של מעברים בין מצבים
	11	3.1.2	שליטת המשתמש
	12	3.1.3	קשר הדוק בין הוויזואליזציה לבין טקסט כתוב
	13	3.1.4	יצירת ויזואליזציות בנקל
	13	3.1.5	שיתוף חברתי
	14	3.1.6	אינטראקטיביות (תרגילים, שאלות ותשובות)
	15	3.1.7	m-learning
	16	3.2	תיאור תוכנת הוויזואליזציה של עצים אדומים-שחורים
	16	3.2.1	עצים אדומים-שחורים
	16	3.2.2	אלגוריתם לוויזואליזציה
	17	3.2.3	תיאור התוכנה
	22	3.3	מאפיינים חסרים בתוכנה
	23	3.4	החלטות ומסקנות בעקבות המימוש
	23	3.4.1	תכנון הוויזואליזציה
	24	3.4.2	שפת תכנות של הוויזואליזציה
	25	3.4.3	סביבת הפיתוח
	25	3.4.4	ספרייה גרפית
	25	3.4.5	סביבת כתיבת הספר האלקטרוני
	26	3.5	לקחים ומסקנות
27	.....	4	סיכום וכיוונים להמשך
30	.....		מקורות

תקציר

הבנת אלגוריתמים ומבני נתונים נחשבת לאחד המכשולים העיקריים של סטודנטים לקראת תואר במדעי המחשב. מטרתנו לבדוק כיצד ויזואליזציות של אותם האלגוריתמים יכולות להסיר מכשול זה או לעזור להתמודד עמו. עוד מטרה היא שמרצים ישתמשו בכלי הוויזואליזציה לצורכי הוראה. לכן, בעבודה זו פיתחנו ויזואליזציה של אלגוריתם לא טריוויאלי, ונציג את המסקנות מן ההתנסות בתכנה. כמו כן נציע ונרכיב אלמנטים שיעזרו לקדם את הצלחת הוויזואליזציה. לסיום ננתח אילו מהטכנולוגיות שמתפתחות באחרונה יכולות לתרום להפיכת הוויזואליזציה לכלי עיקרי ללמידה.

1 מבוא

זה מכבר עשרים שנה תחום הוויזואליזציה של האלגוריתמים (AV Algorithm Visualization) תופס מקום נכבד במחקר הוראת מדעי המחשב [1]. כמו שצוין בהקדמה של מקור [2], אחד הנושאים העיקריים של תואר במדעי המחשב הוא הבנת מבנה נתונים ואלגוריתמים. אחת השיטות שאפשר להיעזר לצורך זה היא ויזואליזציה של האלגוריתמים. נושא זה נחקר רבות בתחום של הוראת מדעי המחשב.

2 רקע על ויזואליזציות של אלגוריתמים

ויזואליזציה של אלגוריתם הוא תהליך הפשטת נתונים, פעולות וסמנטיקה של תכנת האלגוריתם ויצירת תוכן גרפי של ההפשטות [10]. ויזואליזציה של אלגוריתם נבנה כדי לסייע בהבנת האלגוריתם. אפשר לתרגם כל אלגוריתם לתכנה או לשפת מחשב. התרגום לשפת מחשב מוביל למימוש. תכנה זו כוללת את מבנה הנתונים של האלגוריתם. בהרצת התכנה המממשת את האלגוריתם הערכים של מבנה הנתונים משתנים לפי האלגוריתם. הוויזואליזציה של האלגוריתם יכולה לספק ייצוג גרפי של מבנה הנתונים הפנימי של האלגוריתם הממומש, ולהראות את השינויים של אותם מבני הנתונים לכל אחד מהמצבים במטרה לתאר את שלבי הריצה וההתנהגות הדינמית של האלגוריתם. בדרך זו המשתמשים יכולים לצפות בשלבי ההרצה צעד אחר צעד, להתבונן בשינויי המבנים הפנימיים ולהבין הבנה טובה יותר את האלגוריתם (ראה מקור [29]). איור או תרשים זרימה שאנו רגילים לראות בספרי לימוד הם הוויזואליזציה הפשוטה ביותר של מבנה נתונים או אלגוריתם.

כעת נבין איך הוויזואליזציות התפתחו מאיור או מתרשים זרימה פשוט למה שהן היום – תכנה שמריצה שלב אחרי שלב את האלגוריתם תוך כדי הצגה גרפית משתנה של מצבי הביניים שלו ושל מבנה הנתונים שלו. בשנת 1981 יצא לאור סרטון המכונה Sorting Out של Ronald Baecker מאוניברסיטת טורונטו, והוא נחשב עליית מדרגה בהשתכללות של תחום הוויזואליזציות של אלגוריתמים ובהתקדמותו (<http://www.youtube.com/watch?v=F3oKjPT5Khg>). כבר לא מדובר רק באיורים, אלא יש גם סרטון שמסביר שלב אחר שלב תוך הצגת גרפית של השלבים. עדיין משתמש הוויזואליזציה פסיבי, אינו יכול להתערב בפעולות המתבצעות, וגם אין לו שום כלים ליצור ויזואליזציות משלו. לאחר מכן נבנו כמה ויזואליזציות, כמו Balsa [11] ו-Tango [10], שהיו בסיס לפיתוחים עתידיים מבחינת מושגים שהתחדשו בהן, כמו תשתית הכוללת אינטראקטיביות והארכיטקטורה שלהן. כמו כן יצרו הוויזואליזציות תשתית להקל את העבודה הגרפית של כותב האפליקציה. במקרה הזה כבר היה אפשר להתערב בקלט, לעצור את האלגוריתם ברגע נתון, לצפות בייצוג גרפי הביניים, והוא אפילו סיפק פלטפורמה למעוניינים ליצור ויזואליזציות משלהם.

הוויזואליזציות הראשונות היו תלויי פלטפורמה. בשל פיתוח טכנולוגיות כמו Java ועליית השפעתה של רשת אינטרנט בנו אותן יוצרי ויזואליזציות רבים בנייה מקוונת, וכך

השתחררו מתלות זו, ופיתחו בנקל שימוש רחב של הוויזואליזציות. היום, עם פיתוח טכנולוגיות Web 2.0 (http://en.wikipedia.org/wiki/Web_2.0#Web_2.0_in_education) HTML5 (<http://en.wikipedia.org/wiki/HTML5>), מזמן התייחסות של המשמעות לתחום הוויזואליזציות של אלגוריתמים בגלל יכולות של רשתות חברתיות, הוספות של מולטימדיה וכולי.

2.1 המרכיבים של AV (Algorithm Visualization) יעיל

כיום אפשר לעבד בנקל רשימה של מרכיבים המקובלים לוויזואליזציה כדי להעריך אם היא יעילה מבחינה לימודית. אנו מתכוונים אל הצד השווה של כל הוויזואליזציות שכיום קיימות. אפשר, כמובן, למצוא גם מרכיבים שאינם ברשימה. אנו נכלול אותם ברשימה של כל המרכיבים האפשריים ההכרחיים שנבנה בהמשך כדי להפוך את הוויזואליזציות לכלי מרכזי בלמידה. אלה היסודות העיקריים (מבוסס על מקור [3]):

א. ממשק משתמש פשוט

משתמש הוויזואליזציה יתקשה להתמודד עם ויזואליזציה הכוללת עומס של מסכים, כפתורים ותפריטים. לכן מומלץ שלא ליצור ויזואליזציה שהפעולות שבה ידרשו הסברים רבים. היא אמורה להיכנס בתוך המסך בלא צורך לגלול. חשוב להסתיר פרטי מימוש לא רלוונטיים למה שהוויזואליזציה מיועדת.

ב. אנימציה של פעולות מורכבות באלגוריתם

אחד היתרונות של ויזואליזציה זו היכולת לספק אנימציה, שתסביר ותתאר את אופן פעולתו של האלגוריתם במקרים מורכבים. חשוב ביותר לבחור בקפידה פעולות אלו באופן שלא ניצור אנימציות מיותרות. כמו כן חשוב שלא להפוך את האנימציה לחוויה ויזואלית, שתסית את תשומת לבו של הלומד לגרפיקה ולאפקטים עצמם.

ג. בחירת קלט לאלגוריתם

המשתמש יוכל לבחור בערכים לכל פעולה שתבצע באלגוריתם. שמירת ההיסטוריה של הערכים שהוכנסו תתרום לזכור איך להגיע למבנה הנתונים ברגע מסוים. יסייע רבות להציע ערכים כדי לתאר את המצב של האלגוריתם ועבודתו. כמו כן רצוי לאפשר לספק ערכים אקראיים.

ד. שליטת המשתמש

יש לאפשר שליטה על מהירות המעבר בין המצבים, ריצת פעולה ואנימציה כלשהי. יש לאפשר ריצה ממושכת עד הסוף או צעד אחרי צעד (בין אוטומטית או בין על ידי לחיצה של המשתמש). כמו כן יש לאפשר לבטל פעולה או לחזור אליה (Undo/Redo).

כעת נתמקד בנקודת מבטו של יוצר הוויזואליזציה.

2.2 התרומה החינוכית של AV

נושא תרומתן החינוכית של הוויזואליזציות לאלגוריתמים הוא במרכז הוויכוח במחקרים ובמאמרים שונים. במקור [17] מובאת האמונה הבסיסית בקרב מלמדים שהוויזואליזציות אכן תורמות ללמידה. אך הוא גם מנסה למצוא את הסיבות העיקריות למה הפוטנציאל שלהן רחוק מלהתממש במציאות. מהמאמר עולה שיוצר הוויזואליזציה הוא דווקא הסיבה העיקרית לאי מיצוי פוטנציאל זה. הזמן שדרוש היום כדי לפתח ויזואליזציות ולאחר מכן לשלב אותן בקורס הוא מהמעצורים העיקריים. חסרים כלי פיתוח ותוכנות ייעודיות כדי ליצור את אותן הוויזואליזציות. חשיבה דומה מופיעה במקור [14], והוא מציג אתגר לעתיד - ליצור כלים ומתודולוגיות שיגרמו לרוב המלמדים במדעי המחשב להשתמש בוויזואליזציות של אלגוריתמים. המאמר מנתח מספר מערכות שמטרתן הייתה לספק צרכים אלו, והוא מנסה להסביר למה הן אינן למעשה מספקות אותם. הוא מסיים בשאלה פתוחה אם אכן אפשר ליצור כלים כאלה. במקור [3] מובא נוסף על הקושי בבניית הוויזואליזציות הצורך ההכרחי לערב ולדרוש למידה פעילה של הלומד כדי שיהיה לוויזואליזציות ערך חינוכי. הצגה גרפית בלבד של הרעיונות אינה משיגה את המטרה, ולפעמים ההפך הוא הנכון, הואיל ותשומת לבו של הלומד מוסתת לגרפיקה ולאנימציות מיותרות.

במקור [2] כתוב שלמרות ההסכמה הכללית שהוויזואליזציות אכן יכולות לתרום ללמידה, מספר הוויזואליזציות הלא מוצלחות גדולה בהרבה מאלה שמועילות. גם אלה שבפוטנציאל מועילות, אך אין משתמשים בהן תמיד נכון כדי להפיק את מרב התועלת, ונשארים בלא ערך פדגוגי. התוצאות האלה מראות שליצר ויזואליזציה ולספק אותה ללומד הן כיום מלאכה קשה. נכתבים מספר רב של מחקרים איך לכתוב ויזואליזציות בעלות ערך פדגוגי, אבל טרם הגענו למצב שקיימים כאלו. למרות הנאמר במחקר [2] נעשו ניסיונות בכיתת לימוד, ואלו הוכיחו שיעור הצלחה גבוה מאלה שלא השתמשו בוויזואליזציות, כמו שמובא במקור [1], ששילב שנתיים ויזואליזציות בקורס במבנה נתונים ואלגוריתמים, והוכיח תרומה של ממש בשילובם של הוויזואליזציות. חשוב לציין שהשתמשו בספר לימוד בשנה השנייה, שמכוון באיזו ויזואליזציה להשתמש, באיזה קלט, למה לשים לב וכולי. בעניין הזה נביא עוד מחקר שמוצג במקור [13], שגם הוא טוען להצלחת ניסוי שבוצע. מסקנתו שהוויזואליזציות מיותרות לנושאים יחסית פשוטים. לדעתו, כדאי ליצור בעצמנו ויזואליזציות לנושאים ברמת מורכבות בינונית, והוא סבור שאין להשתמש באנימציות בנושאים ברמת מורכבות גבוהה.

אנו יוצאים מסעיף זה אולי קצת פסימיים על תרומתם של הוויזואליזציות. ראשית הבאנו גם הצלחות מהתחום. המטרה בעבודה זו היא לפתח ויזואליזציה, לחוות את הקשיים, ללמוד מההצלחות של עבודות אחרות ולהציע באמצעות הכלים והטכנולוגיות החדשות

איך אפשר כיום ליצור תשתיות וכלים שיאפשרו יצירה קלה של ויזואליזציות, ובעיקר להציע אלמנטים חשובים (מקצתם קיימים היום, והם תוצר של הוויזואליזציות המוצלחות) לכלול בוויזואליזציות כדי למצות את הפוטנציאל, שזמן כה רב מאמינים שיש להן.

2.3 מדדי האיכות של AV

מקור [3] מדגיש את התנאי ההכרחי לכך שוויזואליזציה תתרום ללמידה, והוא שהלומד יתערב בלמידה התערבות פעילה. בעקבות המסקנה הזאת נצטרך לבדוק כיצד ויזואליזציה מסוימת מצליחה במטרה זו של למידה פעילה. במאמר מציעים טקסונומיה חדשה של מעורבות הסטודנט על ידי ויזואליזציות. טקסונומיה זו מבוססת על הטקסונומיה המקובלת של דרגת ההבנה של בלוס [22]. כמו כן מוצעים מדדים כדי להעריך את התרומה הלימודית של מעורבות הלומד על ידי ויזואליזציות. המדדים הם לפי רמת ההבנה של הטקסונומיה של בלוס:

1. **ידע** (עלינו לבחון אם הלומד מזהה ויכול להגדיר מושגים כלליים באלגוריתמים, כמו מחסניות, עצים, גרפים).
2. **הבנה** (עלינו לבדוק אם הסטודנט יכול להסביר איך האלגוריתם עובד, לממש אותו בשפת תכנות; אם הוא מבין את ההתנהגות של האלגוריתם במקרה גרוע ובמקרה אופטימלי וכדומה).
3. **יישום** (להתאים אלגוריתם שנלמד ליישום ספציפי, לנתח את המקרה הגרוע של אלגוריתמים בסיסיים ואת המקרה האופטימלי).
4. **ניתוח** (להיות מסוגל להוכיח את נכונותו של האלגוריתם ולהבין את היחסים בין האלגוריתם לבין אלגוריתמים דומים).
5. **סינתזה** (יכולת לתכנן פתרונות לבעיות מורכבות ולהשתמש באלגוריתמים שונים).
6. **הערכה** (לדון ביתרונותיהם ובחסרונותיהם של אלגוריתמים שונים שמטרתם לפתור את אותו סוג של בעיה).

כמו כן המאמר מביא ארבעה נושאים שאפשר למדוד באמצעותם את השיפור בתהליך הלמידה, ואלו הם:

1. **התקדמות הלומד**: המטרה לבדוק באיזה קצב הלומד מתקדם ברמות השונות של הטקסונומיה שהצגנו ולאן הוא הצליח להגיע ברמות הבנה אלו. מבחנים שמטרתם למדוד את שיעור ההצלחה של הלומד בשיטה מסוימת חייבים לנגוע ברמות ובדרגת השתלטות על רמה מסוימת של הבנה.
2. **קצב פרישה מן הקורס**: לפעמים בגלל קושי בלימודים תלמידים פורשים מן הקורס. אי אפשר בנקל למדוד זאת (לפעמים מייצג יותר מספר התלמידים שלא ניגשים למבחן גמר).

החוקרים מעוניינים לדעת אם הפרישה היא בגלל חוסר מוטיבציה ללמוד נושאים מסוימים ולהשתמש בכלים שמלמד הקורס ובמתודולוגיה שלו.

3. זמן לימוד :

במקום לתת זמן מוגבל להשלמת מטלות, החוקרים מציעים למדוד את הזמן שלוקח לסטודנטים להשלים את המטלות. החוקרים טוענים שאפשר לראות הצלחה בכך שעל ידי ויזואליזציות מתאימות לסטודנטים יש מוטיבציה גדולה יותר להשקיע זמן רב יותר במטלות.

4. רמת סיפוק של הסטודנט :

נראה לנכון לקבל משוב מהסטודנטים לשביעות רצונם מן הקורס, מן הכלים שבשימוש בו, מן המתודולוגיות וכולי.

במקור [16] מוצעת תשתית של מושגים כדי ליצור ויזואליזציות שממקמות את הסטודנט במרכז. כמו כן גם מוצעת שפה משותפת בין המלמדים והמפתחים לתקשורת והערכה נכונה של הוויזואליזציות. תשתית זו היא בעצם הקטגוריות של מטרות הלמידה של האלגוריתם, זאת אומרת היא מכילה את מה שאנו מצפים שהלומד יהיה מסוגל לבצע. להלן שבע הקטגוריות או המטרות: 1. יכולת תיאור האלגוריתם; 2. יכולת להראות איך הוא עובד על ידי ציורים או תכנות; 3. יכולת להבין ולהסביר כל שורה של הפסאודו-קוד; 4. יכולת לפתח תכנה המממשת את האלגוריתם; 5. יכולת להשוואה בין שני אלגוריתמים הפותרים את אותה הבעיה מבחינת יעילות ונכונות; 6. יכולת להשתמש שימוש חוזר באלגוריתם כדי לפתור בעיה אחרת, שהיא מורכבת יותר; 7. יכולת לפתח אלגוריתמים חדשים. (Descriptive, Demonstrative, Decoding, Coding, Evaluative, Appropriative, Originative).

2.4 כלים ליצירת AV איכותיים

בכליות נראה שיש חוסר בכלים ובתוכנות ליצירת ויזואליזציות יעילות [17]. אורך זמן רב יחסית ללמוד את התוכנות הקיימות ולפתח עם כלים אלו ויזואליזציות חדשות. כמו כן אורך זמן רב להתאים את הוויזואליזציות למבנה של הקורס או של ספר הלימוד. מתעוררים גם קשיים אחרים בכלים אלו, כמו ההתקנה שלהם והצורך לתחזק את הוויזואליזציות ולשדרג אותן לגרסאות חדשות יותר ויצירת תלות במערכת הפעלה. אחת המסקנות העולות ממקור [14] הן שהאתגר החשוב לעתיד הוויזואליזציות הוא ליצור כלים שיעודדו שימוש נרחב בהן. בעניין הזה, מאמר [14] בודק כמה מהמערכות הקיימות כדי להבין למה מלאכת יצירת הכלים היא כה מסובכת.

יש היום כמה מערכות מוכרות היטב בקהילת הוראת מדעי המחשב [2]. רובן

כתובות ב-Java אף על פי שהנטייה לאחרונה עם הופעתן של יכולות HTML5 היא לכתוב ב-

JavaScript. אחת המערכות הראשונות הייתה [10] TANGO. מקור [6] מזכיר ש-JHAVE

מאפשר ליצור גם ויזואליזציות מבלי ליצור את כל הוויזואליזציה עצמה, אלא רק להשתמש בשפות סקריפטס המיועדות לוויזואליזציה. חשוב גם להזכיר ש-ALVIE, שהוא בשימוש רחב באיטליה, היה בסיס של ניסוי שנערך שנתיים בקורס באלגוריתמים [1], והוא היום כולל במערכת אחת מספר גדול מאוד של ויזואליזציות. אפשר לעיין יותר באשר לכלי במקור [23].

זאת ועוד, במקור [24] מתואר ניסוי גדול של יותר מ-20 מערכות של ויזואליזציות מוצלחות. מקצת המסקנות הן שמערכות מבוססות סקריפטס מתאימות יותר ליצור שאלות ותשובות אינטראקטיביות. אלו שצריכות קומפילר (מהדר) כלשהו, מתאימות יותר להצגה של ויזואליזציות חדשות ולבנייה שלהן, ומצריכות פחות התעסקות בגרפיקה שמסביב. בכל מקרה לא מצאנו כלי מסוים שנהפך לסוג של סטנדרט ליצירת ויזואליזציות של אלגוריתמים. נדגים בסעיף הבא כמה ויזואליזציות קיימות ונתאר אותן.

2.5 מציאת AV קיים

כיום אפשר למצוא ויזואליזציות טובות ומועילות לאלגוריתמים, אבל עצם קיומם של מספר רב מאוד של ויזואליזציות לא מספקות הופך את מלאכת מציאת ויזואליזציה טובה לקשה. זו גם הסיבה לחוסר שימוש בוויזואליזציות. בשל הצורך לפרסם מידע מרוכז על איכותן ועל הימצאותן של ויזואליזציות לפי נושאים הוקמה קהילה מכוונת [4], ומטרתה לעודד שימוש בוויזואליזציות.

באתר <http://algoviz.org> אפשר למצוא מאות ויזואליזציות, כולל הערכה של הוויזואליזציה. אפשר למצוא בו גם נתונים שונים כמו קישור לאתר הרשמי של הוויזואליזציה, מידע אילו אלגוריתמים או מבנה נתונים מתעסק בו, המלצה עליו בתור כלי עזר בכיתה או ללימוד עצמי או בתור עזרה לדבג (debug) את האלגוריתם, מידע באיזו שפה הוא כתוב ומה הוא הרישיון ועוד מידע שימושי על הוויזואליזציה. יש באתר גם ויזואליזציות רבות על אלגוריתמים שונים, מעצי חיפוש בינריים פשוטים (ראה, למשל, <http://ww2.cs.mu.oz.au/aia/demoindex.html>, הכולל גם עוד דוגמאות רבות של ויזואליזציות), או אלגוריתם של תור עם עדיפויות (ראה <http://nova.umuc.edu/~jarc/idsv/>) עד אלגוריתמים כמו Vertex-Cover (ראה http://piluc.dsi.unifi.it/alvie/?page_id=21, הכולל את המספר הגדול ביותר שקיים היום של ויזואליזציות לאלגוריתמים, ובהם גם האלגוריתם הזה). כל הגולשים באתר יכולים לדרג כל ויזואליזציה ולהוסיף עליהם הערות.

באתר אפשר למצוא גם דוחות מה"שטח" באשר לניסיונות של מלמדים בשימוש הוויזואליזציות, ואפשר גם לשתף, בניסיון אישי כלשהו בתחום. באתר יש גם מדור שלם, המכיל ביבליוגרפיה על מחקרים בנושא ויזואליזציות של אלגוריתמים. יש בו פורום פתוח לשאלות ולשיתוף בקרב משתמשי האתר.

עוד אתר בתחום הוויזואליזציות הוא האתר המכונה OpenAlgoViz. יש בו מאגר של קוד פתוח. והאתר מספק מפתחי ויזואליזציות עם דוגמאות מימוש. האתר מרכז גם מידע חשוב באשר לאופן בניית סרטונים שמכילים ויזואליזציות של אלגוריתמים. הוא גם מספק קווים מנחים שיש בהם לסייע למפתחים לבנות ויזואליזציות איכותיות ולנצל את ניסיון העבר בתחום.

כמו שמוסבר במקור [4], הרעיון הוא לא רק לרכז מידע עדכני, אלא לבנות קהילה בתחום. האנלוגיה היא להשיג מה ש-Amazon מצליחה לעשות, היינו לבנות קטלוג מרשים ולבסס את רשת הקנייה. אבל Amazon היום הוא יותר מזה מנקודת המבט של הקהילה. חלק מרכזי בהצלחתו של Amazon הוא הדירוגים והסקירות הקיימות על הספרים שנוצרו בקהילה. זו אחת המטרות החשובות של פרויקט ה-AlgoViz, שנפתח לפני כשלוש שנים. פרויקט זה יחיד במינו, ואי אפשר היום למצוא ניסיון דומה, ורק במקצת המחקרים באוניברסיטאות השונות יש שימוש במערכות של ויזואליזציות. מערכות אלו מוזכרות בקטלוג העשיר והשימושי של AlgoViz.

נוסף על כך, פרויקט חדשני שנערך כעת ממכלול AlgoViz הוא יצירת ספר אלקטרוני אינטראקטיבי, שיכלול קורסים שלמים במבנה נתונים ואלגוריתמים. הוא גם יכלול תרגילים אינטראקטיביים ועוד חומר שימושי ללמידת נושאים תאורטיים במדעי המחשב. אפשר למצוא מידע על פרויקט זה ב-
http://people.cs.vt.edu/~shaffer/Presentations/ODSA_SIGCSE12.pdf. גם אפשר לקרוא במקור [25] מאמרים על הפרויקט הזה הקשורים ליצירה של ספרים מקוונים על-ידי הקהילה, ובאשר ליצירה אינטראקטיבית של הספר אפשר לקרוא במקור [26].

3 הפיכת הוויזואליזציה לכלי למידה עיקרי

מטרתה של עבודה זו היא, כאמור, להציע הרכב של חומר ויזואלי, שיספק מענה חינוכי להפיכתו לכלי מרכזי בלמידת הנושאים התאורטיים המסובכים יותר במדעי המחשב. ההרכב אמור לספק קרקע אופטימלית לוויזואליזציות הכלולות בו מבחינת הלומד ותשתית נוחה ליצור אותם מבחינת כותב הוויזואליזציה. היות והבנת אלגוריתמים וניתוחם הם במרכז הלימוד התאורטי של מדעי המחשב, התרכזנו בוויזואליזציה של אלגוריתמים. התחשבנו בעבודה הן ביוצר של הוויזואליזציה והן בלומד מתוך הוויזואליזציה.

לצורך העבודה בחרנו אלגוריתם ידוע הנלמד בכל קורס מבוא לאלגוריתמים, והוא עצים אדומים-שחורים. התבססנו על פרק 13 מתוך ספר לימוד [30], ובו מוסברים כללי האלגוריתמים ומבנה הנתונים, פעולות הכנסה, מחיקה וחיפוש, ומנותחים בו גם הסיבוכיות של הפעולות. הפרק אף כולל תרגילי עזר ואיורים המשלימים את ההסברים בכתב. את חומר הלימוד של פרק בספר ניסינו להעביר באמצעות ויזואליזציה כדי שהנושאים בו יהיו ברורים יותר ללומד. חשוב לציין שלא כל חומר לימוד או סביבה או הרכב שמוצע הם בהכרח ויזואליים.

התנסות במימוש הוויזואליזציה איפשר לנו לחוות את הקשיים ואת האתגרים. הטענה העיקרית שלנו היא שנוכל להגיע לסביבה אופטימלית לוויזואליזציות יעילות אם נקפיד על המרכיבים הבאים: ויזואליזציה גרפית של אופן פעולת האלגוריתם ועל אנימציות של מעברים בין מצבים, על צירוף חומר כתוב הנוגע במישרין לוויזואליזציות, על שיתוף חברתי, על אלמנט אינטראקטיבי (תרגילים, שאלות ותשובות), על חוויית למידה אישית ואינטימית למשתמש (לא מחשב, יותר ספר), על כך שהמשתמש יהיה מסוגל לשלוט היטב בערכי ביניים של משתנים, בקלט,

בגודל מבנה הנתונים ובמיקום ועל שיהיה אפשר ליצור חומר חדש (אלגוריתם חדש) עם כל המרכיבים בלא צורך בפיתוח חדש של הכול.

נתחיל בתיאור כל המרכיבים הנצרכים. שמקצתם מימשנו בעבודה. הדבר סייע בידינו להבין לעומק את תהליך הפיתוח, את האתגרים העיקריים ואת התחומים הטכנולוגיים הקשורים לחלקים בהרכב הכוללים:

1. סביבת כתיבת הספר שתקל את החיבור עם הוויזואליזציה
 2. שפת תכנות של הוויזואליזציה
 3. בחירת ספרייה גרפית (קשור לסעיף הקודם)
 4. דברים משלימים (חיבור לרשת חברתית, קשר אינטראקטיבי עם התכנה/ספר וכולי)
- אחרי כן נסביר מדוע כיום יצירת ויזואליזציה חדשה היא תהליך ארוך, שמקשה על העוסקים בהוראה להשתמש בו, וקל וחומר שלא ליצור בעצמם ויזואליזציות חדשות. נציע בעבודה אפשרויות חדשות לפתור את הבעיה.
- בסעיף הבא נדון לגבי כל אחד מהמרכיבים במידת חשיבותו לפרויקט, במאמץ והטכנולוגיה הדרושה ליישם אותו, ובאתגר העיקרי שהוא מציג לנו ובמסקנות שהסקנו באשר לו בשעת המימוש וקבלת החלטות בשלב תכנון התכנה. הדיון הזה יש בו כדי לסייע להבין כיוונים עתידיים ואת אופן השתכללות התחום.

3.1 אלמנטים קיימים וחדשים בוויזואליזציות

כפי שאמרנו, נדון בכל אחד מהמרכיבים לוויזואליזציה מוצלחת מבחינת מהות המרכיב, סיבת חשיבותו והימצאותו בעבודות קיימות. האינטגרציה של כל המרכיבים יחדיו ועם ספר הלימוד היא סביבת הלימודים האופטימלית, ולכן נדון גם בנושא החיבור בין המרכיבים השונים ותרומת החיבור ללמידה. את המרכיבים עצמם לקחנו לרוב מוויזואליזציות קיימות, אבל גם הוספנו אלמנטים שלא ראינו קודם.

ויזואליזציה גרפית של אופן פעולת האלגוריתם ואנימציות של מעברים בין מצבים

א. מהות המרכיב

לכל אלגוריתם יש פסאודו-קוד או הסבר של פעולתו שלב אחר שלב. כדי להמחיש את הפעולות אחת לאחת אפשר לייצג אותן ייצוג גרפי. כדי להבין את השלבים עצמם אנו צריכים לייצג ייצוג גרפי את המעבר בין המצבים. מעבר זה אפשר לייצג על ידי אנימציה. צריך שתהיה חלוקה ברורה בין הפסאודו-קוד עצמו לבין הייצוג הגרפי, ושנוכל גם לקבל בנקל מידע על ערכי הביניים של המשתנים כדי לצפות בשינויים בשעת המעברים ובמצבים עצמם. יש גם צורך לאפשר "להקפיא" במצב מסוים את הריצה לצורך התבוננות בערכים החדשים שהתקבלו, וכך להבין את מהות שינוי המצב. כדאי שלא להגזים באפקטים הגרפיים כדי שלא להסיח את דעתו של הלומד ולמקד אותו בהבנת הפעולות.

ב. חשיבותו

על ידי החיבור של הסבר השלבים באלגוריתם או בפסאודו-קוד עם הייצוג הגרפי ואנימציה של שינויי המצבים, הלומד יוכל לקפוץ בין הפסאודו-קוד עצמו לבין הייצוג הגרפי ולחבר בין ההסבר

הגרפי לפסאודו-קוד, וכך להבין לעומק את השלבים. במאמר [3] מובאת רשימה של אחד עשר המלצות כדי לקבל ויזואליזציה מוצלחת. אחת ההמלצות היא לספק ללומד מספר "תצפיות" על אופן פעולתו של האלגוריתם ומידע עוקב אחר המבטים השונים, כמו חלון עם פסאודו-קוד, שמודגשת בו שורת הריצה, ובד בבד חלון אחר, שמייצג את מבנה הנתונים באותה שורה. יש אף לתת אפשרות לעבור בין שורה לשורה בפסאודו-קוד או בין שני אזורים בפסאודו-קוד (על ידי breakpoints). אנימציה של מעבר בין מצבים היא גם חשובה כדי לעזור להבין איך כל מבנה נתונים או ערכים שלהם משתנים בין המצבים ולמה זה גורם או כדי לבחור שני מקומות כלשהם בפסאודו-קוד ולהבין איך מתבצע המעבר ביניהם (שוב אפשר להשיג את זה על ידי שימוש ב-breakpoints).

ג. סקירת המרכיב בעבודות קיימות

כמעט ללא יוצא מן הכלל הוויזואליזציות מכילות בתוכן את נושא הייצוג הגרפי ואת המעבר בין המצבים. במקור [12] מובא הקושי בלמוד מייצוג זה בלי שהמשתמש יוכל לעצור אותו כדי להתבונן. בשל כך נוצר הצורך לזכור פרטים ולהפעיל אותם בהמשך המצגת או ה"סרטון". הרצה מובלת של המשתמש משמשת זיכרון עזר להבנה וגם מאפשרת התבוננות חוזרת מנקודות מבט שונות על ידי הצגת הנתונים בצורות אחרות. מקור [13] גם מדגיש את יעילותה של ויזואליזציה מוגברת על ידי ריבוי תצוגות, בהם פסאודו-קוד וייצוג גרפי. כמו שאמרנו, רוב רובן של הוויזואליזציות המוצלחות כוללות כיום את המרכיב הזה.

3.1.1 שליטת המשתמש

א. מהות המרכיב

אנו מעוניינים שהמשתמש יהיה מעורב בהרצת האלגוריתם ולהשאיר לו את ההחלטה במה להתמקד. הוא יכול לומר מה חסר לו, איזה היבט עדיין לא מובן, ואיזה שלב או איזה מעבר בין מצבים לא הפנים. כדי לאפשר לו זאת נרצה לספק רמת חופש מקסימלית הכוללת:

1. בחירת העלמת מבטים גרפיים לא נצרכים (חלון קוד או חלון שמציג, למשל, את הערכים הפנימיים של המשתנים).
2. הוספת breakpoint בכל מקום נתון שנרצה לעצור את הריצה ולהקפיא את מצב המשתנים.
3. בחירת הגודל של הגרף, הפסאודו-קוד ומיקומם.
4. אפשרות שהמשתמש יכניס ערכים.
5. שמירת ההיסטוריה של הערכים שהוכנסו לפי הסדר.
6. אפשרות לקדם שורה בפסאודו-קוד ולחזור שורה אחורנית בפסאודו-קוד.
7. צפייה בסיבוכיות היחסית של קטע באלגוריתם לפי בקשת המשתמש.

כדאי לבצע את הפעולות האלה שיותר בצורה שהיא אינטואיטיביות או שנאבד את היתרון של שליטת המשתמש. לשם כך נצטרך להפעיל את מסקנות המחקרים בממשק אדם-מחשב.

ב. חשיבותו

אחת הטענות היא שכדי לבנות ויזואליזציה מוצלחת היא אמורה להיות מותאמת לצורך של המשתמש ולצורת חשיבתו. כל עוד לא ניתן לו שליטה במה להתמקד, מתי לעבור בין מצבים ואילו ערכים להכניס, לא נשיג מטרה זו, אלא להפך, נגיע למסקנה כמו במקור [17] שוויזואליזציות אינן תורמות לתהליך הלמידה. זהו המצב כיום בתחום. מובאת במאמר מסקנה, שמוסכמת בקהילת חוקרי הוויזואליזציות, שבלי דרגה כלשהיא של אינטראקטיביות או השפעה של המשתמש על מה שמתרחש בוויזואליזציה תרומתה מוטלת בספק.

ג. סקירת המרכיב בעבודות קיימות

רוב הוויזואליזציות מתרכזות בנקודת האפשרות להריץ את האלגוריתם צעד קדימה או אחורה. ראה למשל מקור [15]. במקור זה מובאת חשיבות לתת אפשרות ללכת אחורה וקדימה בוויזואליזציה באותה צורה שאפשר ללכת אחורה בקריאת ספר לימוד בלא צורך להתחיל מהתחלה. במקור [16] מובאת הצעה לבחון כל ויזואליזציה של אלגוריתם בשלוש תכונות – דרגת מעורבותו של המשתמש, האינטראקטיביות שלו כדי להימנע מפסיביות ועירוב פעיל של החשיבה ושל המאמץ השכלי. ניסוי שנערך הראה בוודאות שיפור של ממש בקרב סטודנטים שהייתה להם ויזואליזציה עם אפשרות "לשנות" אותה בהרצה, למשל על ידי בחירת הקלט.

3.1.2 הקשר ההדוק בין הוויזואליזציה לבין טקסט כתוב

א. מהות המרכיב

הטקסט קשור לוויזואליזציה, ואותן ויזואליזציות בתוך ספר הלימוד באות להדגים נושא מסוים, ובכך הן מסייעות ללומד להבינו. במרכז עדיין עומד הטקסט, והוא המנחה את חוויית הלמידה, אבל נספק את הכלים המתאימים ללומד להבין את הטקסט לעומק ולהתמודד עמו על ידי הוויזואליזציות. מכניסים את הוויזואליזציות בתוך הספר כעין איורים חיים, שנועדו לענות על "השאלות" של הקורא בנושאים שהתקשה להבין מההסבר הכתוב. מרכזים את הלמידה במקום אחד במקום לקפוץ בין משאבי הלמידה השונים, המסיחים לבסוף את דעתו של הלומד.

ב. חשיבותו

כאשר ויזואליזציה בשימוש בקורס כלשהו במדעי המחשב אינה נבנית בתאימות לספר הלימוד, ספק אם ישתמשו בה. צריך להיות סוג של מנחה או מדריך למידה שייקח אותנו לכל התחנות. חשוב לתת אפשרות ללומד להחליט על צורת הלימוד המתאימה לו, במה להתחיל ובמה להתרכז, אבל חשוב גם להנחות אותו בחומר כתוב המסודר לפי ניסיונו של המלמד.

ג. סקירת המרכיב בעבודות קיימות

במקור [17] כתוב שחשוב שהוויזואליזציה תהיה משולבת עם הקורס, ולא היא לא תהיה בשימוש. גם צוין שאין שילוב מוצלח יותר מאשר שילובה כחלק מהספר. הביטוי הניכר ביותר לכך הוא ה-hypertextbooks (במקור [18]) אפשר לקרוא יותר על מושג זה וגם לראות שאחת

המסקנות של המאמר אומרת שכדי להבטיח שימוש של ויזואליזציות בלמידה הן צריכות להיות ממכלול חבילה, שהיא כלי ומשאב עיקרי לכיתת לימוד). יש טענה במקור [16] שוויזואליזציות הצליחו הצלחה מסוימת בזכות היותן משולבות בספר הלימוד. אפשר למצוא במקור [1] דוגמה לשילוב מוצלח של ויזואליזציות בקורס עם ספר. מערכת הוויזואליזציות מכונה ALVIE.

3.1.3 יצירת ויזואליזציות בנקל

א. מהות המרכיב

באלמנט זה אנו מסיתים את המיקוד מהסטודנט ופונים למי שבפועל בונה את הוויזואליזציה (שיכול להיות המדריך, המרצה או אפילו הסטודנט עצמו אחרי שהבין את האלגוריתם). נרצה לספק ליוצר הוויזואליזציה כלים או תשתית שיאפשרו לו ליצור ויזואליזציות בנוחות, בנקל ומהר. התשתית היא הן לכתובת הספר עצמו או לכתובת טקסט, ובכלל זאת כל מה שכרוך בכך (עימוד, פונטים, צבעים וכולי), הן להכניס ויזואליזציות בתוך הספר, שאפשר ליצור אותן בלי לתכנת אותן, אלא רק לבחור אלמנטים, לחבר ביניהם ולכתוב את הקוד של האלגוריתם שמעוניינים בוויזואליזציה בשבילו.

ב. חשיבותו

אחד הרכיבים החשובים להפיכתו של הוויזואליזציות לכלי מרכזי בלמידה הוא רמת הסיבוך לפי נקודת מבטו של יוצר הוויזואליזציה. אם כדי ליצור ויזואליזציה קצת שונה או לשנות קצת ויזואליזציה קיימת, יש צורך בתכנות רב ובעבודה רבה של הגרפיקה, הרי המלמד או המדריך בקורס יבחר שלא להשתמש בה או לנסות להתאים ויזואליזציות קיימות לספר לימוד כלשהו. גם אם ירצה, לא תמיד יהיה לו הידע הנדרש כדי לפתח ויזואליזציות כאלה.

ג. סקירת המרכיב בעבודות קיימות

במקור [14] מובאת בהקדמה אמרה ש"אתגר עתידי הוא ליצור כלים ומתודולוגיה שתגרום לרוב המחנכים להשתמש בוויזואליזציות של אלגוריתמים" (Domingue, 2002). במקור [14] מובא אפילו שאחד האפיונים החשובים של ויזואליזציה טובה הוא לאפשר ללומד ליצור ויזואליזציות חדשות בעצמו. במקור [15] אפשר לקרוא על ויזואליזציות רבות לא מוצלחות, הואיל ואלה שיצרו אותן התרכזו בגרפיקה במקום בוויזואליזציה עצמה. בשל כך כתבו ספרייה גרפית ששמה AVSupport, והיא מאפשרת לכתוב מהר ויזואליזציות יעילות בעלות ערך פדגוגי.

3.1.4 שיתוף חברתי

א. מהות המרכיב

באלמנט הזה אנו מחזירים את המיקוד לסטודנט ולמדריך הקורס. להלן כמה דברים שאפשר להציע בתחום הזה:

1. כשמישהו ייכנס לכלי הוויזואליזציה, הוא יראה את כל הנוכחים ויכול לשאול שאלות דרך ה-chat. בנוסף, יסומן אם הוא מדריך או תלמיד.
2. כל סטודנט יוכל לשאול שאלות בכל מקום בתוך הספר. השאלה תופיע במקום הרלוונטי בספר. אפשר יהיה לפתוח חלון עם כל השאלות ועם קישור למקום בספר.
3. כל סטודנט יוכל להציע שינוי בתוכן הספר או בוויזואליזציות, והמדריך יוכל לקבל את השינוי (וייהפך להיות כחלק מהספר) או לדחותו. סטודנט יוכל גם להוסיף הסבר שיעזור לו או דוגמה. בעקבות כך ישתפר הספר אוטומטית בלא צורך במהדורה חדשה, ולכן הספר יהיה תמיד מעודכן.

ב. חשיבותו

כיום תחום הרשתות החברתיות תופס מקום נכבד בעולמנו. מוכח שגם תהליך הלמידה יש בו גורם של עבודה משותפת, של משא ומתן בלימוד כדי לברר את הנושאים הנלמדים. ככל שתהליך השיתוף יהיה קל יותר על ידי שילוב של אלמנט חברתי בתוך מערכת הוויזואליזציות של אלגוריתמים, כך נעודד את הלימוד. עדכון חומר ושיפורו רלוונטיים מאוד כאשר מסתכלים על נקודת מבטו של עורך הקורס. כדי לצאת ממצב של קשיים בעדכון חומר לימוד, יש להבין את נקודות הקושי ומה יכול לתרום להקל את קשיים האלה. על ידי שיתוף הסטודנטים נשיג מטרה זו בצורה יוצאת דופן.

ג. סקירת המרכיב בעבודות קיימות

במקור [18] מוצעים מספר כלים הקשורים לרשתות חברתיות, שנוכל להשתמש בהן כדי לשפר ולזרז את תהליך הלמידה (שימוש במערכת ניהול אדמיניסטרטיבי, להציע כלים לסטודנטים כדי לבנות, להציג ולשתף כלים כדי לעודד תקשורת בין סטודנטים של אותו קורס ובין סטודנטים ואנשים מהתחום). הוא גם מציע שלא להסתפק רק בשימוש אדמיניסטרטיבי (שיתוף מסמכים, שעות קבלה ועוד), אלא גם לנצל ללמידה פעילה. במקור [19] יש הצעה להשתמש בטכנולוגיות ניידות כדי לבנות שיתוף פעולה חברתי, שייצור משאבי ידע ולמידה פעילה. מקור [20] אומר שעל בסיס רצון להפוך את תהליך הלמידה לפעיל על ידי שיתוף חברתי נבנה תשתית ללמידה משותפת, המכונה MoCAS. נוסה גם השימוש במכשירים ניידים בכיתת לימוד, וכך נבחן נושא השיתופיות והניידות בתהליך הלמידה. התקבלו תוצאות טובות יותר לאלה שהשתמשו במערכת, כולל האלמנט החברתי שבו.

3.1.5 אינטראקטיביות (תרגילים, שאלות ותשובות)

א. מהות המרכיב

חשוב לנו להשאיר את הלומד מעורב ופעיל עד כמה שיותר בתהליך הלמידה ואפילו לשתף אותו שיתוף מתמיד בכתיבת חומר הלימוד ושיפורו (היינו מציעים אפילו לעודד זאת על ידי נתינת נקודות בונס בציון לאלו שיתרמו בכל צורה שהיא לשיפור החומר הנלמד). עוד צורה של לימוד

פעיל היא לגרום לאינטראקציה בין הוויזואליזציה לבין הלומד על ידי שאלות מכוונות בתוך הספר. תהיה אפשרות ללחוץ על השאלה כדי לבדוק אם התשובה נכונה או לא. גם היינו מציעים שלמדריך תהיה אפשרות לקבוע לאילו שאלות הספר יספק תשובה מלאה ולאילו תשובה חלקית או רמוז. אפשר יהיה לפרסם תשובה, ושאר משתתפי הקורס יוכלו לצפות בה. גם תרגילים יהיה אפשר לפתור, ויהיה אפשר לצפות בפתרון תרגילים דומים. הוויזואליזציה תעבור בכל שלבי הפתרון, ויהיה אפשר לעצור את פתרון של התרגיל ברגע נתון ולהתבונן בצעד שנעשה.

ב. חשיבותו

סוג של אינטראקטיביות חשוב, שכן הוא מושך את תשומת לבו של המשתמש וגורם לו להתבונן על נקודה חשובה לצורך ההבנה, שאולי לא ראה לנכון להתעמק בה (וטעות היה בידו). אנו רוצים לעודד לימוד פעיל, אבל לא לוותר על ההכוונה של המדריך. על ידי שאלות ותשובות ופתרון תרגילי עזר אנו משיגים מטרה זו.

ג. סקירת המרכיב בעבודות קיימות

במקור [2] מובאים כמה מערכות שכוללות שאלות למשתמש תוך כדי הרצה של הוויזואליזציה, כמו IDSV או JHAVE. TRAKLA2 כולל גם תרגילים אינטראקטיביים, והוא בשימוש רחב בפינלנד. הוא אולי אחת ממערכות הוויזואליזציות שבשימוש הנרחב ביותר בכל העולם. במקור [15], שכבר הבאנו לעיל, כתוב שהתמיכה של ספריות ה-Java כוללת אפשרות ליצור בנקל שאלות ותשובות אינטראקטיביות. במאמר צוין שתמיכה זו חשובה, הואיל והיא מספקת למשתמש משוב על רמת ההבנה שלו.

3.1.6 m-learning

אף על פי שאנו רואים בלמידה באמצעות מכשירים ניידים עוד מרכיב של הוויזואליזציה, הוא בעצם לא חיוני לחלוטין לוויזואליזציה. הוא שלעצמו נושא שלם ונכתבו עליו לא מעט מאמרים. אנו מבקשים להביא אותו בכל זאת בתור משלים, מעודד ומאפשר שימוש רחב של וויזואליזציות. הוא גם חשוב במבט של ממשק אדם-מכונה.

א. מהות המרכיב

בשנתיים האחרונות אנו עדים למהפכה של ממש ביכולות של המכשירים הניידים ובשימוש הרחב שלהם, בין אלה עם מסך קטן יחסית (טלפון סלולרי) ובין אלה עם מסך שהוא בגודל של דף ספר (טבלט). אין אנו דנים למעשה במרכיב הוויזואלי, אלא ביכולת להריץ את הוויזואליזציה במכשיר הסלולרי או בטבלט. ממשק משתמש מושפע ביותר מהחלטה זו, משום שנצטרך לשקול איזו תנועה תהיה הטבעית ביותר בשביל המשתמש כדי להפעיל כל פונקציה בוויזואליזציה. הדבר משנה שינוי של ממש את מלאכת פיתוח הוויזואליזציה.

ב. חשיבותו

יתרונות מכשירים אלו רבים. מחירו קטן יותר לעומת מחשבים, והם כבדים פחות מספרים. הם מאפשרים חומר אינטראקטיבי. הם מאפשרים למידה גם מרחוק ובלי להצטרך לעמדת מחשב.

הלימוד ממשיך להיות אינטימי כמו למידה מספר, והוא כולל אף את יתרונות החיפוש והגישה לרשת האינטרנט ולמשאבי למידה שונים. המכשירים הללו מעודדים למידה תוך שיתוף פעולה. למעשה המכשירים הניידים למיניהם מתפתחים בקצב מסחרר, והם המכשיר הנפוץ ביותר והצמוד ביותר לכל אדם בלא קשר היכן הוא נמצא.

ג. סקירת המרכיב בעבודות קיימות

מקור [7] מספר על ההזדמנויות שפיתוח מכשירים ניידים מאפשר כמו על האתגרים שהוא מציב ללמידה. הסטודנט של היום דורש גמישות, הווי אומר "ללמוד בכל מקום, בכל עת שיבחר ובכל מכשיר". מקור [21] גם מדגיש את המעבר הטכנולוגי שאנו עוברים למכשירים הניידים ואת שימושם הרחב בקרב כל האוכלוסיות, ומפאת כך הם המכשיר האישי הנפוץ ביותר בכל ההיסטוריה. סטודנט נושא את המכשיר הנייד רוב הזמן, משחק בו ומשתף באמצעותו דברים עם החברים שלו. למידה אינה צריכה מקום ספציפי, והיא ביתר קלות נהפכת לחוויה חברתית. במאמר זה מתוארת גם מערכת של תוכנות ללמידה, שפותחה לשימוש במכשירים ניידים. חידושה הוא לא רק בהצגת החומר לקריאה, אלא בתשתית ובסביבה ליצירת תוכנות. במקור [20] יש תיאור של תשתית שנבנתה לשיתוף פעולה לימודי באמצעות מכשירים ניידים. בו גם מודגשת חשיבות הלימוד על ידי שיתוף פעולה של התלמידים לעומת תהליך פסיבי של הלמידה (במאמר נכתב שתלמידים זוכרים לא יותר מ-5% ממה שהמורה מרצה בכיתה). במאמר מוצג ניסוי בכיתה לימוד עם שימוש בתשתית ובלי השימוש בו, והוכח ששיעור ההצלחה היה גבוה יותר בקרב אלו שהשתמשו במערכת באמצעות הניידים שלהם.

3.2 תיאור תוכנת הוויזואליזציה של עצים אדומים-שחורים

3.2.1 עצים אדומים-שחורים

עצים אדומים-שחורים הם מבנה נתונים אחד מתוך הסוגים הרבים ה"מאוזנים" של מבני עצי חיפוש. האיזון מבטיח שהפעולות הבסיסיות על קבוצות דינמיות ייעשו במקרה הגרוע בזמן $O(\lg)$ [30]. עץ אדום-שחור (red-black tree) הוא עץ חיפוש בינרי, ובו כל צומת מכיל עוד סיבית: הצבע (color) שלו, שיכול להיות אדום (RED) או שחור (BLACK). על ידי הגבלת אפשרויות הצביעה של הצמתים בכל מסלול מן השורש לעלה, עצים אדומים-שחורים מבטיחים שלא יהיה מסלול שאורכו יותר מכפלים מאורכו של מסלול כלשהו אחר, ובאופן הזה העץ מאוזן (balanced) בקירוב. במקור [30] יש יותר פרטים על תכונות של עצים אדומים-שחורים.

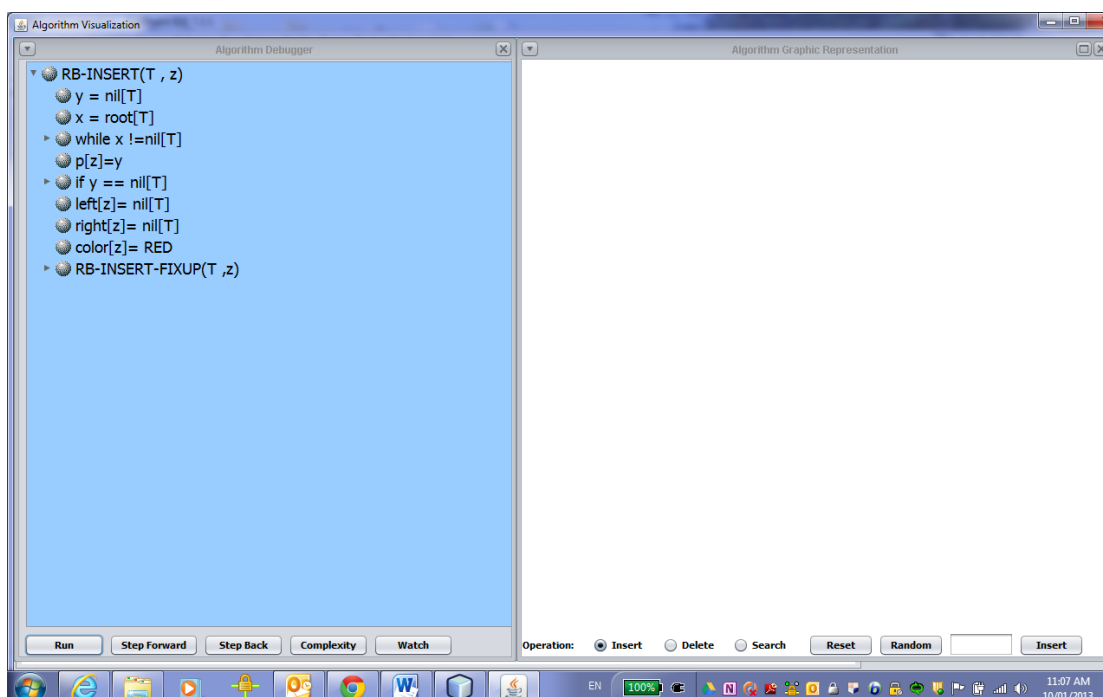
3.2.2 אלגוריתם לוויזואליזציה

בחרנו לבצע ויזואליזציה של פעולות הוספה ומחיקה לעץ אדום-שחור (החיפוש טריוויאלי וזהה לחיפוש בעצים בינריים). אלה פעולות לא קלות להבנה ולניתוח, וכוללות לעתים תהליך של איזון

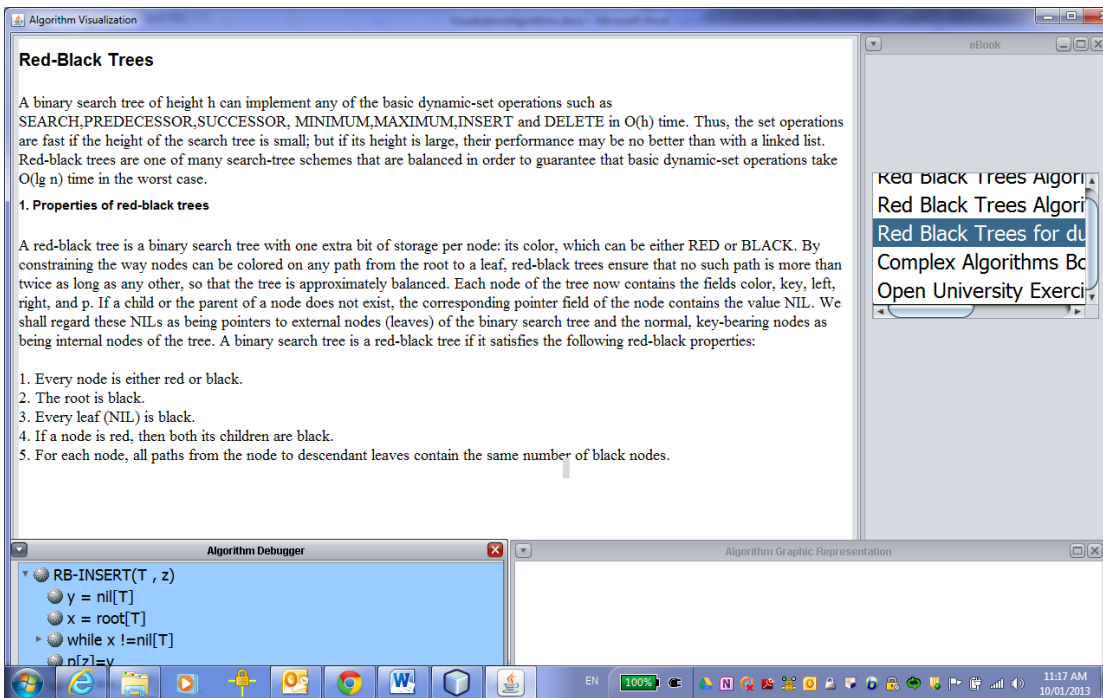
העץ הגם שביצענו ויזואליזציה עליו כמו סיבוב ימינה ושמאלה, כמו שמובא בסעיף 2 של פרק 13 במקור [30].

3.2.3 תיאור התוכנה

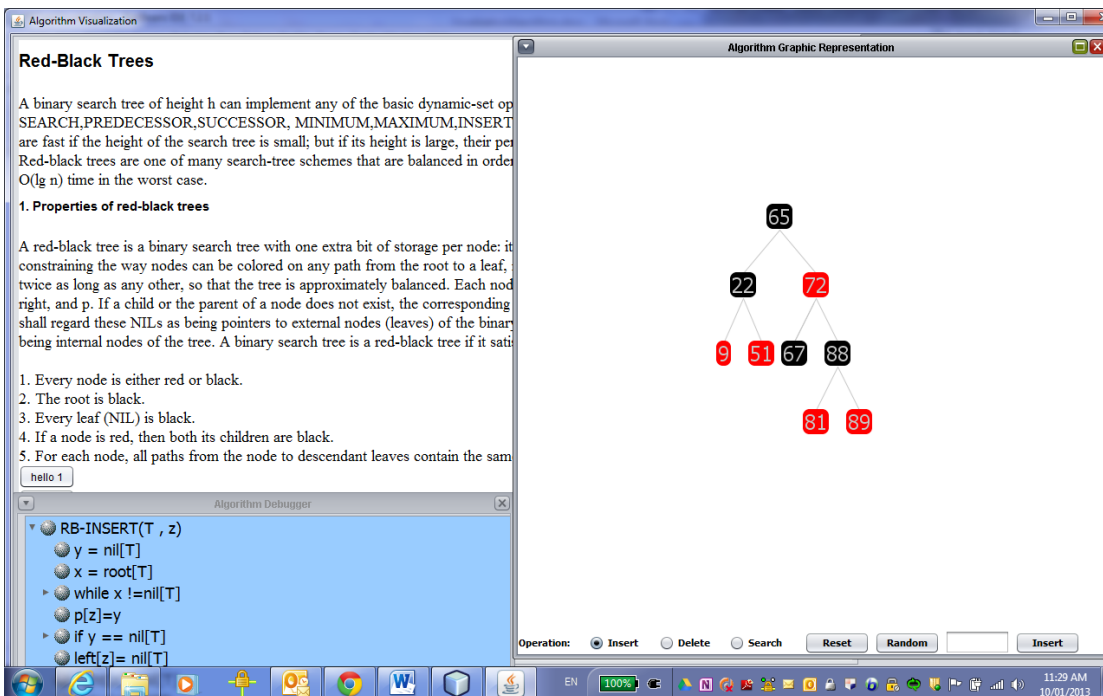
התוכנה מורכבת מחלון אחד, שכולל את כל המרכיבים, המכונה Algorithm Visualization. בתוך החלון אנו מוצאים שני תת-חלונות עיקריים: אחד שרואים בו את הייצוג הגרפי של העץ אדום-שחור, והוא מכונה Algorithm Graphic Representation; שני שמייצג את הפסאודו-קוד של האלגוריתם ואת ריצתו, והוא מכונה Algorithm Debugger.



אם גוררים את שני החלונות למטה, אפשר לראות ברקע את ספר הלימוד. מצד ימין יש חלון צר עם רשימת ספרים או דפים שאפשר להשתמש כדי לקרוא חומר רלוונטי, ושכותב הפרק או הספר קרא מתוך הדפים שלו לבקשה לויזואליזציה מסוימת (לא הגדרנו ממשק לזה, אבל זה הכיוון המוצע כדי להקל על כותב הספר. הוא בעצם יצטרך לכתוב דפי HTML בעזרת קריאה ב-JavaScript לממשק שלנו כדי לבקש ויזואליזציה מסוימת מהתכנה שלנו). החלון עם טקסט הספר הוא בעצם דפדפן של דפי אינטרנט, שיכולים להימצא לוקלית במחשב או באתר מרוחק כלשהו. אפשר לקבוע אילו דפים יהיו בחלון הצר הימני (כרגע הדפים בו קבועים).

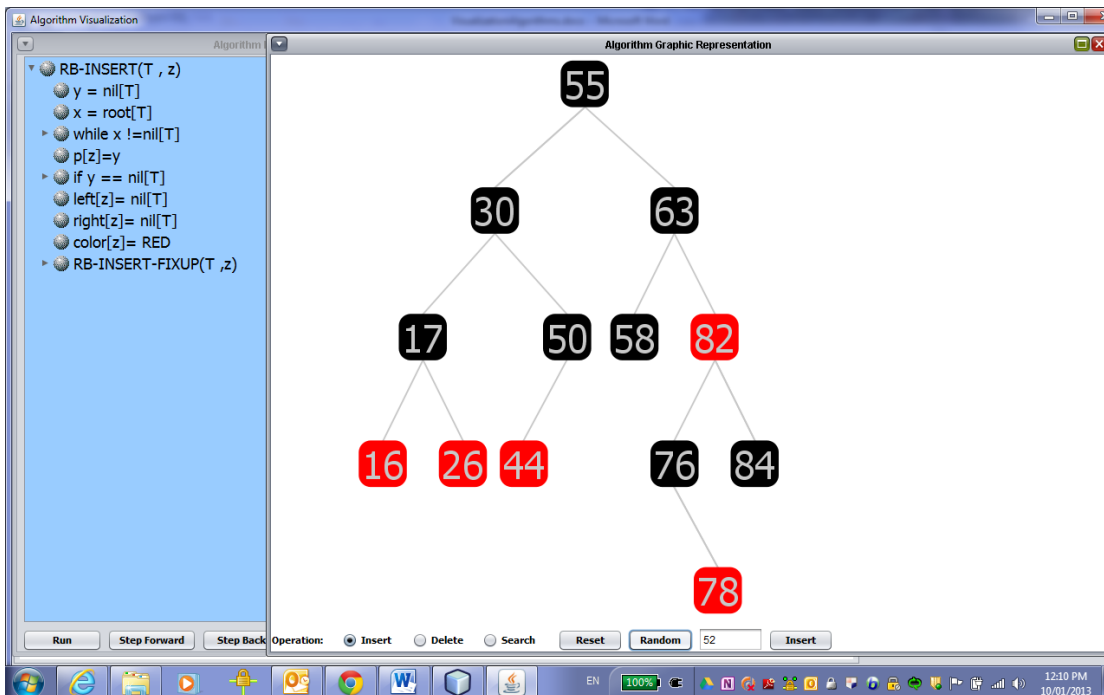


בתוך הספר יהיו כפתורים שלחיצה עליהם תציג ויזואליזציה הקשורה לאותו הסבר בטקסט. ביצענו הוכחת יכולת לכך, אבל לא השלמנו את המימוש לכל פרק הלימוד.

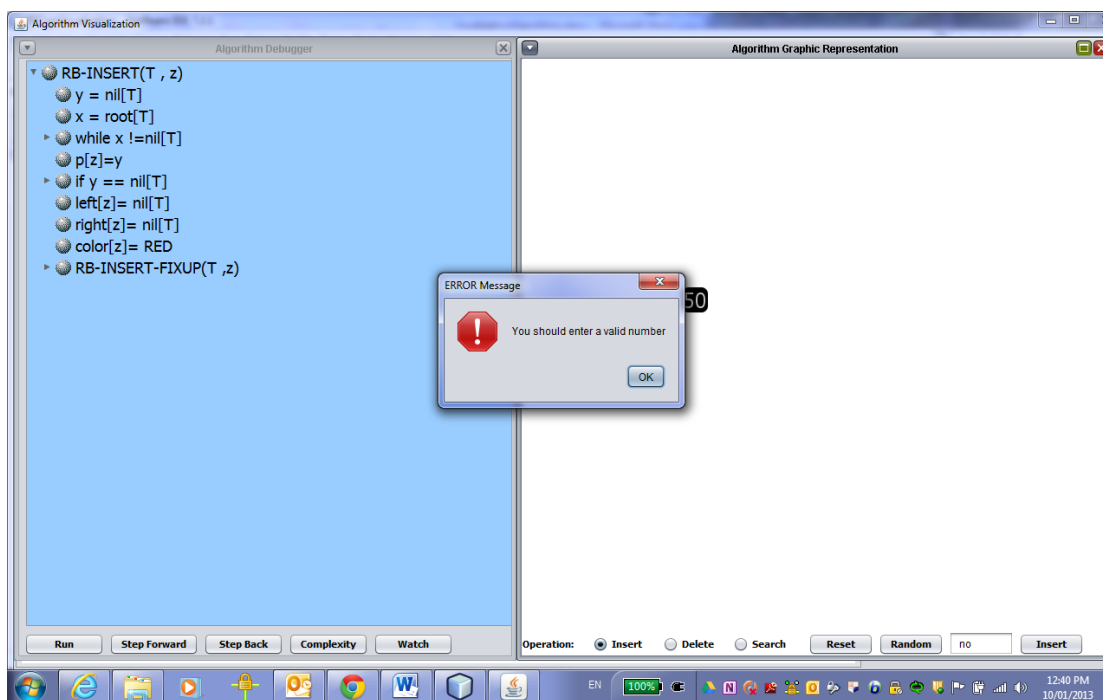


לפי מה שציינו קודם, בחלון ה-Algorithm Graphic Representation אפשר לראות את ציור העץ האדום-שחור עם כל הצמתים והערכים שלו והצבע המתאים של כל צומת. אפשר להיזז את העץ בתוך החלון ולהגדיל או להקטין אותו. בתחתית החלון אפשר לבחור את הפעולה הנדרשת (Insert, Delete and Search). פעולות הוספה ומחיקה ממומשות לחלוטין. פעולת החיפוש טריוויאלית, ולכן אינה ממומשת.

לבחירת ערך של צומת כדי להוסיף או למחוק אפשר להוסיף ידנית את ערכו לשדה הטקסט הקיים או לחלופין ללחוץ על כפתור "Random" כדי שייצור מספר אקראי חדש בטווח של 0-99, והוא יופיע בתוך שדה הטקסט. אחרי שנבחר המספר, יש ללחוץ על כפתור "Insert" או לחלופין ללחוץ Enter בתוך שדה הטקסט. כפתור ה-"Reset" מוחק את העץ לחלוטין, ומאתחל את ריצת האלגוריתם (אפשר לעקוב אחריו ולצפות בחלון ה-Algorithm Debugger). את חלון Algorithm Graphic Representation אפשר להקטין או להגדיל, וגם אפשר לסגור אותו (אי אפשר לשנות את גודלו של החלון השני).

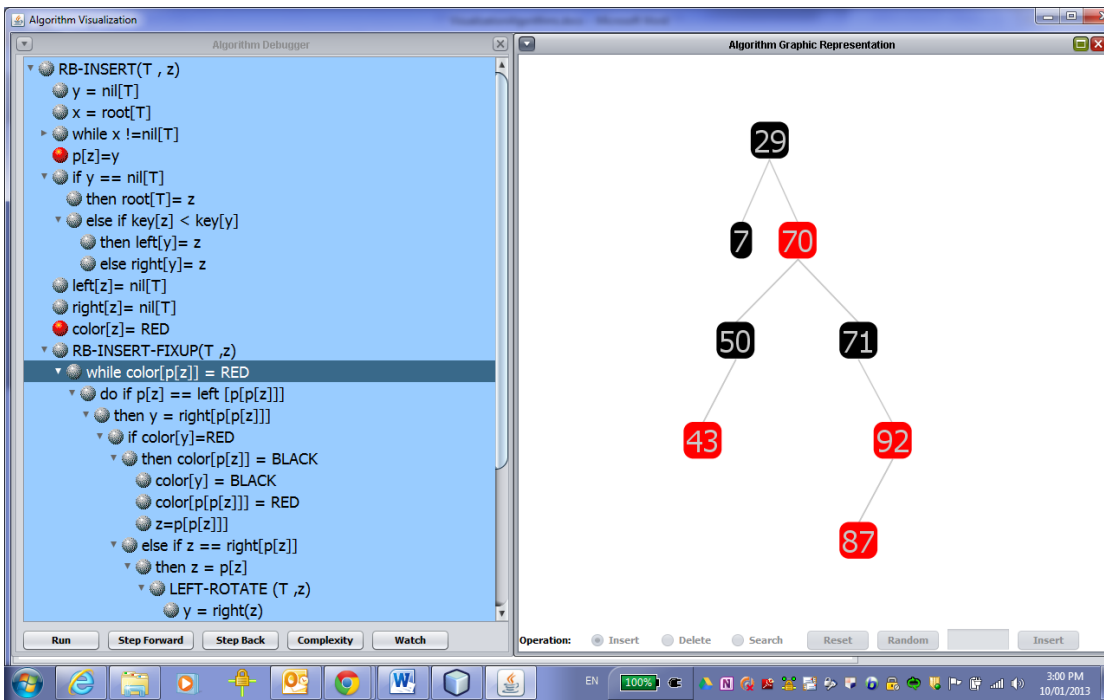


במעברים בין המצבים בעץ אפשר לצפות לאט באמצעות אנימציה, שעובדת עם תנועה לינארית לכל צומת ממקום הימצאותו למקום החדש, וגם צבע הצומת משתנה בהדרגה באותה מהירות (את מהירות התנועה אפשר לשנות, אבל כרגע אין המשתמש עצמו יכול לעשות זאת). הודעה מופיעה כאשר המשתמש מנסה להוסיף מספר שכבר קיים. הודעת שגיאה מופיעה כאשר המשתמש מנסה להוסיף מספר לא חוקי (במקרה שיש רווחים בהתחלה או בסוף התוכנה כן מקבלת את המספר). חשוב לציין שבאמצע הריצה כל הלחצנים מנוטרלים כדי למנוע עוד בקשות באמצע הפעולה. אם ננסה למחוק צומת לא קיים, נקבל הודעת שגיאה מתאימה.



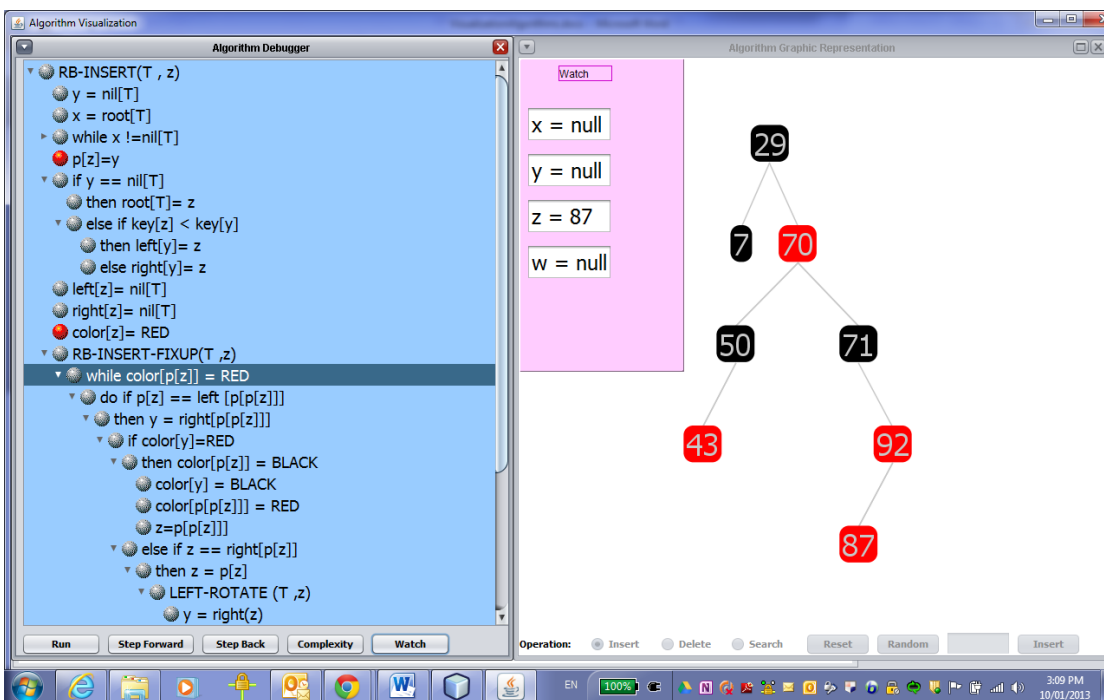
נדון כעת בפונקציונליות שחלון Algorithm Debugger מספק. כמו שכבר אמרנו, פסאודו-קוד מופיע בו (אותו אחד השייך לפעולה שנבחרה בחלון Algorithm Graphic Representation). אפשר להציג את הלולאות או את תת-הפונקציות שלהן או להסתירן על ידי לחיצה על החץ המצביע על השורה. על ידי שתי לחיצות על שורה מסוימת אפשר להוסיף breakpoint באותה שורה. כדי להסיר את ה-breakpoint די ללחוץ שוב על אותה שורה. אפשר בנקל לראות אם שורה מסוימת כוללת breakpoint או לא, כי השורה מסומנת בכדור אדום בצד. מהכפתורים למטה "Step Back" ו-"Complexity" הם לא ממומשים.

"Step Back" מעניק יותר חווייה של שליטה. יש הכנה טובה בתוכנה למימוש (כל הפעולות והמצבים תוך כדי ריצה נשמרים במעין מחסנית). אבל העדפנו להתמקד בפונקציות אחרות החשובות למחקר. כפתור ה-"Complexity" אמור לספק מידע על הסיבוכיות של חלקים בפסאודו-קוד כדי להשלים את התמונה הוויזואלית. לחצן ה-"Step Forward" מבצע ריצה של הפעולה באלגוריתם עד לשורה הבאה המוצגת במסך (הריצה מסומנת בצבע כהה). חשוב גם לציין ששורה הבאה בפסאודו-קוד הוא אינו מופיע תמיד על המסך, והתוכנה מטפלת במקרה הזה. לחצן "Run" מבצע ריצה של האלגוריתם מהשורה שהוא נמצא ברגע נתון עד ל-breakpoint הבא המסומן. בכל מעבר כזה נראה אנימציה שלו בחלון ה-Algorithm Graphic Representation. ואף בשורה שנמצאים אפשר לראות בחלון זה את מצב הביניים של העץ.



כאשר הפסאודו-קוד לא נכנס בחלון, נקבל בצד ימין של החלון אפשרות לגלול למעלה ולמטה לפי הצורך. במצבים שהעצים האדומים-שחורים לא תקינים, יסייע החלון מאוד להבין את אופן פעולתו של האלגוריתם.

באשר ללחצן ה-"Watch", הוא אינו מופיע בוויזואליזציות שסקרנו, ואנו סבורים שמסייע רבות לעקוב אחרי הנעשה באלגוריתם. הוא פותח חלון קטן, ובו סיכום הערכים של המשתנים הרלוונטיים למתודה או לתת-המתודה שמריצים ברגע נתון. אפשר לסגור את החלון על ידי לחיצה חוזרת על כפתור ה-"Watch".



3.3 אפיונים חסרים בתוכנה

סעיף זה דן בכל האפיונים של הוויזואליזציה שלא מומשו בעבודה, אבל תיבנה תשתית למימוש בעתיד. כמו כן נסקור אפיונים שלאחר מעשה היינו מממשים בדרך אחרת כדי לשפר את איכות הוויזואליזציה. לאחר מימוש המלא בדרך מסוימת הבנו שדרך זו אינה הטובה ביותר.

להלן הרשימה של האפיונים החסרים:

1. Step Back (צעד אחורה)

יכולת זו קיימת ברמת העיקרון בתכנה (כל ההיסטוריה של כל הצעדים שנעשו קדימה נשמרת לצורך תנועה אחורה) אבל לא מומשה מימוש מלא. לחיצה על הכפתור הקיים אינה מבצעת שום פעולה.

2. Complexity (ניתוח סיבוכיות)

כוונת הפונקציונליות הזאת הייתה לספק תמונה מוחשית של ניתוח הסיבוכיות של קטע מסוים של האלגוריתם. על ידי הלחיצה הפעיל חלון הקוד של האלגוריתם את ניתוח הסיבוכיות. ולאחר מכן לפי אזור הלחיצה בחלון הוצגה הסיבוכיות של אותו קטע קוד. פונקציונליות זו נצרכת על מנת לתמוך בהבנה, וקשה למצוא אותה בוויזואליזציות הקיימות כיום.

3. פעולת חיפוש

פעולת חיפוש היא פעולה טריוויאלית, שזהה לחלוטין לפעולת חיפוש בעצים בינריים, ולכן לא ראינו צורך במימושה. ההנחה היא שמבינים את אופן הפעולה של עצים בינריים (הפשוטים בהרבה מעצים אדומים-שחורים). גם אילו ביקשנו לספק ויזואליזציה, היינו בוחרים לצבוע את הצמתים שהאלגוריתם מטייל בהם בשעת חיפוש.

4. השלמת טקסט הספר והוספת ויזואליזציות לספר

התחלנו לנסות להוסיף את הוויזואליזציות לספר במקום המתאים להן. אחרי כן חשנו שיש ניתוק בין המתבצע בתוך הספר לבין מה שקורה בחלונות הוויזואליזציה. הגענו לפשרה, ולפיה מהספר אפשר להפעיל ויזואליזציות בעזרת כפתורים בשעת בחירת הקלט ולראות את הדבר קורה בחלון הוויזואליזציה. לא מימשנו את זה, אך היכולת קיימת בזכות הוספת כפתור בתוך הספר (שכולו מבוסס על HTML), והוא מפעיל את הפעולה בתוך התוכנה (כרגע רק מדפיס ב- Console Debug)

5. Help (עזרה והסברים)

יש צורך להסביר כל אחת מהפעולות שניתנות לביצוע בוויזואליזציה. מצד אחד ממשק כזה מתבקש, אך מצד אחר ככל שנצטרך להסביר יותר, נגיע למסקנה שהממשק שבנינו אינו די אינטואיטיבי למשתמש.

6. שמירת היסטוריה

חשוב לראות את הערכים שהוכנסו, והדבר גם יעזור כאשר מאפשרים לטייל אחורה וקדימה בהיסטוריה.

7. סרטון הקדמה אודיו-ויזואלי

סרטון שייתן הקדמה על האלגוריתם ואופן לימודו מצד אחד וסקירה כללית על האפשרויות שהוויזואליזציה מספקת מצד אחר (שוב, אם נצטרך להסביר יותר, סימן שהכלי פחות נוח לשימוש).

8. שאלות ותשובות אינטראקטיביות (ויזואליזציה של תרגילים ופתרונם) ממכלול מאמצינו להשאיר את המשתמש מעורב הוספנו במקומות מסוימים שאלות הכוונה אינטראקטיביות.

9. ויזואליזציה של הוכחות ומעבר צעד אחר צעד בתוכן אחד הדברים המורכבים הם הוכחות הולמות ונוסחאות. כדי להקל את ההבנה היה רצוי לאפשר מעבר בין צעדי ההוכחה בליווי הסברים וויזואליזציה שתסכם את הדברים.

10. שאלות סיכום ומשוב באשר לדרגת ההבנה שהושגה אחד הדברים הקשים ללומד הוא להעריך אם נושא מסוים הובן. בסוף כל נושא נוכל להוסיף שאלות מסכמות, שיתנו אומדן ללומד עד כמה הבין את חומר הלימוד.

את צורת הצגת הקוד הממש את האלגוריתם היה טעות להציג כמו אלגוריתם אחד שהוכנסו בו תת-מתודות. היינו צריכים להציג את התת-מתודות רק שנכנסים אליהן ובתור קוד נפרד שקופצים עליו. ולא, יהיה בלתי אפשרי בעתיד לממש אלגוריתמים הפועלים בצורה רקורסיבית (זה מה שקרה לנו גם בפעולת החיפוש. בגלל הסיבה הזאת לא השתמשנו במימוש הרקורסיבי שלו).

3.4 החלטות ומסקנות בעקבות המימוש

קודם שמקבלים את ההחלטה ליישם ויזואליזציה של אלגוריתם מסוים, עלינו לשאול את עצמנו שאלות גורליות באשר להצלחתו ולתרומתו של הוויזואליזציה ללמידה. עלינו להגדיר היטב את מטרת הוויזואליזציה: האם היא נוצרה לצורך עזר לשיעור, השלמה לספר לימוד, מקור עיקרי ללמידה? מטרתנו היא בבירור ליצור ויזואליזציה שתהפוך למרכז הלימוד וכלי עיקרי שלו. בנוגע לנושאים האלה נסביר את חשיבותם ואת הקושי שנתקלנו באשר להם: 1. תכנון הוויזואליזציה; 2. שפת תכנות של הוויזואליזציה; 3. סביבת פיתוח; 4. בחירת ספרייה גרפית; 5. סביבת כתיבת הספר שתקל את החיבור עם הוויזואליזציה.

3.4.1 תכנון הוויזואליזציה

בתכנון הוויזואליזציה נרצה להיות בטוחים שהבאנו בחשבון מראש את כל הפונקציונליות שאנו מעוניינים לספק כדי שכאשר נבקש לממש פונקציונליות מסוימת, לא נגלה שהחלטת מימוש שלנו הייתה מוטעה, ובגינה נאלץ לממש מחדש חלקים של הוויזואליזציה. טעות זו קרתה לנו במספר מקרים:

א. די מקובל שני מבטים על הוויזואליזציה שהם מתואמים – אחד עם הפסאדו-קוד ואחד עם הייצוג גרפי. עשינו טעות בכך שבחלון הפסאדו-קוד מימשנו בעצמנו את המבנה ההיררכי של המתודות, תת-המתודות, הלולאות וכולי במקום להשתמש ב-Control קיים של השפה (במקרה כזה מצאנו לאחר מכן שאפשר להשתמש ב-JTree לצורך הפשטה). ההחלטה על הסביבה והשפה של אופן מימוש הפונקציונליות

אמורים לבוא יחדיו. יש לראות שבשפה שבחרנו אפשר לממש דברים, ושאינו אננו משקיעים יתר על המידה כדי להשיג את המטרה. השקעה גדולה בשלב התכנון חוסכת זמן רב בסוף. טעות שעשינו באשר לחלון הייצוג הגרפי הייתה לנסות לממש את הגרפיקה לחלוטין בעצמנו. אחרי זמן נוכחנו לדעת או שעלינו לוותר או שעלינו להשקיע רבות בגרפיקה, בתנועות, בהגדלת צורות ובהקטנתן, ויש צורך בעיסוק רב בגאומטריה. האמת שגם להשתמש בספרייה גרפית לא היה קל ודרש הרבה מאמץ, אבל זה הדבר הנכון לעשות מהתחלה.

ב. תנועה אחורה. לא תכננו מלכתחילה לממש את זה, ושעשינו זאת, הצטערנו לגלות שעלינו לעשות שינויים רבים כדי לשמור את ההיסטוריה של המצבים ולטייל ביניהם קדימה ואחורה.

3.4.2 שפת התכנות של הוויזואליזציה

בחירת שפת התכנות של הוויזואליזציה היא החלטה חשובה מאוד להצלחה ואין להתייחס אליה כהחלטה טכנית. רוב הוויזואליזציות שקיימות כיום הן ב-Java. זו שפה נוחה, לא תלויה בפלטפורמה, ויש ספריות רבות שאפשר להשתמש בהן כדי שלא להמציא את הגלגל מחדש. תוך כדי המימוש גילינו ש-Java אינה מתאימה לוויזואליזציה כמו שנראה, ואולי זו הסיבה שליצור ויזואליזציות כיום הוא מלאכה קשה. סביבות ליצירת ממשק משתמש הן אינן הצד החזק של Java (NetBeans נראה המתאים ביותר לכך), ולא היה קל למצוא ספרייה גרפית נוחה לכתובת הוויזואליזציות (לא בטוח שיש בכלל בשפות אחרות). לשלב כתיבת ספר עם ויזואליזציה ב-Java התגלה לא הדבר הנכון לעשות. שפת Web הרבה יותר מתאימה. אפשר ליצור פסאודו-קוד ולצפות בוויזואליזציה בקלות רבה יותר בשפה המבוססת על Script. ההחלטה נפלה על Java גם בגלל עצם הכרת השפה. ניסינו להשתמש ב-Google Web Toolkit (<https://developers.google.com/web-toolkit>), שבעצם מתרגם ב-JavaScript. השקענו זמן רב בלמידת הסביבה, אך היה לנו קשה ליצור גרפיקה מספקת בלי להיכנס לעקומת למידה של ממש של הסביבה הזאת, ולא יכולנו ליצור גרפיקה בלי לכתוב ב-JavaScript.

ב-Java גם יכולנו להיעזר ב-Controls כדי ליצור את הוויזואליזציה בנקל רב, אבל לא כולם בחינם, ויש שוב להתחשב בעקומת הלימוד כדי להשתמש בהם. ליצור ויזואליזציות יעילות דורש ידע בנושאים תכנותיים השייכים לגרפיקה ולממשק. JavaFx <http://www.oracle.com/us/technologies/java/fx/overview/index.html> נראה, בלא ספק, התוכנה שחיפשנו – היא מאפשרת לכתוב ב-Java, יש אפשרות לגרפיקה מתקדמת, הממשק קל למימוש, יש תמיכה ב-scripts, והיא כוללת אנימציות. אחרי קריאה על הסביבה וכמה ניסיונות נוכחנו לדעת שכל הסביבה גרפית עוד לא יצאה (JavaFx 2.0), וגם העתיד של הטכנולוגיה הזאת לוט בערפל לעומת ה-HTML5 המתפתח.

3.4.3 סביבת פיתוח

גם החלטה זו תלויה במטרת התוכנה. הממשק חשוב מאוד בוויזואליזציות, ולכן נצטרך להשתמש בסביבה המתאימה לכך. התחלנו ליצור אותה ב-Eclipse, הואיל וכבר השתמשנו בו. אך לבסוף מצאנו את עצמנו לומדים איך להשתמש ב-NetBeans, שבלא ספק עולה ביכולותיו לצורך מימוש ממשק.

3.4.4 ספרייה גרפית

חיפוש ספרייה גרפית מתאימה, לימוד הממשק שלה ואופן השימוש, קל וחומר שיש צורך לשנות את הקוד שלה לפי הצרכים, יכולים לתסכל קמעה. אי אפשר בנקל להוריד את כל הספריות שנמצאות ב-Java וללמוד אותן, אך אם לא נעשה זאת, לא נוכל להעריך אם מצאנו את הספרייה המתאימה. אחרי כמה וכמה ניסיונות כושלים ניסינו את Prefuse (<http://prefuse.org>), שמספק תשתית רחבה בשפת Java ליצירת ויזואליזציות ואנימציות ומבני נתונים כמו גרפים, עצים וטבלאות ויזואליזציה של הנתונים. תוכנה זו נכתבה במסגרת כתיבת דוקטורט. אפשר למצוא יותר מידע במקור [27]. לצערי, גם שימוש בספרייה זו לא העניק פתרון כולל. ניסינו להשתמש בו לעץ הפסאודו-קוד. אך הדבר לא היה כדאי מבחינת ההשקעה, ולבסוף היה נראה הרבה יותר פשוט להשתמש ב-JTree. השתמשנו ב-Prefuse רק לייצוג עץ אדום-שחור. ריווחנו את הסידור האוטומטי של הדרגות בעץ, את המרחקים ביניהם, את האנימציה בין שינוי מצבים והגדלתה/הקטנתה/הזזת העץ. יש גם אפשרויות אחרות שניתנות למימוש, כמו לחיצה על הצומת, באופן שאפשר לצפות בתוכנו (מימשנו דוגמה הנמצאת בהערות בקוד, אבל לא הוספנו את זה לוויזואליזציה).

הקשיים שהיו נבעו מכך שלא היה מימוש של עץ בינרי. גם עץ לא יכול להיות שלא מקושר בשום שלב, ואנימציה עובדת היטב רק כשקודם מוחקים את הצמתים הנצרכים או מוסיפים חדשים. אחרי כן יש למחוק את הקשתות המקשרות בין שני צמתים, להוסיף את הקשתות החדשות, ולבסוף לשנות את הצבעים שהשתנו. אחרי כל זה אפשר להפעיל את האנימציה ולצפות בתנועה הלינארית שכל צומת הולך למקומו (אפשר בנקל לקבוע את מהירות האנימציה). כדי לאפשר את השלבים האלה היה צורך באלגוריתם לא פשוט, שישווה בין שני עצים אדומים-שחורים ויספק את רשימת כל השינויים בין העצים. האלגוריתם תוכנן ומומש לצורך הזה, ולא מצאנו לנכון לתאר אותו כאן למרות הסיבוכיות שלו. (אפשר לעיין בתוך הקוד ובהערות שבו בתוך `com.rbtrees.logic` ב-Class המכונה `RBTreeSnapshotManager`, מתודת `createSnapshotDelta`).

3.4.5 סביבת כתיבת הספר האלקטרוני

כיום דבר פשוט כמו כתיבת טקסט נהפך למשימה שדורשת סביבה לבחירת פונטים, גודל, עימוד, הדגשה וכולי, בקיצור מעבד תמלילים. אך אפשר להכניס במעבד קוד שיבצע פעולות (ויזואליזציה במקרה שלנו). הבחירה האופטימלית היא טכנולוגיית Web, הווי אומר HTML. היות והחלטנו להשתמש בשפת Java, חיפשנו שילוב של Java ב-HTML, ונוכחנו לדעת שאפשר לקשר ביניהם בנקל. הקושי היה בדפדפן. הדפדפן שהוא חלק מ-Java פרימיטיבי ביותר ביכולות ה-HTML שלו,

ויש צורך לשלב דפדפן חיזוני. זאת לא עשינו לצורך העבודה, ולכן גם לא כתבנו את כל פרק הספר. הגענו למסקנה שכיום הבחירה הנכונה היא HTML5, ואפילו ספריית כמו Prefuse שראינו קודם הן עכשיו בתהליך מימוש מחדש ב HTML5.

3.5 לקחים ומסקנות

בעקבות עבודת המימוש ותהליך בניית הוויזואליזציה של העצים האדומים-שחורים הגענו לכמה מסקנות ולקחים כדלהלן:

- א. ליצור ויזואליזציה עם הכלים שברשותנו היום הוא אכן מלאכה קשה. אחת המסקנות החשובות היא שלא ליצור אותה כלל אם לא מוכח שהאלגוריתם אכן קשה להבנה ונקבל תועלת לימודית מהוויזואליזציה.
- ב. גם אם השתכנענו שהמאמץ כדאי, נדרשים מאמץ לתכנון הוויזואליזציה ולמידה של כל הספריות שנשתמש כדי להקל על העבודה. לא כדאי להתחיל שום עבודת פיתוח עד שכל הפרטים ברורים, ולא נצטרך לבסוף לערוך שינויים רבים.
- ג. צריך לוודא עד כמה שאפשר שחומר הלימוד שמתבססת עליו הוויזואליזציה אכן מדויק, ולא נאלץ להשקיע מאמץ רב בלמצוא מה לא נכון בו. נתקלנו בקושי זה במימוש האלגוריתם מספר הלימוד שהשתמשנו [30] בשני מקומות. בדף 236 של הספר בפסאודו-קוד של הפעולה RB-INSERT_FIXUP באלגוריתם בשורה 12 חסרה מילת else, ושורות 12, 13 ו 14 הם בתוך ה-else. גם אם השיקול הוא של כתב הספר, הדבר מבלבל למדי, וחבל. אותו קושי קיים בדף 243 בפעולת RB-DELETE-FIXUP של האלגוריתם. בשורה 17 גם היה עוזר אילו הוסיפו else.
- ד. יצירת ויזואליזציות דורשת מיומנויות פיתוח בתחום של ממשק משתמש, גרפיקה ואנימציות. אם אין ניסיון בתחומים האלה, תהיה עקומת הלמידה גדולה, וזמן סיום הוויזואליזציה יתארך בהרבה.
- ה. אף על פי שהשימוש ב-Java נפוץ ביותר, ובעיקר באקדמיה, מומלץ להוביל שינוי לכיוון טכנולוגיות ה-Web ו-JavaScript 2.0. הדבר יפתח לנו אפשרות לשילוב טבעי יותר של ספר הלימוד ויכולות אנימציה גבוהות. הדבר גם יאפשר לנו אפשרות ליצור בנקל פסאודו-קוד ולעצור אותו בנקודת ריצה מסוימת תוך כדי הוויזואליזציה של המצב החדש והמעבר בין המצבים, הואיל ומדובר בשפה מבוססת סקריפט. יכולות התקן החדש של HTML5 גם מספקות את כל היכולות של מעבד תמלילים של HTML ושילוב קל של חומר אודיו-ויזואלי. הסיבה העיקרית שלא השתמשנו מלכתחילה בטכנולוגיה זו היא עקומת למידת השפה וסביבת פיתוח כמו גם מפאת החשש שמא הטכנולוגיה עוד לא די בשלה (בשנתיים שהעבודה נמשכה התפתחה טכנולוגיה זו התפתחות מדהימה). בשל התמיכה של HTML5 במכשירים ניידים והתנועות הניתנות במסך מגע נוצרת תשתית מעולה להרצת הוויזואליזציות בכל מכשיר ובכל מערכת הפעלה בלא יוצא מן הכלל כל עוד יש בו דפדפן מתאים, ואפשר להניח זאת. לא נכון ש-Java לא תרוץ כלל ב-iPads וב-iPhones, למשל.

- ו. לא לנסות לממש את הגרפיקה בעצמכם. יש להשתמש בספריות קיימות לצורך זה. ליצור גרפיקה ואנימציות היא מלאכה קשה גם אם לא נראית כך מלכתחילה.
- ז. אם יש צורך לשנות את הקוד עצמו של ספרייה שמצאתם, זו סיבה מספקת כדי שלא להשתמש בה. לא כדאי להיכנס להרפתקה הזאת, אלא אם כן משוכנעים מאוד שהשינוי יועיל גם להמשך יעיל של העבודה. גם רצוי לבדוק אם יש די הסברים איך להשתמש בספרייה, אם יש מגבלות כלשהן, ואם ניתנו דוגמאות שאפשר להריץ ולהבין בעזרתן בנקל, ולא אחרי כל ההשקעה עלולים לגלות תוך כדי עבודה שהספרייה לא הייתה מתאימה. הדבר נכון גם באשר לכפתורים ולא למנטים של ממשק המשתמש. אין לנסות לבנות אותם לבד.
- ח. למרות החשיבות להשתמש בכלים ובספריות קיימות כיום אי אפשר למצוא תשתיות של ויזואליזציה גמישות למדי, קלות לשימוש, ושמשלבות את כל הפרמטרים שנצרכים לוויזואליזציה מוצלחת, כמו שהראנו בעבודה הזאת. עם כל זה, ובנימה חיובית, אפשר לומר שאנחנו בזמן של התפתחות מסיבית של טכנולוגיות שיהפכו את הוויזואליזציות לכלים העיקריים ללמידת אלגוריתמים ונושאים אחרים במדעי המחשב.

4 סיכום וכיוונים להמשך

כיום ויזואליזציות הם לא בשימוש ברוב הקורסים באלגוריתמים בעולם. אך כמו שהראנו בעבודה זו יש הצלחות בתחום, ואוניברסיטאות מסוימות משתמשות בכלי זה כחלק אינטגרלי של הלימודים. בכל מקרה ואף על פי שעדיין השימוש לא מסיבי, נראה נכון להניח שאילו היה אפשר ליצור בנקל ויזואליזציות איכותיות (לפי הקריטריונים והאפיונים שהסברנו) ולשלבן בספר הלימוד בטבעיות, היו סטודנטים ומלמדים משקיעים מזמנם ליצור את אותן הוויזואליזציות ולהשתמש בהן. הצגנו את כל האלמנטים שאותן הוויזואליזציות אמורות לכלול כדי למקם אותן במרכז הלמידה. למסקנות האלה הגענו אחרי עיון במאמרים שהבאנו, אבל בעיקר על ידי התנסות בפועל ביצירת ויזואליזציה של אלגוריתם הנחשב לא קל להבנה – עצים אדומים-שחורים – ומימשנו את רוב האפיונים המקובלים כיום בוויזואליזציות. חוינו את הקושי, את השקעת הזמן שדרושה ואת כל מה שכרוך בפיתוח תוכנה. אילו היינו עוצרים במצב זה את ההתפתחות של הכלים הטכנולוגיים הרלוונטיים שברשותנו היום ליצירת ויזואליזציות של אלגוריתמים ולשימוש בהן, נראה שחוץ מלפתח עוד ועוד ויזואליזציות טובות ולעבוד קשה כדי לשלבן קורסים, אי אפשר לעשות הרבה יותר. ספק אם ניתן להפוך אותן לכלי עיקרי ללמידה. אך, למזלנו, כלים טכנולוגיים אלו עוברים מהפכה של ממש בשלוש השנים האחרונות. להלן שלושת תחומי המפתח:

1. מכשירים ניידים

מכשירים ניידים מספקים גמישות בזמן ובמקום באופן שאפשר לקבל מידע ולתקשר עם אחרים. ראה מקור [8]. היכולות המתקדמות של המכשירים האלה - כמעט אין דבר שאפשר לבצע במחשב אישי שאי אפשר שלא לבצעו במכשיר נייד, ובהרבה דברים ההפך הוא הנכון. התאמת גודל מסך לסוג השימוש, פיתוח רשתות סלולריות ונגישות לרשתות אלחוטיות (WiFi) הולכים ונפוצים. בזכות התפשטות המכשירים בקרב האוכלוסייה

(נפוצים יותר ממחשבים) הם נעשים הפלטפורמה האידאלית לוויזואליזציות של אלגוריתמים. בשל הממשק המתפתח והטבעי למסכים שבשימוש במכשירים האלה נעשה גם המפגש עם החומר לטבעי יותר. ראו בעניין הזה מקור [9].

2. HTML5, JavaScript ויכולות האינטרנט

יכולות רבות נוספו לשפת JavaScript עם הגרסה 2.0 שלה, ובהן יכולות גרפיות מתקדמות, שמירת נתונים, תמיכה בתנועות על מסכי מגע, ריצת תהליכים מקבילים, שיפור בתור מעבד תמלילים. מסביבה מוגבלת בתוך הדפדפן נעשתה השפה בעלת יתרונות של ממש באשר לשפות תכנות אחרות. עם שילובו והתפתחותו של HTML5 אפשר גם לשלב בנקל מדיה לדפי אינטרנט. עוד יתרון לנושא של ויזואליזציות הוא השילוב הטבעי ביותר לספר הלימוד באמצעות טכנולוגיה אינטרנטית זו (ראה [5]). HTML5 מאפשר, כמובן, פיתוח שירוף בכל פלטפורמה שיש בה דפדפן מתאים (מאוד מקל את הנגישות ועדכון הוויזואליזציות).

3. Web 2.0 ורשתות חברתיות

עם פיתוח דור חדש של שירותים אינטרנטיים (כולל אלה שהבאנו בסעיף 2) מתאפשרים "ייצירה ושיתוף של תכנים המעלים לרשת על ידי הגולשים עצמם" (ראה http://he.wikipedia.org/wiki/%D7%95%D7%91_2.0). בזכות השיתוף החברתי החוויה הלימודית תעשה חברתית. גם יתאפשר לסטודנטים להשתתף ביצירת חומר לימודי ובשיפורו.

בין הכיוונים עתידיים אפשר, כמובן, לראות את מיזוגם של שלושת העמודים שהצגנו בתור טכנולוגיות מפתח לוויזואליזציות של אלגוריתמים, הווי אומר ספר דיגיטלי, אינטרנטי, שכולל ויזואליזציות ואנימציות, שאפשר לשתף ולהשתתף בבנייתו, ושנצרך על ידי מכשיר נייד. על כל אחת מטכנולוגיות מפתח אלו אפשר להעלות כיוונים עתידיים. מקצתם כבר קיימים בפועל. נסקור כמה מהפעילויות ומהמחקרים החדשים בפועל. מקור [28] מציג כלי שמאפשר לכתוב אלגוריתם ב-Python, ואפשר להריץ אותו ואף לעצור את הריצה בכל שורה, להסתכל בערכי המשתנים ולצפות בייצוג גרפי של מבנה הנתונים. כל מה שדרוש מכותב הוויזואליזציה הוא לכתוב את האלגוריתם ב-Python.

כלי זה פופולרי מאוד לאחרונה, והוא בשימוש ביותר מ-25 אוניברסיטאות. כ-16.000 בני אדם משתמשים בו חודשית. כרגע הוא אינו תומך במבנה נתונים מורכב (כמו עצים אדומים-שחורים). אבל נעלה בתור אפשרות לעתיד להוסיף תמיכה לכלי כמו רוב מבני הנתונים הנפוצים (לא רק מערכים ורשומות, אלא גם עצים, גרפים וכולי). הכוונה היא ליצור כלי שיהיה כמו מה ש-Bret Victor מתכוון שהוא מדבר על כלי פיתוח שיאפשר לראות מיד מה תהיה תוצאה של שורת קוד חדשה או את השינוי בתוך שורה בקוד ברגע שנכתב ובצורה גרפית. אפשר לצפות בהרצאה שלו על הנושא ב-<http://vimeo.com/36579366>. בערך בדקה 16 הוא גם נוגע לוויזואליזציות של אלגוריתמים. גם ב-<http://worrydream.com/LearnableProgramming> אפשר לקרוא על

המאמץ שלו ליצור סביבת פיתוח שתעזור להבין את התוכנה שאנו כותבים. לפיתוח כזה תהיה, כמובן, השפעה רבה מאוד על תחום הוויזואליזציות של אלגוריתמים.

בחלק של הספר האינטרנטי מדובר על פרויקט ה-OpenDSA [25], ששם למטרה ליצור ספר מכוון, שיכלול לכל נושא הקשור למבנה נתונים ואלגוריתמים ויזואליזציה מתאימה, אנימציה, שאלות אינטראקטיביות ועוד המון חומר ויזואלי (אפשר לקרוא יותר ולמצוא מאמרים ב-<http://algoviz.org/OpenDSA>). הדבר יהיה התקדמות של ממש לשילוב הוויזואליזציות בספר הלימוד ויאפשר למלמדים לבחור את הספר ולשנותו כרצונם לפי הצרכים שלהם (OpenDSA הוא Open Source, ונבנה מראש עם האפשרות לבחור חלקים מתוך כל המאגר). ביוזמה הזאת חסר, לדעתנו, האלמנט של שיתוף חברתי ובניית חומר בתהליך חברתי. בתשתית שנבנתה אין משולבת בכל מקום בספר אפשרות לדו-שיח לימודי של משתתפי הקורס ושל משתמשי הספר המכוון. היינו מכניסים נושא זה במכלול הפיתוחים העתידיים של הפרויקט הזה. כמו כן בממשק לא הובא בחשבון, לדעתנו, שייתכן שהספר יוצג במכשיר נייד עם כל מה שכרוך בשינוי הממשק (כל התנועות הנתמכות על מסך מגע). לסיום נציע שימוש אינטנסיבי יותר ביכולות של המכשירים הניידים ובממשקים שלהם.

אפשר לצפות ולעיין בפתרון המסחרי שלפני כמה חודשים הציגה ענקית המכשירים הניידים <http://global.samsungtomorrow.com/?p=19204>. הכיתה וסביבת הלימוד עלולים להשתנות מאוד בשנים הקרובות, וכדאי מעכשיו לשלב כל חומר של ויזואליזציות שניצור או כלים של ויזואליזציות כמו אלה שהצגנו, שמראש יתוכננו לרוץ על פלטפורמות אלו. סטודנטים ידרשו עוד ועוד גמישות בכל מקום, בכל מכשיר ובכל זמן. תהליך למידה יתבסס יותר על שיתוף חברתי ועל חיבור של החומר במקום אחד, הספר החדש. מרצים ועוסקים בהוראה יצטרכו כלים נוחים כדי לאפשר את המהפכה הזאת. עוד כיוון עתידי הוא ליצור מסגרת חינוכית וטכנולוגית לשילובם של מכשירים ניידים, ספר מכוון ושיתוף חברתי כדי להפוך את הוויזואליזציות של אלגוריתמים לכלי עיקרי ללימוד אלגוריתמים ומבנה נתונים.

- [1] Pilu Crescenzi and Carlo Nocentini, " Fully Integrating Algorithm Visualization into a CS2 course". "A Two year experience", *ITiCSE'07*, pages 296-300, June 23-27, 2007, Dundee, Scotland, United Kingdom.
- [2] Clifford A. Shaffer, Matthew L. Cooper, Alexander Joel D. Alon, Monika Akbar, Michael Stewart, Sean Ponce and Stephen H. Edwards, "Algorithm Visualization: The State of the Field", *ACM Transactions on Computing Education*, Vol. 10, No. 3, Article 9, Pub. Date: August 2010.
- [3] T. L. Naps, G. Rössling, V. Almstrum, W. Dann, R. Fleischer, C. Hundhausen, A. Korhonen, L. Malmi, M. McNally, S. Rodger, and J. ´Angel Vel´azquez-Iturbide. "Exploring the role of visualization and engagement in computer science education". *ACMSIGCSE Bulletin*, 35:131-152, 2003.
- [4] Clifford A. Shaffer, Thomas L. Naps, Susan H. Rodger, Stephen H. Edwards, "Building an online educational community for algorithm visualization", *Proceedings of the 41st ACM technical symposium symposium on Computer science education*, March 10-13, 2010, Milwaukee, Wisconsin, USA.
- [5] Guido Rössling, Thomas Naps, Mark S. Hall, Ville Karavirta, Andreas Kerren, Charles Leska, Andr´es Moreno, Rainer Oechsle, Susan H. Rodger, Jaime Urquiza-Fuentes, and J. ´Angel Vel´azquez-Iturbide. "Merging Interactive Visualizations with Hypertextbooks and Course Management". *SIGCSE Bulletin inroads*, 38(4):166-181, December 2006.
- [6] Thomas L. Naps, "JHAVÉ – Addressing the Need to Support Algorithm Visualization with Tools for Active Engagement", *IEEE Computer Graphics and Applications*, v.25 n.5, p.49-55, September 2005.
- [7] Cobcroft, Rachel S and Towers, Stephen and Smith, Judith and Bruns, Axel "Mobile learning in review: Opportunities and challenges for learners, teachers and institutions", *Proceedings Online Learning and Teaching (OLT), Conference 2006*, pages pp.21-30, Queensland University of Technology, Brisbane.
- [8] Jeffrey Brand and Shelley Kinash, "An experiment to document learning through mobile technologies", *27th Annual Conference of the Australian Society for Computers in Learning in Tertiary Education (ASCILITE)*. Sydney, Australia, December 2010.

- [9] Sergi Jorda, Carles F. Julia and Daniel Gallardo, "Interactive Surfaces and Tangibles", *Crossroads The ACM Magazine for Students*, Summer 2010, Vol. 16, No. 4, pages 21-28.
- [10] Stasko, J.T., "Tango: A Framework and System for Algorithm Animation", *IEEE Computer* 23, September 1990, pages 27-39.
- [11] Brown, M.H., Sedgewick R, "A System for Algorithm Animation", *Computer Graphics*, July 1984, pages 177-186.
- [12] Mary Hegarty, "Dynamic Visualizations and learning: getting to the difficult questions", *Learning and Instruction*, 14, 2004, pages 343-351.
- [13] Jaime Urquida Fuentes, J Angel Velazquez Iturbide, "Comparing the Effectiveness of Different Educational Uses of Program Animations", *ITiCSE'12*, July 2012, pages 174-179.
- [14] V. Karavirta, A. Korhonen, J. Nikander, P. Tenhunen, "Effortless Creation of Algorithm Visualization", *Kolin Kolistelut – Koli Calling*, 2002, pages 52-56.
- [15] Myles McNally, Thomas Naps, David Furcy, Christian Trefftz, Scott Grissom, "Supporting the rapid development of pedagogically effective algorithm visualizations", *JCSC* 23, 1, October 2007, pages 80-90.
- [16] Ming-Han Lee, Guido Robling, "Integrating Categories of Algorithm Learning Objective into Algorithm Visualization Design: A Proposal", *ITiCSE'10*, June 2010, pages 289-293.
- [17] Thomas Naps, Guido Robling, Jay Anderson, Stephen Cooper, Wanda Dann, Rudolf Fleischer, Boris Koldehofe, Ari Kohonen, Marja Kuitinen, Charles Leska, Lauri Malmi, Myles McNally, Jarmo Rantakokko, J. Rockford, Ross, "Evaluating the Educational Impact of Visualization", *ITiCSE 2003*.
- [18] Christian Dalsgaard, "Social Software: E-learning beyond learning management systems",
http://www.eurodl.org/materials/contrib/2006/Christian_Dalsgaard.htm.
- [19] Cobcroft, Rache S and Towers, Stephen and Smith, Judith and Bruns, Axel (2006) "Mobile Learning in review: Opportunities and challenges for learners, teachers and institutions", *Proceedings Online Learning and Teaching (OLT) Conference 2006*, pages 21-30, <http://eprints.qut.edu.au>.
- [20] Luis Miguel Serrano Camara, Maximiliano Paredes Velasco, J. Angel Velazquez-Iturbide, "Evaluation of a Collaborative Instructional Framework of Programming Learning", *ITiCSE'12*, July 2012, pages 162-167.

- [21] Nikolai Tillman, Michal Moskal, Jonathan de Halleux, Manuel Fahndrich, Judith Bishop, Arjmand Samuel, Tao Xie, "The Future of Teaching Programming is on Mobile Devices", *ITiCSE'12*, July 2012, pages 156-161.
- [22] Anderson L.W, Krathwohl D.R, *A Taxonomy for Learning, Teaching and Assessing: a Revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives*, Abridged Edition, 2001, Longman, New York.
- [23] C.Nocentini, *ALVIE:Un Ambiente di Visualizzazione di Strutture di Dati e di Algoritmi Basato su Tecnologia XML*, Universita degli Studi di Firenze, 2006, Italy.
- [24] Jaime Urquiza Fuentes, J. Angel Velazquez-Iturbide, "A Survey of successful evaluations of Program Visualizations and Algorithm Visualizations Systems", Universidad Rey Juan Carlos, *ACM Transactions on Computing Education*, Vol. 9, No 2, Article 9, June 2009.
- [25] Clifford A. Shaffer, Ville Karavirta, Ari Korhonen, Thomas L. Naps, "OpenDSA:Beginning a Community Active e-Book project", *ACM*, November 2011, Finland.
- [26] Clifford A. Shaffer, Thomas L. Naps, Eric Fouh, "*Truly Interactive Textbooks for Computer Science Education*", Sixth Program Visualization Workshop, June 2011
- [27] Jeffrey Heer, Stuart K. Card, James A.Landay, "prefuse: a toolkit for interactive information visualization", *ACM*, April 2005, Oregon USA.
- [28] Philip J. Guo, "Online Python Tutor:Embeddable Web-Based Program Visualization for CS Education", *Google, SIGCSE'13, ACM*, March 2013, Colorado USA.
- [29] Mei Ki Amy YUNG, *Online Animation for a Programming Language Course*, Supervised by A/Prof. Kim Marriot and Dr. Bernd Meyer, School of Computer Science and Software Engineering – Monash University, [<http://www.csse.monash.edu.au/hons/projects/2000/Amy.Yung/home.html> , 2000].
- [30] Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, Clifford Stein, *Introduction to Algorithms*, Second Edition, The Massachusetts Institute of Technology, 2001.

Table of Contents

2.....	ABSTRACT	
3.....	INTRODUCTION	.1
3.....	BACKGROUND ON THE FIELD OF ALGORITHM VISUALIZATION	.2
4.....	ELEMENTS OF AN EFFICIENT AV.	2.1
5.....	EDUCATIONAL VALUE OF AVS.	2.2
6.....	QUALITY MEASUREMENT OF AN AV.	2.3
7.....	TOOLS TO PRODUCE AN EFFICIENT AV.	2.4
8.....	FINDING AN AV.	2.5
9.....	CONVERT AVS INTO THE MAIN TOOL FOR LEARNING	.3
10.....	KNOWN AND NEW ELEMENTS OF A VISUALIZATION.	3.1
10.....	<i>Graphic algorithm way of acting and states transition animation</i>	3.1.1
11.....	<i>User Control</i>	3.1.2
12.....	<i>Strong Relationship between the visualization and the written text</i>	3.1.3
13.....	<i>Easy Visualization Creation</i>	3.1.4
13.....	<i>Social Collaboration</i>	3.1.5
14.....	<i>Interactivity (Exercises, Q&A)</i>	3.1.6
15.....	<i>m-learning</i>	3.1.7
16.....	RED-BLACK TREES SOFTWARE VISUALIZATION DESCRIPTION	3.2
16.....	<i>Red-Black Trees</i>	3.2.1
16.....	<i>Algorithm Visualization</i>	3.2.2
17.....	<i>Description of the software</i>	3.2.3
22.....	MISSING SOFTWARE ELEMENTS	3.3
23.....	DECISIONS AND CONCLUSIONS FOLLOWING THE IMPLEMENTATION	3.4
23.....	<i>Visualization Design</i>	3.4.1
24.....	<i>Visualization software language</i>	3.4.2
25.....	<i>Developing Environment</i>	3.4.3
25.....	<i>Graphic Library</i>	3.4.4
25.....	<i>eBook writing environment</i>	3.4.5
26.....	LESSONS LEARNED AND CONCLUSIONS	3.5
27.....	SUMMARY AND FUTURE DIRECTIONS	.4
30.....	BIBLIOGRAPHY	

Abstract

Understanding how an algorithm or data structure works is considered one of the main obstacles for students to obtain their graduation on computer science. Our goal is to deepen on how algorithm visualizations may remove or at least help overcome this barrier. We would also like to understand what is required to encourage lecturers to make use of visualizations in a wider way. As part of this final work we developed a visualization of a non-trivial algorithm and we will bring the conclusions we arrived as part of the experience. We will also suggest visual elements that will help on the success of the visualizations. Finally we will analyze which emerging technologies may help to transform the algorithm visualization on the primary tool for the learning activity and we will discuss how.

The Open University of Israel
Department of Mathematics and Computer Science

Algorithm Visualization as a primary tool for learning

Final work submitted as partial fulfillment of the requirements
towards an M.Sc. degree in Computer Science
The Open University of Israel
Computer Science Division

By
Shmuel Chocron
314379215 ת.ת

Prepared under the supervision of Prof. Judith Galezer

May 2013