**Little**

**שפת תכנות, "קומפיילר" ואינטרפרטר.**

|  |  |
| --- | --- |
| שם תלמיד: שחר מרכוס  תעודת זהות: 329545933  שם מורה: שלמה ווקנין  שמות חלופה: Multilang-Code  Minilang  תאריך הגשה: --- | תמונה שמכילה טקסט, גרפיקה, עיצוב גרפי, גופן  התיאור נוצר באופן אוטומטי |



# תוכן עניינים

[תוכן עניינים 1](#_Toc167651108)

[הערות לקורא 3](#_Toc167651109)

[מבוא 4](#_Toc167651110)

[ייזום 4](#_Toc167651111)

[תיאור ראשוני 4](#_Toc167651112)

[הגדרת הלקוח 4](#_Toc167651113)

[יעדים ומטרות 5](#_Toc167651114)

[בעיות, תועלות וחסכונות 5](#_Toc167651115)

[פתרונות קיימים 7](#_Toc167651116)

[טכנולוגיה 7](#_Toc167651117)

[הגבלות 8](#_Toc167651118)

[תחומים ותמיכה 10](#_Toc167651119)

[תיאור המערכת 11](#_Toc167651120)

[אז, מה בדיוק הפרויקט עושה? 11](#_Toc167651121)

[יכולות 19](#_Toc167651122)

[סוויטת בדיקות 20](#_Toc167651123)

[לוח זמנים 22](#_Toc167651124)

[סיכונים 23](#_Toc167651125)

[תיאור תחום הידע 25](#_Toc167651126)

[יכולות 25](#_Toc167651127)

[סוג לקוח: מפתח אפליקציות 25](#_Toc167651128)

[סוג לקוח: לומד תכנות, מתכנת **Little** 31](#_Toc167651129)

[מבנה הפרויקט 36](#_Toc167651130)

[ארכיטקטורה 36](#_Toc167651131)

[רכיבים שונים, והקשרים ביניהם 36](#_Toc167651132)

[טכנולוגיה 37](#_Toc167651133)

[שפת תכנות 37](#_Toc167651134)

[תחומי עניין 38](#_Toc167651135)

[זרימת מידע במערכת 38](#_Toc167651136)

[הקומפיילר 38](#_Toc167651137)

[אלגוריתמים מרכזיים 38](#_Toc167651138)

[קישור בין משתנים למקומות בזיכרון 38](#_Toc167651139)

[חישוב והערכת ביטויים 39](#_Toc167651140)

[**Hashing** 41](#_Toc167651141)

[סביבת עבודה 41](#_Toc167651142)

[פיתוח 41](#_Toc167651143)

[בדיקה 42](#_Toc167651144)

[מימוש הפרויקט 43](#_Toc167651145)

[חלקים ומחלקות 43](#_Toc167651146)

[חבילה – little.lexer 43](#_Toc167651147)

[חבילה – little.parser 44](#_Toc167651148)

[חבילה – little.interpreter 46](#_Toc167651149)

[חבילה – little.interpreter.memory 51](#_Toc167651150)

[חבילה – little.tools 59](#_Toc167651151)

[מחלקות נוספות 64](#_Toc167651152)

[קוד "יפה" ותכנות אלגוריתמים 67](#_Toc167651153)

[קריאה לפונקציות אקסטרניות 67](#_Toc167651154)

[Shunting Yard – השראה 67](#_Toc167651155)

[עיצוב ה-Referrer 75](#_Toc167651156)

[יצירת סוגים אקסטרניים 77](#_Toc167651157)

[בדיקות ותוצאות 85](#_Toc167651158)

[בדיקה ביחידות (Unit Testing) 86](#_Toc167651159)

[בדיקות ידניות 89](#_Toc167651160)

[מדריך למשתמש 91](#_Toc167651161)

[עץ קבצים 91](#_Toc167651162)

[התקנה 93](#_Toc167651163)

[למפתחי תוכנה 93](#_Toc167651164)

[מתכנתים ב-Little 95](#_Toc167651165)

[רפלקציה 97](#_Toc167651166)

[עבודה על הפרויקט 97](#_Toc167651167)

[תובנות 98](#_Toc167651168)

[הסתכלות 99](#_Toc167651169)

[אחורנית 99](#_Toc167651170)

[וקדימה 99](#_Toc167651171)

[תודות 99](#_Toc167651172)

# הערות לקורא

כמו בהרבה נושאים הקשורים למדעי המחשב, עברית לא תמיד מציעה את כל המילים שצריך...  
הנה מילון מושגים קצר, שאשתמש בהם במהלך הפרויקט:

* + טוקן - Token
  + לקסר - Lexer
  + פרסר - Parser
  + קומפיילר - Compiler
  + אינטרפרטר - Interpreter
  + טרנספיילר - Transpiler
  + VM – מכונה ווירטוראלית, Virtual Machine.
  + עץ syntax – AST, Abstract Syntax Tree
* ישנם חלקים בפרויקט המכילים שורות ארוכות במיוחד. מומלץ לקרוא את הספר במצב עמוד אינטרנטי, באמצעות לחיצה על שנמצא בצד ימין/שמאל למטה של חלון הוורד, תלוי בשפה של וורד (בצד הימני לשפות כמו אנגלית, ובצד השמאלי לשפות כמו עברית)

# מבוא

## ייזום

### תיאור ראשוני

הפרויקט הוא שפת תכנות חדשה שהמצאתי, ששמה "Little". הפרויקט כתוב בשפת התכנות Haxe, ומאפשר הרצה של קוד הכתוב ב-Little מצד המשתמש, ובמיוחד מאפשר למפתח המשתמש בפרויקט לאלמנטים באפליקציה שלו לעקוב בקלות אחרי כל אירוע שקורה, ולהוסיף לשפה פונקציונליות צד-שלישי, על מנת לשפר פרודוקטיביות באותה אפליקציה.

קיבלתי את ההשראה להכין פרויקט בסדר גודל כזה משני אלמנטים בספריית תכנות שלי, Texter:

* Parser של Markdown, שגם נותן אופציית ויזואליזציה של הMarkdown
* אלגוריתם החלטת כיוון וסידור טקסט למחרוזות המכילות טקסטים שאמורים לזרום לכיוונים שונים (לדוגמה: אנגלית ועברית, צרפתית וערבית), בכמה שורות/פסקאות שונות.

שני האלמנטים עירבו יצירה והחלטה על Tokens שייצגו את המידע, ומניפולציה על אותם Tokens, על מנת להציג את התוצאה הרצויה (טקסט שמוצג נכון ומסמך בסטייל Markdown, מהמקרים שהוזכרו קודם). כשלמדתי שקומפיילר/אינטרפרטר של שפת תכנות זה, בסופו של יום, אותו הדבר, רק בסדר גודל יותר רציני - התעניינתי, והתחלתי לנסות לתכנת שפה משלי...

ממש בהתחלה, חשבתי שזה יהיה יחסית פשוט – הנחתי שהתהליך יהיה ישיר בערך כמו הדברים שעשיתי בעבר, אבל תוך כדי עשייה, הבנתי שאני הולך להיתקל ביחסית הרבה מכשולים. העיקריים היו:  
 - זריקת שגיאות מובנות ומתאימות להקשר  
 - מערכת סוגים – מה עדיף - מערכת חזקה או מערכת חלשה?  
 - ניהול זיכרון – באילו מבנים אשתמש על מנת לאחסן זיכרון?  
 - וכמובן: איך בכלל מתמודדים עם כמות כזאת גדולה של נתונים, בלי לקחת הרבה זמן?

### הגדרת הלקוח

אפשר להבין ממה שהוזכר קודם, שהפרויקט מעוצב לשני סוגי לקוחות:

* **סוג ראשון: לקוחות רגילים** – אנשים שרק רוצים ללמוד את השפה ולתכנת בה. בשבילם, ישנה חלקה באתר שלי המאפשרת גישה לרוב היכולות של הפרויקט – שינוי מילות מפתח, הרצה של קוד, ואפילו אפשר לראות את ה-AST של הקוד שהקלדת בצורה שנעימה לעיניים
* **סוג שני: מפתחים** – מפתחים שרוצים לכלול יכולות פרוגרמתיות בתוכנה שלהם. בשביל להקל עליהם, הפרויקט מעוצב לפי תבנית הFacade, על מנת לפשט את האינטגרציה עם התוכנה, וגם לאפשר אותה באמצעות פחות "נפח" של קוד. מעבר לזה, הפונקציות העיקריות בפרויקט, מתועדות בצורה אקסטנסיבית ומסבירות בצורה טובה מה הן בדיוק עושות, ואפילו כוללות דוגמאות המראות מה קורה עם קלטים מסוימים.

### יעדים ומטרות

מההתחלה, החלטתי שהפרויקט יכוונן לשתי מטרות, יחסית ספציפיות, אך שימושיות:

* **ראשונה: יצירת שפת תכנות שקל ללמד וגם קל לשנות.** שפה כזאת יכולה בקלות להנגיש לימוד תכנות לילדים, ובמיוחד לילדים שלא בהכרח יודעים אנגלית. כאן לפרויקט שלי יש יתרון מובהק על פני אופציות אחרות זמינות: הפרויקט עוצב תוך כדי התחשבות בריבוי שפות, כך שכל keyword או אלמנט בStandard Library יכול להיות מוחלף על ידי כל מילה אחרת בכל שפה אחרת, דבר שמאפשר לתכנת לא רק בשפה האנגלית, אלא גם בשפות מדוברות אחרות, כמו עברית וערבית.
* **שנייה: שימוש ככלי פרודוקטיביות בתוך תוכנות קיימות** – כמו שהתוכנה Excel מאפשרת לשנות ערכים של משבצות בעזרת קוד הכתוב ב-Visual Basic Analysis, ככה תוכנות המשתמשות בLittle כספרייה יוכלו לספק דרכי אינטראקציה עם התוכנה באמצעות קוד הכתוב בLittle. גם כאן לפרויקט יש יתרון ברור, שכן לא רק שמצד הלקוח, כתיבת קוד בLittle זה דבר קל בגלל הsyntax הפשוט והעקבי של השפה, גם המפתח נהנה, מכיוון שחלק משמעותי מהפרויקט מתרכז בהקלה על הוספת אלמנטים חיצוניים לשפה, וזה יהיה מאוד קל ומהיר לשלב את הפרויקט בתוכנה של המפתח, ויחסוך ממנו המון כאב ראש.

### בעיות, תועלות וחסכונות

כשהתחלתי עם הפרויקט לפני כשנה, היה לי רק רצון אחד שהפרויקט ימלא, שלא קשור בהכרח לתפקוד שלו – **שיהיה אפשר לתכנת בו בכל שפת אם שהיא**. הסיבה לרצון הזה, קשורה לאתר-משחק ששיחקנו בו בבית הספר היסודי, שקראו לו Code Monkey, שבו המטרה היא להזיז קוף לעבר בננות באמצעות קוד, בכמה שפחות שורות. בעיה אחת הייתה לי עם המשחק הזה – הקוד היה באנגלית, ואני הייתי הרבה יותר קטן, ולא ידעתי אנגלית טוב - זה *מאוד* הגביל אותי, כי לקח לי מדי הרבה זמן לזכור מה כל דבר עושה, וככל שהצטברו הפונקציות והתכונות שהיה אפשר להשתמש בהם, המשחק הסתבך יותר ויותר...

על מנת לממש את הרצון שלי עם הפרויקט הזה, עצבתי אותו בדרך מסוימת, ונתתי גישה למגוון מערכות שונות, ולא רק שממשתי את הרצון שלי – לשמחתי, עשיתי הרבה מעבר...

**מערכות:**

* **אוסף מילות מפתח** – על מנת להקל על המְפַתח, ניתנת גישה לכל "מילות המַפְתח" (Standard Library, מילים שמורות), והמְפַתח יכול לשנות מילים ספציפיות, או להחליף בין סטים שלמים של מילים, כדי לשנות את וורבאליות הקוד, או השפה המדוברת בו היא כתובה. מערכת זו ממש הייתה מכוננת למימוש הרצון הראשוני שלי, של הנגשת תכנות לילדים שלאו דווקא יודעים אנגלית. דוגמה של המערכת בפעולה:

**מילות מפתח ערוכות לעברית:** **ברירת מחדל:**

|  |  |
| --- | --- |
| הגדר מס = 13  הדפס({  מס = מס \* 5  אותיות.מקוד\_אות(מס)  }) """ מדפיס: "A" """ | define num = 13  print({  num = num \* 5  Characters.fromCharCode(e)  }) “””prints: “A” “”” |

* **Parser מודולארי** – על מנת להוסיף על יכולות המערכת הראשונה, הParser של השפה מאפשר "הזרקה" ישירה של שלבי בניית AST, ואפילו נותן למפתח להמציא Tokens חדשים באופן דינמי. המערכת מאפשרת את זה על מנת לאפשר תמיכה בכל סוג של syntax מיוחד, דבר שאי אפשר לעשות ברוב שפות התכנות האחרות, שמרכיבות את כל הAST שלהן לפני שהן מביאות אותו לmacros, ולכן, ניתן להוסיף לשפה רק syntax שנחשב חוקי (קריא על ידי ה-Parser של השפה) מראש. הסיבה לכך היא, שsyntax שנחשב שגוי בשפה, אך חוקי ב-macro שבנינו, יזרוק שגיאה בקריאה הראשונית של הקוד אל תוך AST, ולא יגיע לmacro- שלנו. דוגמה משפה קיימת (Haxe):
  + גישת מערך מרובת expressions, כמו array[3, 5 + 4], לשפה שמצפה לidentifier/expression יחיד בגישה למערך, שיראה כך:array[2 \* 6] , תזרוק שגיאה בסגנון Unexpected Identifier `,` ויפסיק את הParser, לפני שהוא מפעיל את הmacro שלנו, שיהפוך, לדוגמה, את array[3, 4 + 5] ל array[3][4 + 5]. על מנת להימנע ממקרים כאלה, ה-Parser של השפה מאפשר הכנסת macros ממש אל תוך פונקציית הparsing ולא אחריה, ובעזרת יכולת זו אפשר לדאוג שהmacro פועל לפני שהParser זורק את השגיאה, והmacro יעבוד כמצופה.
* **אגף להוספת Externs** – על מנת להקל על המפתח בשילוב הפרויקט בתוכנה שלו, ישנו אגף שלם הנועד רק להוספת "Plugins" שונות לשפה במגוון סוגים, ובמגוון מקרים - ממשתנים ופונקציות רגילות, לסוגים מיוחדים ושדות גלובליים. האגף הזה מורכב ממחלקה אחת ששמה Plugins, שמטרתה לאפשר הוספת אלמנטים לשפה בעזרת קוד הכתוב בHaxe, ופונקציה ששמה loadModule(), שמאפשרת להריץ קוד הכתוב בLittle מראש, או ממש לפני שהקוד של המשתמש רץ. דוגמה:

|  |  |
| --- | --- |
| Plugins | Little.plugin.registerVariable(      "currentTime", "Characters", () -> {          return Conversion.toLittleValue(              Date.now().toString()          );  // Or alternatively, the token:              // Characters(Date.now().toString())      }  ); |
| loadModule() | Little.loadModule("      define attachedToProgram = true      define parentProgram = “My Program”      action mySemiExtern() = {        print(“Hello World”)      }      ", "Externs"  ); |

### פתרונות קיימים

ישנן כבר שפות תכנות שתומכות בשימוש לצרכים שהפרויקט שלי מיועד אליהם. להלן, השוואות בין שפות תכנות וספריות/תוכנות שמנגישות אותן, והפרויקט שלי:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| שפת תכנות | **Hscript**  **(Haxe)** | **VBA  (Visual Basic)** | **פרויקט**  **(Little)** |
| **הכרזת משתנים/פעולות** | ✔️ | ✔️ | ✔️ |
| **הכרזת סוגים** | ✔️ | ✔️ | ✔️❌\* |
| **לולאות, תנאים** | ✔️\*\* | ✔️ | ✔️ |
| **Compilation Macros** | ✔️ | ❌ | ✔️ |
| **גישה לאירועי הרצה (יצירת משתנה, משתנה נכתב...)** | ❌ | ❌ | ✔️ |
| **שינוי מילים שמורות** | ❌ | ❌ | ✔️ |
| **Cross Platform** | ✔️ | ❌ | ✔️ |

\* לא ניתן ליצור סוגים דרך קוד Little, אך אפשר להכניס סוגים מבחוץ, מצד המפתח  
\*\* אין variable capturing ו-pattern matching בתנאי switch

### טכנולוגיה

הפרויקט תוכנת בשפה יחסית לא מוכרת, ששמה Haxe. Haxe היא שפת תכנות שייצר אחד המתכנתים של ActionScript, שמטרתה לאפשר פיתוח אפליקציות למגוון מטרות ופלטפורמות, באמצעות טרנספילציה (תרגום קוד של שפה אחת לקוד של שפה אחרת). בהתחלה, מטרת השפה הייתה לאפשר כתיבה של גם לקוח וגם שרת באותה שפה, בעזרת השתמשות בספריות סטנדרטיות של השפות שאליהם הקוד מתקמפל. בשביל זה, נתמכו בתחילת הפיתוח רק 3 מטרות שאליהן היה אפשר לקמפל:

* JavaScript, בשביל אתרים וקוד ברשת
* ActionScript 3, בשביל משחקים
* Neko, מכונה ווירטואלית "תוצרת בית", בשביל תוכנות Native.

איתן היה אפשר, לדוגמה, לכתוב לקוח בעזרת הספרייה הסטנדרטית של JavaScript, ושרת בעזרת הספרייה הסטנדרטית של Neko (או שימוש בספריות דינמיות בעזרת Externs).

עם הזמן, יותר ויותר מטרות נוספו, וסגנון השפה השתנה: במקום להמשיך להדמות לשפות כמו Java וActionScript3, ובכך להקל את המעבר מהשפות האלה ל-Haxe, נוספו תכונות נוספות ופעולות מיוחדות, על מנת להבהיר ולהקל על עיבוד מידע. בפרויקט הזה יצא לי להשתמש בשתי תכונות עיבוד המידע העיקריות:

* **Algebraic Data Types:** בHaxe, הenum הקלאסי מורחב על מנת לתמוך בסוג קצת יותר מתוחכם של איבר, שמאפשר העברת פרמטרים שאותו איבר מבקש. זה מאוד שימושי כשרוצים לבנות עץ – בפרויקט השתמשתי בתכונה זו כדי לבנות את עצי הsyntax. דוגמה לעץ:

enum Tree<T>{

    BinaryTree(?left:Tree<T>, value:T, ?right:Tree<T>);

    RegularTree(value:T, children:Array<Tree<T>>);

    Leaf(value:T);

}

var tree:Tree<Int> = BinaryTree(

    Leaf(2),

    1,

    BinaryTree (

        //Question mark allows us to skip parameter

        3,

        Leaf(4)

    )

);

* **Pattern Matching:** תנאי switch הורחבו על מנת לאפשר חילוץ והתאמת מידע הנמצא בתוך Algebraic Data Types, כמו מספרים, מחרוזות, מערכים, או ADTs אחרים. ניתן לעשות זאת על ידי הצבת ערכים, העמדת תנאים מיוחדים, או הוצאתם מהADT על ידי הצבת משתנים במקומם:

switch tree {

    case BinaryTree(\_, (\_ > 100000) => true, (\_ == null) => false):

        throw "Big tree cannot contain a right child";

    case RegularTree(\_, \_) if (disableRegularTree):

        throw "Regular Trees are disabled"

    case RegularTree(value, arr): //Do Things

    case BinaryTree(null, value, null) | Leaf(value): {

        trace(value);

    }

    case BinaryTree(r, v, l): //Do Things

    case \_: //Do nothing, can also be `default:`

}

### הגבלות

כפי שהוזכר מקודם, אחת מהתכונות העיקריות של Haxe היא היכולת של השפה לעשות טרנספילציה להרבה מטרות אחרות – גם שפות תכנות, וגם מכונות ווירטואליות. על פניו נראה שזה יתרון ולא הגבלה, אבל זה לא בא בחינם, ויש קאטצ' – הספרייה הסטנדרטית קטנה ומצומצמת, וחייבת להתאים בפונקציות המוצעות למה שכבר קיים בכל המטרות האחרות. בפרויקט שלי, זה גרר בעיות שקשורות בצורך לסוגי מידע מיוחדים. אמנה מספר מקרים:

* **מערך ביטים** – אין דרך ליצור מערכים של אלמנטים שגודלם קטן מביט, מכיוון שלא כל המטרות תומכות ביצירה של מערך כזה (לדוגמה: PHP, Lua, ActionScript). נאלצתי להשתמש במערך של בייתים לזיכרון (ByteArray), ולהשתמש בכל בייט בתור תא היכול להכיל אלמנט אחד. בתיאוריה הייתי יכול להשתמש במערך רגיל ולאחסן את המידע בתוך הביטים של Int או Int64, אבל אז כבר אין סיבה להיות שמרן עם זיכרון, שכן מערך רגיל מומר לרשימה מקושרת או שילוב של רשימה ומערך בהרבה מהמטרות (Java: Array -> ArrayList, C++: Array -> vector, Python: Array -> list)
* **כמויות אלמנטים במערך** – לא כל המטרות שHaxe מציעה תומכות במערכים שאורכם עולה על 2.147 מיליארד אלמנטים, ומכיוון שלא יכולתי להשתמש במערך שגודל האלמנט שלו עולה על בייט אחד בשביל זיכרון, הוגבלתי לזיכרון בגודל מקסימלי של 2.147 גיגהבייט.
* **שרת קומפליציה (completion)**  - בחלק אחד מהפרויקט, ישנו סוג שאמור להיות מתאים עם 8 סוגים אחרים. בגלל באג בשרת הקומפליציה, אי אפשר ליצור סוג אבסטרקטי עם יותר מ8 פרמטרי סוג , אם מאופשרת המרה מהם ואליהם.
* **HashTables** – Haxe כן מציעה HashTable, אבל לא כל מטרה מאפשרת גישה לבתים ומקום האחסון של ה- HashTable, ולכן הייתי צריך לתכנת בעצמי HashTable, כדי שאוכל לגשת לבתים שהוא מורכב מהם, ולאחסן אותם באותו מערך זיכרון שדיברתי עליו מקודם.

מעבר להגבלות שקשורות למבנה השפה, נתקלתי גם בבעיות שנגרמו מחוסר הפופולריות של השפה:

* **Hashing** – כשהתחלתי תכנת את הHashTable, גיליתי שאין הרבה ספריות שבכלל מציעות את האלגוריתמים המתאימים (SipHash לדוגמה). לפרויקט הזה זה פחות שינה, כי לא בהכרח חיפשתי אלגוריתם Hashing שמטרתו להצפין, אך עדיין יצא שהשתמשתי באלגוריתם שפחות חסין להתנגשות ממה שהייתי משתמש בו בשפות אחרות (כן יש לציין שהHashTable של Haxe משתמש בSipHash, אבל זה לא בכוונה, אלא בגלל שהמטרות שאליהן Haxe עושה טרנספילציה משתמשות בSipHash בשביל הHashTable שלהן)
* **ספריות עזר** – אין הרבה ספריות שמציעות את התכונות וסוגי המידע שאני צריך, או לפחות הן לא עושות זאת בצורה יעילה מספיק. לכן, השתמשתי בפרויקט הזה בספריה אחרת שכתבתי שאינה קשורה לפרויקט ששמה Vision (ספריית CV, מכילה הרבה סוגי מידע). על אף שחלק גדול מהספרייה הזאת היה קיים לפני שהשתמשתי בו לפרויקט, שמתי לב שאני מדי פעם הוספתי פונקציות או תכונות שהייתי צריך בפרויקט הזה. בשפה יותר פופולרית, כנראה בכלל לא הייתי נתקל בבעיה דומה, ועוד יותר לא הייתי צריך להשתמש בספרייה משלי.

### תחומים ותמיכה

בגדול, הפרויקט בנוי על ועוסק בעיבוד מידע באופן מאסיבי. באופן יותר ממוקד, הוא נכנס לענף של טוקניזציית מידע המובא בצורת טקסט, והפעלת מניפולציות על אותם טוקנים, ובנוסף גם שימוש באותם טוקנים כאמצעי שיכול להפעיל מעין מכונה ווירטואלית. אותה מכונה ווירטואלית מחברת בין התוכן שאותם טוקנים מייצגים, לפקודות שעל המחשב לבצע. חלק מהפקודות מסופקות מראש, ומה שלא מסופק מראש, מפתח שמשתמש בפרויקט יכול להוסיף בעזרת אגף מסוים בפרויקט. בשביל נוחות, אציג את הפסקה אחרונה כעץ, שנוצר בעזרת פונקציה שנלקחה מהפרויקט (מPrettyPrinter, אחרי אדפטציה):

Project

   ├──── Data Processing

   │       ├──── Module Storage

   │       └──── Compiling

   │               ├──── Keywords

   │               │       └──── Keyword Manager

   │               ├──── Text Tokenization (Lexer)

   │               └──── Token Manipulation (Parser)

   └──── Virtual Machine

           ├──── Interpreter

           │       └──── Token Actuation

           ├──── Extern Registration

           └──── Memory

                   ├──── Data Storage

                   │       └──── Hash Tables

                   └──── Externs

## תיאור המערכת

### אז, מה בדיוק הפרויקט עושה?

בגדול **מאוד**, הפרויקט הוא ה"קומפיילר" והמכונה ווירטואלית הרשמית של השפה שיצרתי - Little. הפרויקט גם מכיל שני אימפלמנטציות של לקוחות. אפרט, והרבה:

* **Little** – שפת התכנות עליה מבוסס הפרויקט. מדובר בשפה שיצרתי על מנת להנגיש תכנות לילדים קטנים. השפה (יחד עם הפרויקט הזה) נוצרה לפני קצת יותר משנתיים, והחליפה מספר שמות לפני שנחתה על השם Little:
  + [ב23 באפריל, 2022](https://github.com/ShaharMS/Little/commit/0c43e3e346ed3cd2746f8fb4864f475cba7cf4ef#diff-b335630551682c19a781afebcf4d07bf978fb1f8ac04c6bf87428ed5106870f5), הפרויקט נוצר, ונקרא Multilang-Coder. לשפה עוד לא היה שם.
  + [ב25 באפריל, 2022](https://github.com/ShaharMS/Little/commit/7d11131a08a0ed1d2d5910d0ac1db51a59051850), הפרויקט והשפה שינו את שמם ל”Minilang”. באותו commit מקושר, גם כתבתי חלק מאיך שרציתי שהשפה תעבוד. התחלתי עם הקוד, אבל הייתי רחוק מהמטרה שהוצבה שם. באותו הזמן גם, היה הניסיון הראשון למבנה וטכנולוגית הפרויקט, עליהם אפרט בהמשך. שם השפה עוד לא הוחלט באופן סופי ושם החבילה בה הוכל הקוד נקרא פשוט "language".
  + [ב26 באפריל, 2022](https://github.com/ShaharMS/Little/commit/dbd33065bb5a4c23fd06f30c8c7a439e245575c9) לא היה שינוי לשם, אך הסרתי את החלק שכתבתי בו איך שהשפה תעבוד, והוספתי את הספציפיקציה הראשונה שהכילה נראות ומבנה הקוד בשפה. גם על זה אפרט בהמשך.
  + [ב30 באפריל, 2022](https://github.com/ShaharMS/Little/commit/2e8ddaa16aaa266de313f088a3070301b6888be2) הפרויקט והשפה שינו את שמם לשם העדכני – "Little". גם כאן הספציפיקציה השתנתה קצת.

בזמן שהחלטת השם קרתה יחסית מהר ובשלב יחסית מוקדם של הפרויקט, החלטה על ספציפיקציה לקחה הרבה יותר זמן – כמו בהחלטה על השם, היו הרבה שינויים בהתחלה, אך כאן המקרה הוא אחר – תוך כדי פיתוח, הבנתי שיש תכונות שאני רוצה להשאיר, כאלה שאני רוצה להוריד, וכאלה שאני רוצה להוסיף. היו יחסית הרבה שינויים בזמן כתיבת הפרויקט. אנסה, כמו קודם, לעשות בהם סדר – אבל שימו לב! זה ייקח הרבה, *הרבה* יותר זמן:

* + [ב26 באפריל, 2022](https://github.com/ShaharMS/Little/commit/dbd33065bb5a4c23fd06f30c8c7a439e245575c9), נוספה הספציפיקציה הראשונה לשפה. יש לה הרבה אלמנטים שדומים לשפה שמוצגת בפרויקט: שימוש בdefine- וב-action על מנת להכריז על משתנה ופונקציה, לדוגמה. עדיין היה דמיון משמעותי לHaxe, שכן אחת המטרות הראשונות (שנפלו בשלב מאוחר יותר) היו בניית טרנספיילר לHaxe. לא הוספתי אף מדריך בשלב הזה, אך כן הוספתי הסבר על חלק ממילות המפתח שהיו אז בשפה. להלן הספציפיקציה:

define x = 5

define y = new ImprovedNumber(5)

y.increment(4)

print(y)

action increment(x:Number) = {

    return x + 1

}

//Instances

//File name – Improved Number

define baseNumber

action new(number:Number) = {

    baseNumber = number

}

//write comments with a double /!

// + types for actions are automatically inferred

action increment(x:Number) = {

    return baseNumber += x

}

hide action renew(number:Number) = {

    return new ImprovedNumber(number)

}

* + [ב30 באפריל, 2022](https://github.com/ShaharMS/Little/commit/2e8ddaa16aaa266de313f088a3070301b6888be2) שוב השתנתה הספציפיקציה, אך לא נוספו תכונות חדשות: רק הוספתי רעיון לsyntax שיתאים ליצירת סוגים בתוך Little:

define x = 5

define z:Number = 10

define y = new ImprovedNumber(5)

y.increment(4)

print(y)

//also supports classes:

className: ImprovedNumber

    define baseNumber:Number

    action new(number:Number) = {

        baseNumber = number

    }

    //write comments with a double /!

    // + types for actions are automatically inferred

    action increment(x:Number) = {

        return baseNumber += x

    }

    hide action dispose() = {

        //nothing

    }

* + [ב3 במאי, 2022](https://github.com/ShaharMS/Little/commit/f39ec722fb56007842c4cf9aa91f753e8ffa0616) נוסף הרעיון הראשון המשמעותי ששרד (כמעט לגמרי) את מבחן הזמן, ונכנס לתוצר הסופי – לולאת ה-for. הספציפיקציה מציעה syntax אלטרנטיבי, שלא משלב אופרטורים/סימנים (לדוגמה: ..., ;), ומחליף אותם במילים from, ו-to. syntax זה עוצב גם כדי להשאיר מקום לולאת for שעוברת על מערכים, על אף שלא היה תכנון מידי לזה באותו זמן.

שאר הקוד בספציפיקציה זהה לזה שלמעלה, אעתיק את השוני לכאן:

for name from 0 to 9  {

    print(i)

}

* + שוב [ב3 במאי](https://github.com/ShaharMS/Little/commit/9391ce3f562129321196181aa886979fc314f914), הפעם חשבתי על ללכת על סטייל python כל הדרך בכתיבת פונקציות, רק בלי ה-:. כבר אומר מראש – זה לא שרד הרבה זמן :)

className: ImprovedNumber

    define baseNumber:Number

    action new(number:Number)

        baseNumber = number

    //write comments with a double /!

    // + types for actions are automatically inferred

    action increment(x:Number)

        return baseNumber += x

    hide action dispose()

        //nothing

* + עכשיו מתחילים לקפוץ בזמן: [ב16 בינואר 2023](https://github.com/ShaharMS/Little/commit/029cbc27218b5d3fa167e393d3e2b519e5e7478e), קרו מספר דברים יחסית גדולים:
    - הוסרה הספציפיקציה ליצירת סוגים, מתוך רצון להציב מערכת עובדת לפני שמתעסקים עם יצירת סוגים.
    - האופרטור המשמש להכרזת סוג על ערך/משתנה הוחלף מאופרטור למילים: מ-: ל-of type. זאת במטרה להפרד קצת מ-Haxe, ולפשט את השפה.
    - נוסף האלמנט every ללולאות for, המאפשר קפיצות בין ערכים. (לדוגמה, from 0 to 5 every 2 יעבור על הערכים 0, 2, 4

הספציפיקציה המלאה:

define x = 5

define z of type Number = 10

define y = new ImprovedNumber(5)

y.increment(4)

print(y)

define fileWriter = File.write("idk.txt")

fileWriter.writeString("Yay Haxe")

fileWriter.close();

for name from 0 to 9 every 2 {

    print(i)

}

* + קצת לפני ה[16 במרץ 2023](https://github.com/ShaharMS/Little/commit/029cbc27218b5d3fa167e393d3e2b519e5e7478e), מחקתי את הספציפיקציה שנכתבה עד אז,
  + [ב29 בינואר, 2023](https://github.com/ShaharMS/Little/commit/acaec403399cc437ffb97105c8d391dd90cbc50f), מחקתי את החלק בReadme שהעיד על הספציפיקציה, לעומת שלושה דברים שהצבתי לעצמי לצור בעתיד:
    - קובץ טקסט נפרד המכיל את הפירמוט, הsyntax וה"זרימה" של קוד השפה
    - סוויטת בדיקות, שגם היא תסתמך על תכונות השפה ותעיד על המבנה שלה
    - איזכור של תכונות ייחודיות בReadme של הפרויקט
  + [ב16 במרץ 2023](https://github.com/ShaharMS/Little/commit/029cbc27218b5d3fa167e393d3e2b519e5e7478e) הוגשמה המטרה השלישית, ויצרתי חלק בקובץ הReadme שנועד לאיזכור תכונות. התכונה הראשונה שנוספה לשם היא אחת מתכונות הבסיס של Little, וזה העיקרון Everything can be a code block. אסביר עליו בהמשך. הדוגמה שסופקה:

x = {define y = 0; y += 5; (6^2 \* y)} //180

* + [ב19 באפריל, 2023](https://github.com/ShaharMS/Little/commit/d8ee3e0341f8d4dcb94b08e7df063456fd20017d) נוספה לReadme התכונה השניה, שעקרונה: Consistency Is Key. גם עליה אפשר בהמשך, על אף שהיא יחסית ברורה מדוגמת הקוד שכתבתי לReadme:

define consistent = 5

define consistent.newPropertyDeclaration = 6

action declaredJustLikeVariables(define parametersAreDefinedTheSame = 6) = {

    print("Function Bodies are also assigned using `=`")

}

* + [ב23 באפריל, 2023](https://github.com/ShaharMS/Little/commit/903167bb7495e9677386f627ceff9bbe0fa5e037) נוספו \*המון\* דוגמות ומדריכים לקובץ הReadme – מתכונות של השפה, לתכונות של קורא הקוד, ותיעוד של כמה לולאות, חדשות וישנות:
    - לולאת while – מבצעת את גוף הלולאה עד שהתנאי מחזיר true
    - תנאי if מבצע את גוף התנאי עם התנאי הראשוני מחזיר true
    - לולאת for שינתה את המילה every למילה jump
    - תנאי after – מבצע את גוף התנאי, מיד לאחר שהמשתנה שמאוזכר בתנאי הראשוני משתנה, וגורם לתנאי הראשוני להחזיר true
    - תנאי whenever- שילוב של after וwhile- – כל פעם שאחרי עדכון המשתנה המוזכר, התנאי הראשוני מחזיר אמת, הגוף שבתוך התנאי מורץ.

לא אוכל לשים כאן הכל בגלל גודל הטקסט (בין 2 ל3 עמודים), אז [הנה קישור לקובץ בגיטהאב באותו commit](https://github.com/ShaharMS/Little/tree/903167bb7495e9677386f627ceff9bbe0fa5e037?tab=readme-ov-file#language-features)

* + [ב6 בנובמבר, 2023](https://github.com/ShaharMS/Little/commit/0cfb7810685a1ce82ca17c246a0e03cb097cb0ce), נוספה עוד דוגמה לתכונה בשפה – דוקומנטציה. היא קיבלה אימפלמנטציה קונקרטית באותו הזמן, בעזרת סדרת הסימנים """.  
    גם נוספה הרחבה לאחת הדוגמאות, שכללה יצירת משתנה עם שם שמוחלט בזמן ריצה. מעבר לזה, היו תיקונים קטנים, בעיקר של שגיאות כתיב/syntax:

define {("hey" + 1)} = 3

print(hey1) //3

"""

Retrieves the value of `x`

"""

define x = 3

""" Increments the value of `x"""

action incrementX() = { x = x + 1 }

print(x) //3

print(x.documentation) //Retrieves the value of `x`

print(incrementX.documentation) //Increments the value of `x`

* + [ב8 בנובמבר, 2023](https://github.com/ShaharMS/Little/commit/12ba9f52503636d14d58c52fb97e7ee128b8bc79), נוצרה סוויטת הבדיקות לראשונה – היו בה מספר בדיקות, והיא הדפיסה לכל בדיקה האם היא עברה, ואם לא מה קרה כשהיא לא עברה. ביצירה של הבודק הוספתי 7 בדיקות. מכיוון שהן נמצאות ממש בתוך הקוד של הבודק (אפרט בהמשך על למה ואיך הוא עובד) אני לא יכול להביא אותן, אבל [הנה קישור לקובץ הבודק עצמו](https://github.com/ShaharMS/Little/blob/12ba9f52503636d14d58c52fb97e7ee128b8bc79/src/UnitTests.eval.hx).
  + [ב16 בנובמבר, 2023](https://github.com/ShaharMS/Little/commit/05980d8ad4cfeff97b379f0f354ecefd33549c23) ו[ב22 בנובמבר, 2023](https://github.com/ShaharMS/Little/commit/7372a36d82f922ca7983cd2d3b0be71302ad1282), נוצר קובץ הספציפיקציה "הרשמי", בשני חלקים – פשוט קובץ טקסט המכיל קוד מתוכנת בשפה Little. הוא הכיל גם ספציפיקציה להכרזה של סוגים, לולאות ותנאים על מנת לנסות לקבוע סטנדרט לאיך השפה אמורה בערך להראות.

"""

    My Custom Class

"""

class Foo = {

    define self.public = 5

    define Foo.static = 5.6

    """

        Constructor

    """

    action self.create() = {

    }

    action self.somePublicAction(define someParameter, define param as Number = 2) = {

        print(self + " Called for " + someParameter + " and " param)

    }

    action Foo.someStaticFunction() = {

        print(Foo.documentation)

    }

}

define someVar as Decimal = 3

action someRandomAction() = {

}

"""

    doTwiceIf (3 > 5) {

        print(i)

    }

"""

condition doTwiceIf(define condition as Characters, define body) = {

    if (run(condition)) {

        runWith(body, "define i = 1")

        runWith(body, "define i = 2")

    }

}

condition repeat(define iterationCounter, define body as Characters) = {

    define times = run(iterationCounter).toNumber()

    while(times > 0) {

        run(body)

        times = times - 1

    }

}

for (define x from 0 to -100 jump 10) print(x)

while (true != false) print({define z = 3, z})

* + מיצירת קובץ הספציפיקציה, לא קרו שינויים דרמטיים במבנה הקוד. השינוי הגדול האחרון קרה בתאריך [17 במרץ, 2024](https://github.com/ShaharMS/Little/commit/4e510898acfa2edcd02b5d3ccbb42ae74bbfc34f), שבו נוספה הספציפיקציה   
    להכרזה על סימנים:

sign (left ^% right) = {

    return left + right ^ 2

}

print(^%.priority.type) //Number

עם הזמן, נוספו גם בדיקות לסוויטת הבדיקות, אך אין צורך להזכיר אותן (לפחות כרגע), שכן הן לא מכילות קוד שאמור "להוות דוגמה", אלא רק כזה שנועד לבדוק אם דברים עובדים כמצופה. (רוב הבדיקות בשורה אחת על עף שמצופה לשים line breaks, לדוגמה).

עכשיו שסוף סוף, סיימנו עם ההיסטוריה של השפה, בו נתעסק בהווה: בפועל, אלה התכונות ודרכי התכנות שהשפה מאפשרת:

* + **דרך כתיבה:**
    - **בלוק של קוד יכול להיות כמעט הכל:** שמות משתנים, לולאות, פונקציות ואפילו סימנים מאפשרים הכרזה וגישה בזמן ריצה בעזרת בלוקים של קוד – בלוק של קוד הוא כמות מסוימת של שורות, מאוכסנות בתוך סוגריים מסולסלות. בלוק יכול להחזיר ערך בעזרת מילת המפתח return. ניתן גם להשמיט אותה, ואז הערך המוחזר יהיה הtoken האחרון בבלוק הקוד.
    - **כתיבת קוד אחידה:** כמה שאפשר, כל הדרכים לכתוב syntax שמטרותיהן דומות (הכרזות, גישות, קריאות) כתובות באותה דרך, אותה צורה, או לפחות אותו זרם: תמיד משתמשים ב= על מנת להצמיד ערך (אפילו לפונקציות) – יש להשתמש במילת הכרזה כאשר יוצרים property חדש על אובייקט, וכן הלאה
    - **כל דבר יכול לשמש כערך:** נובע משני העקרונות לעיל – אם למשתנה יש ערך, ופונקציה יכולה לשמש כערך, למה שלא כל סוגי המידע יעשו זאת? לכן, אפשר גם להשתמש באופרטורים וסוגים כערכים. עיקרון זה שימושי ליצירת aliases, וגם יכול ליצור דברים משעשעים כמו:

define בחזקת = ^

define כפול = \*

print(5 כפול 6 בחזקת 2)

(יוצא 180)

* + **פיצ'רים**
    - **הכרזות:** יש תמיכה בהכרזת משתנים ופונקציות, מכל סוג שהוא, באופן סטטי ודינמי:
    - **שורות:** אין צורך לשים ; בסופי שורות, אך אפשר להשתמש ב-, על מנת להכניס כמה שורות קוד בשורה אחת, וזה מפצל את השורה לחלקים.
    - **גישות וקריאות:** אפשר לגשת לערכים של מזהים בעזרת השתמשות בשמם, השתמשות בפונקציה read, או בלוק של קוד שמחזיר פעולת read. קריאה לפונקציות מתבצעת באותה צורה, עם הוספת () אחריהם. הסוגריים יכולים להכיל פרמטרים, מפוצלים בעזרת שורה חדשה או ,

define x = 3

define e = read(“x”)

print({e +=7, read(Characters.fromCharCode(e + 91))})

(יוצא "e")

* + - **לולאות ותנאים:** רוב הלולאות שזמינות בשפות אחרות זמינות גם בLittle: if, while, for. בLittle יש גם שתי לולאות/תנאים חדשים: whenever ו-after – after מתבצע פעם אחת בדיוק, מיד לאחר שהמשתנה שמוזכר בתוך התנאי שלו משתנה וגורם לזה שאותו תנאי יחזיר true. Whenever עושה אותו הדבר, אך לא מתבטל אחרי פעם אחת:

define x = 3

after (x == 4) print(“hey”)

whenever (read(“x”) > 3) {

    print(x)

}

כש-x יוגדל מעבר ל-3, יודפס ערכו. בפעם הראשונה ש-x יהיה שווה ל-4 תודפס המילה hey.

* + - **גופי קוד:** כמו שבטח ראיתם מקודם, אפשר הרבה פעמים להשמיט את הסוגריים המסולסלות במקום שמצופה בלוק של קוד. המקרה היחיד שאי אפשר להשמיט אותן הוא כשמתמשים בבלוק In-line על מנת לייצר ערך.

עכשיו, סיימנו עם השפה. הגיע הזמן לעבור ל:

* **Compiler** – הלב של הפרויקט, ומבצע העבודה השחורה – הוא מקבל קוד הכתוב בLittle, והופך אותו לAST שאפשר להריץ, או לשמור כBytecode. גם  
    
  ----נמחק, להשלמה בסוף----  
    
  על אף שאין לו עבר מרשים כמו לשפה עצמה, הוא יותר ממחפה על זה בפיצ'רים שהוא מציע:  
  **‎**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| define x = 3, x = x + 6 action getX() = {     return x } print(getX()) | הגדר ס = 3, ס = ס + 6 פעולה קבל\_ס() = {     החזר ס } הדפס(קבל\_ס()) | السياج ع = 3, ع = ع + 6 فعل يحصل\_ع() = {     استرداد ع } مطبعة(يحصل\_ع()) |

|  |  |
| --- | --- |
| define x = 3, x = x + 6 action getX() = {     return x } print(getX()) | var x = 3, x = x + 6 fun getX() = {     ret x } log(getX()) |

* + **שינוי מילות מפתח:** אפשר לשנות את המילות השמורות בשפה לסט אחר של מילים, או לשנות מילים אינדיבידואליות בעזרת ממשק מיוחד. [בתוך קובץ הreadme](https://github.com/ShaharMS/Little/tree/branch/functional-programming?tab=readme-ov-file" \l "keyword--standard-library-modification) יש דוגמה לשינויי מילים. אביא את הדוגמאות משם:
  + **Parser Injection:** הParser בנוי בצורה שמאפשרת "השחלה" של פונקציות parsing תוך כדי תהליך הparser הרגיל, ואף מאפשר הסרה של שלבים, על מנת לתת למפתחים שמתמשים בפרויקט לעצב את נראות השפה, להוסיף, ולהוריד לה תכונות.
  + **Custom Tokens:** בשלב הParsing, המפתח יכול להוסיף טוקנים משלו, כדי לפשט הוספת שלבים לParser. הופך את הפיצ'ר לעיל לעוד יותר עוצמתי.
  + **הוספת externs מצד המפתח:** יש אגף שלם שמיועד אך ורק להוספת משתנים, פונקציות, שדות, סוגים ואופרטורים בדרך מהירה ולא "מנופחת" מדי. זה מאפשר למפתח להוסיף על הספרייה הסטנדרטית שLittle מספקת, ואפילו ליצור חלקים שלמים למטרה שלשמה המפתח משתמש בפרויקט (לדוגמה, אם Excel היו משתמשים בפרויקט במקום בVBA, הם היו משתמשים באגף הזה כדי להוסיף סוגים ופונקציות שעושות interfacing עם Excel.)
* **Interpreter** – לאחר שהקומפיילר מעבד את המידע ומייצר את הAST, צריך שיהיה   
  ---נמחק, להשלמה בסוף---

### יכולות

לפרויקט יש שני סוגי לקוחות עיקריים:

* **מפתחי תוכנה:** אם מפתח רוצה לשלב יכולות פרוגרמתיות בתוכנה שלו, כמו Excel לדוגמה, הפרויקט הזה נותן לו את האפשרות לעשות זאת, ואפילו נותן יותר אפשרויות ופיצ'רים מהכלים שהתחום הזה (שפות תכנות אינטגרטיביות) מציע (VBA וHscript לדוגמה, [טבלה](#_פתרונות_קיימים))
* **לומדי תכנות:** מעבר לסתם כלי או ספריה, הפרויקט מספק שני סוגים של סביבות פיתוח – אחת כאתר, ואחת בשורת הפקודה. משתמשים שרוצים ללמוד את השפה, או ללמוד לתכנת בכלליות, יכולים לגשת לכתובת של האתר, או, למשתמשים יותר מתקדמים שרק רוצים להתנסות בשפה, להוריד את הפרויקט ולקמפל אותו לבד (זה [האתר המדובר](https://spacebubble.io/little/demo/), ניתן להריץ את הלקוח בשרת הפקודה באמצעות הרצת פקודת הבנייה haxe compile.hxml)

אפילו שהפרויקט ברובו ממוקד בבנית והרצת קוד, יש לו תכונות אחרות, שלאו דווקא קשורות לתכנות לדוגמה:

* **מתמטיקה:** אפשר להדפיס תרגילים מתמטיים בעלי פתרון כזה או אחר, ואז לקחת את הפתרון שלהם באמצעות:

Conversion.toHaxeValue(

    Little.runtime.stdout.stdoutTokens.pop()

)

(ממיר לערך רגיל את הטוקן האחרון שהודפס, שהוא תוצאת המשוואה. יכול להיות מספר, בוליאני, מחרוזת או אפילו אובייקט במקרה הצורך)

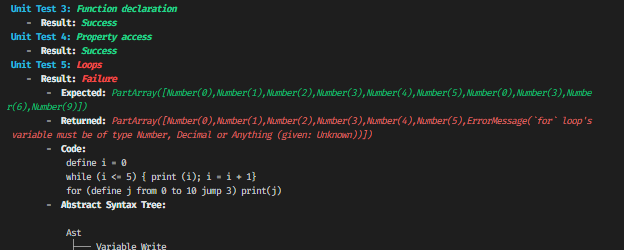
* **Pretty Printer:** באמצעות המחלקה PrettyPrinter, ניתן להדפיס עצים יפים של מערכי Enums.

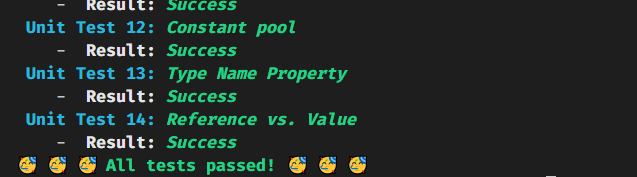
### סוויטת בדיקות

על מנת לוודא שהפרויקט עובד, כשאני בונה אותו לבדיקה, אני יכול להגדיר פרמטר Haxedef שנקרא unit באמצעות ווידוא שבקובץ הבונה (compile.hxml) נמצאות השורות:  
--define unit – מגדיר את הHaxedef: unit ונותן לו בברירת מחדל את הערך true כי לא סופק ערך אחר  
--interp – מגדיר את מטרת הבנייה, עושה שהקוד יורץ באמצעות הinterpreter של Haxe ולא יתקמפל.

כש-unit מוגדר, מאופשרת השורה

UnitTests.run(true);

שמריצה את כל הבדיקת, אחת אחר השנייה ללא הפסקה (הפרמטר שמועבר מחליט האם להפסיק בבדיקה נכשלת וגם האם לקצר את ההפסקה בין כל בדיקה מ0.2 שניות ל0.05 שניות). לנוחות וליופי, הבדיקות מודפסות עם צבעים ופרמוט, ולפי סדר. תמונה להמחשה:  
  
  
...  
A black screen with white text

Description automatically generated  
  
כהכנה לעתיד (כשיהיו יותר בדיקות), מודפסת הודעה נוספת בסוף כאשר כל הבדיקות מצליחות:  
  
  
להודעה הזאת יש שתי צורות נוספות:



תמונה שמכילה טקסט, גופן, צילום מסך, גרפיקה

התיאור נוצר באופן אוטומטי

כיום, מורצות 15 בדיקות, כל אחת למטרה שונה, אך יכולה להסתמך על דברים אחרים   
שצריכים לעבוד. בדיקות מסודרות לפי שם פונקציה (test<testNumber>), וצריכות להחזיר מספר דברים בתור אובייקט:

* + - * שם בדיקה
      * האם הבדיקה הצליחה
      * תוצאת הבדיקה
      * למה הבדיקה ציפתה
      * הקוד של הבדיקה

והבדיקות הן:

1. Basic Math – מתמטיקה פשוטה, ופונקציית הדפסה
2. Variable Declaration – הכרזת משתנים, פונקציית הדפסה
3. Function Declaration – הכרזת פונקציות, קריאה לפונקציות
4. Property Access – יצירת אובייקטים דינמיים, יצירה וגישה לשדות
5. Loops – לולאות while וfor
6. Events and Conditionals – תנאי after וwhenever
7. Code Blocks – שימוש בקוד סגור בסוגריים מסולסלים כערך למשתנה
8. Self Assignment – שינוי ערך באמצעות הערך שלו
9. If-Else – תנאי if עם else
10. Nested Code Blocks- בלוקים של קוד אחד בתוך השני, ובדיקה לראות האם משתנה שהוכרז בבלוק פנימי יערוך את המשתנה החיצוני (לא טוב), או שיושמד בסוף הבלוק והערך ה"ישן" "יחזור" (טוב)
11. Inline Blocks – כמו Code Blocks, הפעם גם פונקציית ההדפסה מקבלת את המשתנה שעליה להדפיס בתור בלוק של קוד
12. Constant Pool – בזיקה האם הכתובות של ערכים שאמורים להיות בconstant pool אכן נמצאים שם ולא לוקחים זיכרון ממקום אחר
13. Type Name Property- בדיקה האם השדה .type עובד על כל ערך, מאובייקט ועד לאופרטור
14. Reference vs. Value – בודק האם כשמשווים ערך שהוא pass by value הוא יוצר ערך חדש בזיכרון, וההפך לערכים שהם pass by reference.
15. Arrays – יוצר, מאחסן ומאחזר מידע ממערכים.

### לוח זמנים

כשהתחלתי עם הפרויקט, לא בדיוק היה לי לוח זמנים, אלא רצון לסיים איתו לאחר כמות מסוימת של זמן. לא חשבתי בכלל שאצטרך את הפרויקט הזה לעבודה בסייבר אז, ולכן מה שקרה בפועל זה שבאמת באופן כללי סיימתי מתי שרציתי, ומאז עשיתי תיקוני באגים קטנים או תוספות ויזואליות לUI שהפרויקט הציע כשהיה צריך.אארגן לטבלה:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **אבן דרך** | **תאריך מצופה** | **תאריך בפועל** | |
| תחילת הפרויקט | 23 באפריל, 2022 | | |
| שפת תכנות עובדת | חודש אפריל, 2023 |  |  |
|  |  |
|  |  |
| שפת תכנות עובדת | 25 באפריל, 2023 |
| סיום העבודה על שפת התכנות, לפני סייבר | 13 בספטמבר, 2023 | | |
| פתיחת עבודה על הפרויקט, לסייבר | 4 בנובמבר, 2023 | | |
|  |  | | |
|  |  | | |
|  |  | | |
|  |  | | |
|  |  | | |
|  |  | | |

### סיכונים

כבר ב2022, רק כשהתחלתי, היה לי ניחוש, להפתעתי אפילו אחד מוצלח, למה הולך להפריע, ומה יכול לתקוע אותי בפיתוח, אך כשחשבתי על אותם סיכונים אז, החלטתי להמשיך הלאה בפיתוח. אדבר על סיכונים שלאו דווקא קשורים לקוד עצמו, אלא לכלים שבהם השתמשתי והיו זמינים לי

* **שימוש בשפה Haxe:** אפילו שהיא השפה האהובה עלי, בכל פרויקט שאני מתחיל אני תמיד חייב לתהות האם אני יכול להשתמש בה. לצערי, התשובה לא תמיד חיובית, ויש דוגמאות לזה:
  + [**Dynamically**](https://github.com/ShaharMS/Dynamically-CS)**:** פרויקט אחר, שהוא אפליקציה לאיור ופתירת בעיות מתמטיות המוצגות בעזרת גרפיקה (תרגילים בגיאומטריה, פיזיקה, מודלים חישוביים). הייתי חייב יכולות AI לפרויקט, וכן ספריות אלגברה ליניארית ופתירת משוואות, דבר שאין בHaxe, ולא הייתי מעוניין לפתח.  
    Fact Fun: השם של הפרויקט הזה זהה לספריה שתכננתי לפתח בעל מטרה קשורה – פיתוח גרפיקות לצורות שאפשר לשחק איתן. הפסקתי לפתח אותה בגלל חוסר בביקוש, מהצד שלי ומשתמשים אחרים. [קישור](https://github.com/ShaharMS/Dynamically)
  + [**SpawnerTag**](https://github.com/ShaharMS/SpawnerTag)**:** פלאגין לשרת במשחק Minecraft, שמטרתו להפוך אביזר "בלוק" הנקרא Monster Spawner לאביזר שאפשר להשיג בצורה איןזופית באופן תיאורתי. כשפיתחתי את זה, עוד לא היה כלי לפיתוח פלאגינים לשרתי Minecraft, אז הייתי חייב להשתמש בKotlin. היום כן קיים כלי כזה, ושמו [PickHaxe](https://github.com/EliteMasterEric/PickHaxe) (משחק מילים על המילה pickaxe, אביזר נפוץ ושימושי בMinecraft)

הפעם כן יכולתי להשתמש, שכן רוב הדברים המיוחדים שהייתי צריך כבר היו קיימים (ספריית hash) ולא הייתי צריך הרבה כלים חיצוניים חוץ ממש שהשפה מציעה (כן השתמשתי במחלקות ופיצ'רים מהספרייה [Vision](https://github.com/ShaharMS/Vision), אך רובם היו כלי עזר, ובכל זאת אני פיתחתי אותם :) )

* **ניהול זיכרון:** מההתחלה, חששתי שיהיו לי בעיות עם אחסון מידע – בסוף, הרצת קוד זה לא רק פקודות – צריך לשמור מידע על הדרך. בהתחלה הפתרון באמת היה לא טוב (כמו שהוזכר מקודם), ולכן הבנתי שהפתרון הטוב ביותר הוא כנראה האחד הסטנדרטי – למדתי על הstack- וה-heap, איך מתכנתים כל אחד ומה מיוחד לכל אחד, ועליתי על הפתרון העדכני, שמורכב מארבעה מחלקות: ConstantPool, Storage, Referrer, ExternalInterfacing.. אבל, גם בפתרון העדכני אפשר לראות משהו חמור – איפה באמת ה-stack וה-heap?  
  זה אכן היה סיכון שני, שאפצל לנקודה שנייה:
* **בקשה ופינוי של זיכרון:** Haxe היא לא שפה שיכולה ישר לבקש ולפנות זיכרון למערכת, בגלל אופי הפעולה שלה: היא מקמפלת את עצמה לשפות אחרות, לא לקוד מכונה. ידעתי שזה יכול להיות בעייתי, אך הנחתי שזאת לא בעיה משמעותית מספיק, והמשכתי האלה. זאת הייתה הנחה נכונה, שכן על אף שהיא הקשתה עלי בתכנות הזיכרון, והייתי חייב לקחת פתרון שלא היה 100% סטנדרטי, יכולתי להשתמש במגוון הפיצ'רים שנועדו לעיבוד מידע, שלא תמיד יש בשפות אחרות...
* **זמן:** ברור שלכל פרויקט יש בעיית זמן כזו או אחרת, אבל אחד מהדברים שהכי חששתי מהם, זה כמה זמן זה הולך לקחת – שפת תכנות לא באה בקלות, וראיתי איך שפו תתכנות אחרות קיימות מלא שנים, ועדיין יחסית "חלשות". בגלל החשש הזה, הצבתי לי גם מטרה וגם דדליין – כמו שהזכרתי בתכנון זמנים, הבטחתי לעצמי שאני מסיים את הפיתוח עד בדיוק שנה אחרי – התחלתי באפריל 2022, והבטחתי שאסיים עד סוף אפריל 2023, לא משנה אם כל הדברים שרציתי לעשות בפרויקט נמצאים בו. למזלי, באמת הספקתי את הרוב המוחלט עד אז, ורק היו תיקוני באגים כאלה ואחרים מאז ועד שהפרויקט קיבל משמעות חדשה, כפרויקט סיום בסייבר.

# תיאור תחום הידע

## יכולות

### סוג לקוח: מפתח אפליקציות

למפתחי אפליקציות יש מגוון אפשרויות אינטראקציה עם הפרויקט, הכוללים את כל האמצעים שהפרויקט מציע, מבנייה, הרצה, ואסיפת מידע דיאגנוסטי. אפרט

* **יכולת: הרצת קוד הכתוב בLittle בזמן ריצה**
  + מפתח יכול לקחת כל קוד מכל מקום שהוא רק רוצה, ולהריץ אותו באמצעות הפונקציה run שבמחלקה Little.
  + שדות ומחלקות נחוצים:
    - Little
      * debug:Bool
      * queue:Queue<String>
    - PrepareRun
      * prepared:Bool
      * addTypes()
      * addSigns()
      * addFunctions()
      * addConditions()
      * addProps()
    - Runtime
      * module:String
      * errorThrown:Bool
      * line:Int
    - Interpreter
      * run():InterpTokens
      * convert(…tokens:ParserTokens):InterpTokens
    - Parser
      * parse(tokens:Array<LexerTokens>):Array<ParserTokens>
    - Lexer
      * lex(code:String):Array<LexerTokens>
* **יכולת: הרצה לפני מודולות**
  + מפתח יכול לקחת קוד, ולהריץ אותו לפני קוד אחר, או לשים אותו בהמתנה על מנת להריץ אותו מיד לפני שמריצים את המודולה העיקרית. ניתן לעשות צורה זאת של preloading באמצעות הפונקציה loadModule שבמחלקה Little, ולהריץ את המודולות שבהמתנה באמצעות קריאה לפונקציה run שבאותה מחלקה.
  + שדות ומחלקות נחוצים:
    - Little
      * debug:Bool
      * queue:Queue<String>
    - PrepareRun
      * prepared:Bool
      * addTypes()
      * addSigns()
      * addFunctions()
      * addConditions()
      * addProps()
    - Runtime
      * module:String
      * errorThrown:Bool
      * line:Int
    - Interpreter
      * run():InterpTokens
      * convert(…tokens:ParserTokens):InterpTokens
    - Parser
      * parse(tokens:Array<LexerTokens>):Array<ParserTokens>
    - Lexer
      * lex(code:String):Array<LexerTokens>
* **יכולת: בניית קוד לAST**
  + מפתח יכול לקחת כל קוד מכל מקום שהוא רק רוצה, ולבנות אותו ללא הרצה באמצעות פונקציית compile שבמחלקה Little.
  + שדות ומחלקות נחוצים:
    - Interpreter
      * convert(...tokens:ParserTokens):Array<InterpTokens>
    - Parser
      * parse(tokens:Array<LexerTokens>):Array<ParserTokens
      * >
    - Lexer
      * lex(code:String):Array<LexerTokens>
* **יכולת: אסיפת מידע דיאגנוסטי על אירועי ריצה**
  + מפתח יכול להוסיף event listeners למגוון אירועים שקורים בזמן הריצה של הקוד המובא, מאירועים בסיסים כמו מעבר שורה עד ליותר מפורטים כמו התחלת לולאה. על מנת להוסיף מאזין, יש להשתמש בשדות המתחילים ב-on שבמחלקה Runtime. אפשר לגשת למחלקה באמצעות Little.runtime.
  + שדות ומחלקות נחוצים :
    - InterpTokens
    - Runtime
      * onLineChanged:Array<Int -> Void>
      * onLineSplit:Array<Void -> Void>
      * onTokenInterpreted:Array<InterpTokens -> Void>
      * onErrorThrown:Array<(String, Int, String, String) -> Void>
      * onWriteValue:Array<Array<String> -> Void>
      * onFunctionCall:Array<(String, Array<InterpTokens>)- > Void>
      * onConditionCall:Array<(String, Array<InterpTokens>, InterpTokens) -> Void>
      * onFieldDeclared:Array<(String, FieldDeclarationType) -> Void>
      * onTypeCast:Array<(InterpTokens, String) -> Void>
      * throwError(token:InterpTokens, ?layer:Layer):InterpTokens
      * warn(token:InterpTokens, ?layer:Layer)
    - Interpreter
      * setline(l:Int)
      * splitLine()
      * declareVariable(name:InterpTokens, type:InterpTokens, doc:InterpTokens)
      * declareFunction(name:InterpTokens, params:InterpTokens, doc:InterpTokens)
      * condition(name:InterpTokens, pattern:InterpTokens,body:InterpTokens):InterpTokens
      * write(assignees:Array<InterpTokens>, value:InterpTokens):InterpTokens
      * call(name:InterpTokens, params:InterpTokens):InterpTokens
      * read(name:InterpTokens):InterpTokens
      * typeCast(value:InterpTokens, type:InterpTokens):InterpTokens
      * run(body:Array<InterpTokens>, propagateReturns:Bool):InterpTokens
* **יכולת: יצירת Bytecode**
  + מפתח יכול לשמור קוד להרצה מאוחרת בפורמט מצומצם בעזרת הפונקציה compile שבמחלקה ByteCode. הפונקציה הזאת מקבלת AST, שאותו אפשר לקבל באמצעות Little.compile, שהוזכר קודם לכן. יצירת Bytecode ממחרוזת נראית כך: ByteCode.compile(Little.compile(“..code”)).
  + שדות ומחלקות נחוצים:
    - InterpTokens
    - Interpreter
      * convert(...tokens:ParserTokens):Array<InterpTokens>
    - Parser
      * parse(tokens:Array<LexerTokens>):Array<ParserTokens
      * >
    - Lexer
      * lex(code:String):Array<LexerTokens>
* **יכולת: הוספת אלמנטים חיצוניים**
  + ישנו אגף שלם הנועד רק כדי להקל על מפתחים להוסיף ערכים, פונקציות, מחלקות ואופרטורים חיצוניים. ניתן לגשת לאגף באמצעות Little.plugin.
  + שדות ומחלקות נחוצים:
    - Plugins
      * registerType(typeName:String, fields:TypeFields)
      * registerVariable(variableName:String, variableType:String, ?documentation:String, ?staticValue:InterpTokens, ?valueGetter:Void -> InterpTokens)
      * registerFunction(functionName:String, ?documentation:String, expectedParameters:EitherType<String, Array<InterpTokens>>, callback:Array<InterpTokens> -> InterpTokens, returnType:String)
      * registerCondition(conditionName:String, ?documentation:String ,callback:(params:Array<InterpTokens>, body:Array<InterpTokens>) -> InterpTokens
      * registerInstanceVariable(propertyName:String, propertyType:String, onType:String, ?documentation:String, ?staticValue:InterpTokens, ?valueGetter:(objectValue:InterpTokens, objectAddress:MemoryPointer) -> InterpTokens)
      * registerInstanceFunction(propertyName:String, onType:String, ?documentation:String, expectedParameters:EitherType<String, Array<InterpTokens>>, callback:(objectValue:InterpTokens, objectAddress:MemoryPointer, params:Array<InterpTokens>) -> InterpTokens, returnType:String)
      * registerOperator(symbol:String, info:OperatorInfo)
      * combosHas(combos:Array<{lhs:String, rhs:String}>, lhs:String, rhs:String)
    - InterpTokens
    - Conversion
      * toHaxeValue(token:InterpTokens):Dynamic
      * toLittleValue(value:Dynamic):InterpTokens
    - ExternalInterfacing
      * createPathFor(extType:ExtTree, ...path:String):ExtTree
      * createAllPathsFor(...path:String)
    - ExtTree
    - Operators
      * add(op:String, operatorType:OperatorType, priority:String, callback:EitherType<(InterpTokens) -> InterpTokens, (InterpTokens, InterpTokens) -> InterpTokens>)
    - ConstantPool
      * ERROR:MemoryPointer
      * EXTERN:MemoryPointer
    - Storage
      * storeByte(b:Int):MemoryPointer
    - Memory
      * store(token:InterpTokens):MemoryPointer
      * read(...path:String):{objectValue:InterpTokens, objectTypeName:String, objectAddress:MemoryPointer}­­
* **יכולת: קריאה וכתיבה ישירה ובטוחה מהזיכרון**
  + אם מפתח צריך, הוא יכול להשתמש במגוון הפונקציות שבמחלקה Memory על מנת לקרוא ולערוך ערכים בזיכרון, בכל זמן שהוא.
  + שדות ומחלקות נחוצים:
    - Memory
      * store(token:InterpTokens):MemoryPointer
      * retrieve(token:InterpTokens):MemoryPointer
      * read(path:Rest<String>):{objectValue:InterpTokens, objectTypeName:String, objectAddress:MemoryPointer}
      * write(path:Array<String>, ?value:InterpTokens, ?type:)
      * set(path:Array<String>, ?value:InterpTokens, ?type:String, ?doc:String)
      * allocate(size:Int):MemoryPointer
      * free(pointer:MemoryPointer, size:Int)
* **יכולת: גישה מהירה לזיכרון שמפונה ע"י הInterpreter**
  + אם מפתח צריך, הוא יכול לגשת למערכי הבתים של Storage וגם של Referrer, ולהשתמש בפונקציות שבאותן מחלקות כדי לקבל מידע על אותם מערכי בתים.
  + שדות ומחלקות נחוצים:
    - Storage – בשביל סוגים: (Byte, Bytes, Array, Int16, UInt16, Int32, UInt32, Float, Pointer, Function, Condition, Sign, Object, Type):
      * פונקציות store(…)
      * פונקציות set(address:MemoryPointer, …)
      * פונקציות read(address:MemoryPointer, …)
      * פונקציות free(address:MemoryPointer, …)
      * storage:ByteArray
      * reserved:ByteArray
    - Referrer
      * bytes:ByteArray
      * currentScopeStart:Int
      * currentScopeLength:Int
      * get(key:String):{address:MemoryPointer, type:String}
      * set(key:String, value:{?address:MemoryPointer, ?type:String})
      * exists(key:String):Bool
* **יכולת: המרה חלקה בין ערכי Little לערכי Haxe**
  + למפתח יש גישה למחלקה Conversion, המאפשרת המרות בין ערכים בLittle, שמיוצגים בעזרת אובייקטים מסוג InterpTokens, לערכים רגילים, שסוגם משתנה (Int, Float או אפילו סתם אובייקט דינמי)
  + שדות ומחלקות נחוצים:
    - InterpTokens
    - Type
      * getClass<T>(o):Class<T>
      * getClassName(c:Class<Dynamic>):String
      * getInstanceFields(c:Class<Dynamic>):Array<String>
      * getProperty(o:Dynamic, field:String):Dynamic
    - Reflect
      * getProperty(o:Dynamic, field:String):Dynamic
    - Interpreter
      * evaluate(exp:InterpTokens):InterpTokens
* **יכולת: החלפת מילים שמורות ומילים בספרייה הסטנדרטית**
  + המפתח יכול, במידת הצורך, להחליף מילות מפתח כאלה או אחרות לאיזה צירוף אותיות רציף שהוא רוצה, כל עוד הצירוף לא מכיל רווח, סימן, אינו ריק ולא מתחיל במספר. הוא עושה זאת דרך שינוי הערכים שב-Little.keywords, השוואת אותו השדה ל-KeywordConfig אחר, או יצירת KeywordConfig חדש והחלתו באמצעות הפונקציה change של אותה מחלקה (KeywordConfig).
  + שדות ומחלקות נחוצים:
    - KeywordConfig
    - change(config:KeywordConfig)
    - (יש בין 50 ל100 מילות מפתח וסימנים שאפשר לשנות. לא אשים אותן כאן, קישור: <https://github.com/ShaharMS/Little/blob/branch/functional-programming/src/little/KeywordConfig.hx#L77>)
* **יכולת: הדפסה יפה של אלמנטים חשובים**
  + המפתח יכול להשתמש במחלקה PrettyPrinter על מנת לקבל הדפסה יפה של קוד, או של עצי syntax. זה שימושי כשמנסים להוסיף תכונות ופיצ'רים לשפה, ורוצים לנפות באגים, או לראות איך התוספת שלך מסתדרת עם שאר עץ הsyntax.
  + שדות ומחלקות נחוצים:
    - PrettyPrinter
      * printParserAst(ast:Array<ParserTokens>, ?spacingBetweenNodes:Int = 6):String
      * printInterpreterAst(ast:Array<InterpTokens>, ?spacingBetweenNodes:Int = 6):String
      * getTree\_PARSER(getTree\_PARSER(root:ParserTokens, prefix:Array<Int>, level:Int, last:Bool):String
      * getTree\_INTERP(root:InterpTokens, prefix:Array<Int>, level:Int, last:Bool):String
      * stringifyParser(?code:Array<ParserTokens>, ?token:ParserTokens):String
      * stringifyInterpreter(?code:Array<ParserTokens>, ?token:ParserTokens)
      * prettyPrintOperatorPriority(priority:Map<Int, Array<{sign:String, side:OperatorType}>>):String

### סוג לקוח: לומד תכנות, מתכנת **Little**

מעבר לכלי למפתחים, גם משתמשים רגילים יכולים להשתמש בפרויקט, דרך שני הלקוחות שנתונים בו – אחד דרך הטרמניל (שורת הפקודה), ואחד [באתר אינטרנטי](https://spacebubble.io/little/demo/), שתוכנו נמצא בפרויקט:

* באתר האינטרנט, יש כמו עורך קוד מיוחד, בעל 3 חלקים – בחלק השמאלי של המסך, יש שלושה חלונות שניתן לכווץ: הקלט, עץ הsyntax והפלט. בחלק הימני למעלה, יש ממשק המאפשר שינוי של המילים השמורות, עם דוגמאות של מימוש בקוד. בחלק הימני למטה, יש מדריך Quickstart לשפה.
* מריצים את עורך הקוד בשורת הפקודה בעזרת בניית הפרויקט באמצעות Haxe compile.hxml, או באמצעות שימוש באפליקציות למגוון הפלטפורמות שנמצאות בפרויקט עצמו (הערה חשובה – אין אפליקציות לכל הפלטפורמות, מכיוון שצריך את המכשיר מהסוג הספציפי על מנת לבנות אליו לפעמים (iphone, mac, ולפעמים linux)).  
  כשמריצים את הפרויקט "raw", הוא ידפיס קצת מידע, ואחריו יהיה אפשר להקליד קוד. מעבר לקוד, אפשר להקליד פקודות מסוימות, והן רצות כאשר הן בשורה ריקה:
  + ml! – מנקה את המסך, ומתחיל להקליד קוד במצב רב-שורתי, ולא מריץ קוד מיד אחרי לחיצה על מקש הenter
  + clear! – מנקה את המסך, מתחילים להקליד קוד במצב הקודם ששהינו בו
  + clearLine! – מוחק את השורה האחרונה, זמין במצב רב-שורתי בלבד
  + run! – מריץ את הקוד שהוכנס עד עכשיו במצב רב-שורתי
  + default! – מחזיר למצב שורה יחידה ומנקה את המסך
  + ast! – מנקה את המסך, ומעביר למצב שמדפיס את עץ הsyntax של הקוד במקום להריץ אותו.
  + printSample! – מדפיס קוד הכתוב לפי הספציפיקציה הרשמית, קיים למטרות למידה.

על אף השוני בין סוגי הUI, הרוב המוחלט של הפיצ'רים מוצעים לשניהם, ולכן אפרט על היכולות שלהם ביחד

* **יכולת: סביבת הרצה cross-platform**
  + מכיוון שהפרויקט לא משתמש בשום פיצ'ר שספציפי לפלטפורמה מסוימת, אפשר לקמפל אותו לכל מטרה, ואפילו להריץ אותו בעזרת הinterpreter של Haxe עצמו.
  + "שדות ומחלקות" נחוצים:
    - Hxcpp (ספריה וכלי בנייה לC++)
    - Hashlink (ספריה, כלי בניה ומכונה וירטואלית הכתובה ובונה ל-C)
    - Haxe Interpreter (חלק מHaxeC, מריץ קוד ללא טרנספילציה)
    - HaxeC (אורז בתוכו טרנספיילר JS)
* **יכולת: הרצת קוד מהירה/אוטומטית**
  + בלקוח האינטרנטי, כל פעם שהמשתמש משנה את הקוד, הוא נבנה מחדש והפלט מוצג. בלקוח של שורת הפקודה, תלוי במצב: במצב שורה יחידה, הלקוח משתמש בלחצן הenter בשביל להריץ את הקוד. במצב מולטי-שורה, הלקוח מקליד run! בשורה ריקה.
  + שדות ומחלקות נחוצים:
    - JsExample
      * input:TextAreaElement
      * ast:TextAreaElement
      * output:TextAreaElement
      * input.addEventListener(“keyup”)
    - Little
      * run(code:String, debug:Bool)
      * reset()
* **יכולת: הכרזת משתנים, פונקציות, וכינויים**
  + שפת התכנות נותנת למשתמשים לצור פונקציות שמחזירות כל ערך, ומשתנים מכל סוג בעלי כל ערך שיש בו הגיון. כאשר נותנים למשתנה ערך שהוא לא משתנה, זה נקרא "כינוי", והמשתנה מתנהג כמו הערך שהוצמד לו (אפשר לשים אותו בין אופרנדים לדוגמה עם הערך שלו הוא אופרטור)
  + מחלקות ושדות נחוצים:
    - Parser
      * mergeComplexStructures(pre:Array<ParserTokens>):Array<ParserTokens>
    - Interpreter
      * declareVariable(name:InterpTokens, type:InterpTokens, doc:InterpTokens)
      * declareFunctiondeclareFunction(name:InterpTokens, params:InterpTokens, doc:InterpTokens)
* **יכולת: המרה מהירה ופשוטה בין סוגי ערכים**
  + מילת המפתח המשמשת לנתינת סוג קונקרטי למשתנים גם משמשת ל"יציקה" (casting). פונקציות היציקה מוגדרות בעזרת פונקציה שנמצאת על המחלקה של האובייקט שיוצקים, ושם הפונקציה הוא <to\_keyword><type>, כאשר to\_keyword זו מילת המפתח המוגדרת שאיתה מתחילים שמות של פונקציית המרה (ברירת מחדל : to), ו-type זה שם הסוג.
  + שדה נחוץ:
    - Interpreter
      * typecast(value:InterpTokens, type:InterpTokens):InterpTokens
* **יכולת: ראיית עץ הsyntax**
  + בלקוח האינטרנטי, מעל הפלט הסטנדרטי, מופיע עץ הsyntax שנבנה מהקוד שלך. בלקוח של שורת הפקודה, יש להעביר למצב ראיית ה-AST בעזרת הפקודה ast!, ולאחר מכן הכנסת קוד כרגיל.
  + שדות ומחלקות נחוצים:
    - JsExample
      * ast:TextAreaElement
    - Main
      * main()
* **יכולת: שגיאות מודעות קונטקסט**
  + בכל מקום שבו נזרקת שגיאה, נעשה מאמץ לקשור את השגיאה למקום שממנו היא נקראה – השגיאה מכילה שמות משתנים, פונקציות, ואפילו קוד מהמקום בו נזרקה השגיאה, ובמקרה הצורך, אפילו חושפת מידע שהמשתמש אולי לא ידע (לדוגמה, תדווח שגיאה ספציפית ללולאות for המשתמשות בבלוק של קוד כדי לאחזר את המשתנה, אך הבלוק לא החזיר אחד)
  + שדות ומחלקות נחוצים:
    - Runtime
      * callstack:Array<{module:String, line:Int, linePart:Int, token:InterpTokens}>
      * throwError(error:InterpTokens, ?layer:Layer):InterpTokens
* **יכולת: גישה לא בטוחה לזיכרון**
  + כברירת מחדל, יש למשתמשים בשפה גישה למחלקה ששמה Memory, המספקת מספר פעולות ומשתנים העוזרים עם גישה והתעסקות "לא בטוחה" עם הזיכרון
  + שדות ומחלקות נחוצים:
    - Plugins
      * registerType(typeName:String, fields:TypeFields)
    - ExternalInterfacing.ExtTree
* **יכולת: קבלת כתובות של ערכים בזיכרון**
  + כברירת מחדל, לכל ערך מאופשר השדה address, המחזיר את המקום בזיכרון של אותו ערך, בין אם סתם ערך, משתנה, או פונקציה.
  + שדה נחוץ:
    - Plugins
      * registerInstanceVariable(propertyName:String, propertyType:String, onType:String, ?documentation:String, ?staticValue:InterpTokens, ?valueGetter:(objectValue:InterpTokens, objectAddress:MemoryPointer) -> InterpTokens)
* **יכולת: אחזור סוג של ערך בזמן ריצה**
  + לכל ערך מאופשר השדה type, המחזיר את שם הסוג של ערך מסוים. הוא לא מבדיל בין סוגים של מידע – לפונקציות זה יחזיר Function, ולסוגים זה מחזיר Type. (כמובן שאפשר לשנות את שמות הסוגים, לפחות בלקוח האינטרנטי)
  + שדה נחוץ:
    - Plugins
      * registerInstanceVariable(propertyName:String, propertyType:String, onType:String, ?documentation:String, ?staticValue:InterpTokens, ?valueGetter:(objectValue:InterpTokens, objectAddress:MemoryPointer) -> InterpTokens)
* **יכולת: שינוי מילים שמורות**
  + זמין בלקוח האינטרנטי – המשתמש יכול בעצמו לשנות את המילים השמורות לשפה אחרת, סגנון אחר, או סתם לקצר.
  + שדות נחוצים:
    - JsExample
      * keywordTable:TableElement
      * new()#update()
      * getCodeExample(keyword:String):String
* **יכולת: מגוון פעולות "broadcast"**
  + המשתמש יכול להשתמש ב3 פונקציות על מנת להדפיס דברים לקונסולה:  
    print – הדפסה רגילה, עם מודולה ושורה  
    warn – כמו print, אבל עם ההקדמה "WARNING". קוד ממשיך לרוץ  
    error – גם כמו print, עם ההקדמה "ERROR". קוד מפסיק לרוץ
  + שדות נחוצים:
    - Runtime
      * print(item:String)
      * warn(token:InterpTokens, ?layer:Layer = INTERPRETER)
      * throwError(token:InterpTokens, ?layer:Layer = INTERPRETER):InterpTokens
      * broadcast(item:String)
      * \_\_broadcast(item:String)
      * \_\_print(item:String, representativeToken:InterpTokens)
* **יכולת: קריאה דינמית של משתנים**
  + פעולת read יודעת להחזיר את הערך של משתנה, רק לפי שמו או מסלול המוביל אליו, כשהוא מובא כמחרוזת. זה כלי חזק מאוד, המאפשר שימוש מותנה במשתנים מסוימים, וגם תכנות עם כל מני אפשרויות "מאקרו-איות".
  + שדה נחוץ:
    - Plugins
      * registerFunction(functionName:String, ?documentation:String, expectedParameters:EitherType<String, Array<InterpTokens>>, callback:Array<{objectValue:InterpTokens, objectTypeName:String, objectAddress:MemoryPointer}> -> InterpTokens, returnType:String)
    - ExternalInterfacing.ExtTree
* **יכולת: הכרזה דינמית של משתנים**
  + כאשר מכריזים על משתנה/פונקציה, שם השדה יכול להיות בלוק של קוד שמחזיר מחרוזת. יש לציין שלא כל מחרוזת מותרת: מחרוזת חייבת להיות בעל לפחות אות אחת, ללא רווחים, ללא אופרטורים, ולא להתחיל במספר (כמובן, שגיאות ייזרקו בהתאם, תלוי במעבר על הכללים)
  + שדות נחוצים:
    - Interpreter
      * declareVariable(name:InterpTokens, type:InterpTokens, doc:InterpTokens)
      * declareFunctiondeclareFunction(name:InterpTokens, params:InterpTokens, doc:InterpTokens)

# מבנה הפרויקט

## ארכיטקטורה

### רכיבים שונים, והקשרים ביניהם

כמו שנאמר מקודם (תחת הכותרת של "מערכת"), הפרויקט עצמו מורכב מ3 חלקים – שפה (ספציפיקציה), הקומפיילר, או, יוצר ה-AST, והאינטרפרטר, או, המכונה הוירטואלית. בזמן שהספציפיקציה כמעט ולא נמצאת בתוך הקו, שני החלקים האחרים של הפרויקט מאוד מופרדים, ונמצאים בתקיות שונות, ואחד לא משתמש בשני. אותם שני חלקים גם משתמשים בכלים גלובליים, היכולים להסתמך בחזרה על אותן מערכות במקרי קצה יחסית ספציפיים (לדוגמה, קבלת סוג של ערך, כאשר הערך מובא בתור מזהה). אערוך את הזרימה בין המערכות ובין המחלקות בתור רשימה, ואביא גם שרטוט. הבה נתחיל:

* + - קומפיילר:
  + Lexer – לוקח את הקלט מהמשתמש, בצורת מחרוזת. המחלקה מפצלת את הטקסט לטוקנים, המופרדים לפי סוגם – מזהה, מספר, ואופרטור. כאן נמצא השימוש הראשון בכלים הגלובליים, על מנת לזהות מהו אופרטור בדיוק. לאחר ההרצה, אנו נמצאים עם מערך טוקנים פשוט:
  + Parser – לוקח את הטוקנים מהLexer, וממיר אותם לכאלה בצורה שנוח לו להתעסק איתה. לאחר מכן, מעביר את הטוקנים האלה סדרה של פונקציות, אחת אחרי השנייה, ומפתח עץ syntax יותר ויותר "מסובך" – כל שלב נועד לתת מענה לתכונה אחרת בשפה, ולכן אפשר לראות שכל שלב מעמיק וגם מקצר קצת את העץ. מדובר בקובץ מאוד ארוך (כ950 שורות), המכיל את רוב הקומפיילר, גם פיזית וגם לוגית. עכשיו, התוצאה שקיבלנו קרובה מאוד לעץ הsyntax הרשמי. קיבלנו את העץ הסופי, עכשיו הגיע הזמן ל"ייצא" אותו, ולהשתמש בו:
    - אינטרפרטר:
  + Interpreter.convert – לוקח את העץ שקיבלנו מהקומפיילר, וממיר אותו לטוקנים הנוחים לשימוש באינטרפרטר.
  + PrepareRun – לפני הרצה, מוסיף את כל המשתנים, הפונקציות, האופרטורים, הסוגים והשדות ומייצר את הספריה הסטנדרטית, באמצעות:
    - * Plugins – מכיל מגוון פעולות להוספת אלמנטים חיצוניים לשפה, ממשתנים רגילים ועד לשדות על סוגים ספציפיים ואופרטורים. משתמש במחלקה ExternalInterfacing, שעליה אפרט בהמשך.
  + Interpreter.run – לאחר מכן, אנו לוקחים את כל העץ, ומריצים אותו בעזרת פונקציית ההרצה העיקרית. הפונקציה משתמשת במגוון הפעולות שעל המחלקה Interpreter על מנת לממש את ההרצה, קוראת לאירועים שבמחלקה Runtime כשמצופה, וכשצריך לשמור מידע, היא משתמשת במחלקה Memory. אין סדר קבוע לקריאות האלה, שכן הן תלויות בקלט מהמשתמש. אפרט עם השלושה:
    - * Interpreter – מכיל פונקציות המפעילות את הטוקנים מעץ הsyntax – הכרזת משתנה, חישוב ביטוי, קריאה לתנאי...
      * Memory – מכיל פונקציות המאחסנות, קוראות וכותבות זיכרון בעזרת 5 מחלקות אחרות:
        + Storage – מערך זיכרון ענק, מספק פונקציות של כתיבה, עריכה ובקשת הרחבה של אותו מערך זיכרון, לפי מצביעים המעוצבים כדי לגשת לאותו מערך
        + Referrer – גם מערך זיכרון, אך קטן בהרבה – מקשר בין שמות משתנים לערכם, תלוי במקום ממנו הם מבוקשים
        + ExternalInterfacing – המגשר הסופי בין ערכי Haxe לערכי Little, מייצג את ערכיו כעצים ולא כמערך בתים
        + ConstantPool – בריכה של ערכים נפוצים, קיים על מנת לחסוך בזיכרון. לוקח זיכרון מ-Storage.
        + HashTables – מיצר, קורא וכותב מפות hash בעזרת האלגוריתם MurmurHash1. בעזרתו אפשר לגשת לאובייקטים.
      * Runtime – מכיל אירועים שונים, שאמורים להקרא כל פעם שדבר מסוים מתבצע ע"י האינטרפרטר – טוקן נקרא, משתנה מוכרז...  
        גם מכיל מידע על הריצה עצמו (כמו הפלט לדוגמה), ופונקציות ההדפסה למיניהן (print, warn, throwError, broadcast). broadcast דומה ל-print, אך אפשר לערוך אותו – נועד למפתחים המשתמשים בפרויקט הזה כספריה לאפליקציות שלהם.

## טכנולוגיה

### שפת תכנות

הפרויקט מתוכנת בשפת תכנות ששמה Haxe.

Haxe היא שפה, טרנספיילר ואינטרפרטר רב-מטרתי, המאפשר בניית אפליקציות למגוון שפות תכנות, קודי-בתים (bytecode), ואפילו הרצה על המקום בעזרת אינטרפרטר מיוחד.

Haxe מאפשרת בניית קוד למגוון שפות תכנות אחרות: JavaScript, C, C++, C#, Java, Lua, PHP, Python ו-ActionScript3.  
היא גם מאפשרת ייצור קוד-בתים ותמיכה מיוחדת לכמה פלטפורמות: יש תמיכה בNodeJS ואפשר לצור קובצי SWF ישירות. אפשר גם לקמפל קוד בתים למכונות הווירטואליות Neko ו-Hashlink, וכן קוד-בתים JVM.

Haxe, כמו הפרויקט הזה, הוא פרויקט open source, תחת רשיון MIT. הפיתוח שלו התחיל ב2005, ע"י Nicolas Cannasse, יוצר ואחד ממפתחי הקומפיילר [MTASC](https://github.com/ncannasse/mtasc).  
 הטרנספיילר והאינטרפרטר של השפה כתובים ב-OCaml, שפה הידועה ביכולות עיבוד המידע שלה, ולכן גם שפה טובה לכתיבת שפות תכנות.

סגנון התכנות של השפה ותכונותיה לקוחות משפות כמו JavaScript וC#, אך היא גם מציעה תכנות יחסית יחודיות, שעוזרות בעיבוד מידע, כמו Algebraic Data Types וVariable Capturing בתנאי switch.

### תחומי עניין

באופן כללי, הפרויקט מתעסק בעיבוד, אחסון ומניפולציית מידע בסדר גודל גדול, ויותר בפוקוס: קומפיילרים, אינטרפרטרים, וקידוד מידע.

קומפיילר הוא תוכנה הממירה סוג תוכן מסוים, בדרך כלל קוד בשפת תכנות מסוימת, מילפורמט הניתן להרצה, בדרך כלל קוד מכונה. לרוב, קומפיילר בנוי מ-3 שלבים: Lexer, Parser, ולבסוף, Generator. בפרויקט הזה, שני השלבים הראשונים קיימים באופן מלא, והשלב השלישי מתממש ע"י יצירת קוד-בתים של עץ הsyntax ש"נפלט" בסוף.

אינטרפרטר היא תוכנה המקבלת מערך של פיסות מידע, ומפעילות רכיבים מסוימים בצורה שבד"כ מבצעת אינטראקציה עם המשתמש. האינטרפרטר לרוב מורכב מכמה "מרכזי ניהול" עיקריים: זיכרון, אינטראקציה עם המערכת, וכמובן, "סורק" קוד.

קידוד מידע הוא תחום החופף הצפנת מידע – כמו בהצפנה, המידע משנה צורה, אך כאן המטרה היא, בדרך כלל, לכווץ אותו או לפרמט אותו בדרך שקלה לקרוא/לכתוב. דוגמה טובה היא אלגוריתמי hash – המטרה אינה בהכרח להצפין, אלא להמיר מידע למידע אחר באורך סטטי אך עם תוכן משתנה, בהתאם לקלט.

## זרימת מידע במערכת

### הקומפיילר

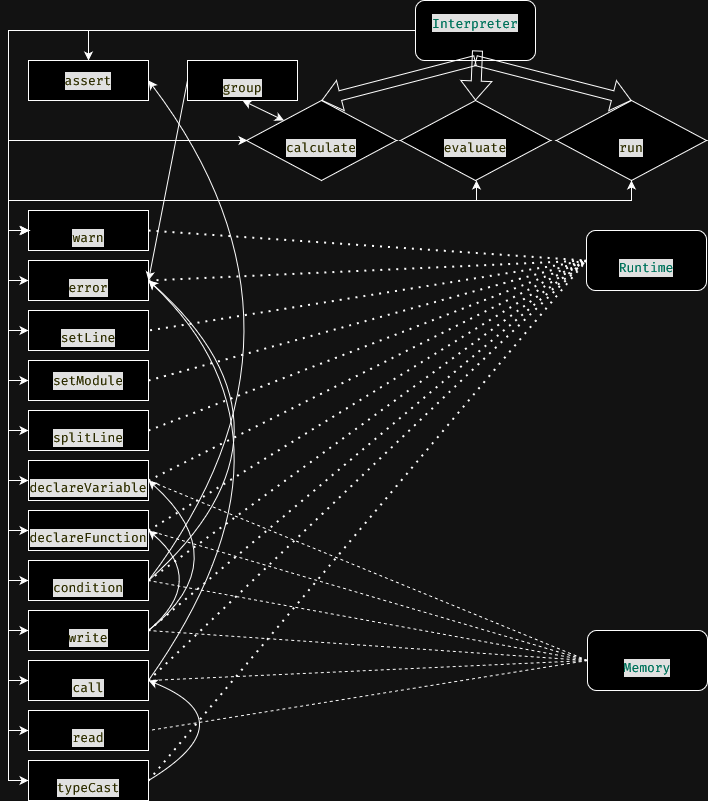
השלב הראשון ב"מימוש" הקוד. מכיל מספר יחסית קטן של רכיבים יחסית גדולים:

תמונה שמכילה צילום מסך, טקסט, תרשים, עיצוב

התיאור נוצר באופן אוטומטי

### האינטרפרטר

שלב המימוש עצמו. חצי מהמערכת ה"חיה":



## אלגוריתמים מרכזיים

בכותרות הבאות, אפרט על בעיות מסוימות, שהשתמשתי/פיתחתי אלגוריתמים כדי לפתור אותם.

### קישור בין משתנים למקומות בזיכרון

כשרוצים לאחסן ערך מסוים, לא מספיק רק לשמור אותו בזיכרון – צריך גם לדעת איפה הוא נמצא, ומה הגודל שלו.

לבעיה יש מגוון פתרונות קיימים:

יצירת Stack – תוכנה מפנה לה בצד כמות קטנה יחסית של מידע, ושומרת בצד שני ערכים – מצביע לתחילת הstack המדובר, ומצביע שמעיד על התחלת ה"מסגרת" הנוכחית של הstack. במבנה הזה אפשר לשמור מידע בגדלים שרירותיים, בצורה שהערך שנוסף אחרון נמצא גם אחרון, לפני המידע הלא מנוצל. מסגרת חדשה נוצרת כל פעם שנוספת קריאה למקום מסוים, כמו בלוק של קוד או פונקציה, וכל המסגרת נמחקת בסוף ההרצה של אותו מקום. מקורות:

* + <https://en.wikipedia.org/wiki/Stack-based_memory_allocation>
  + <https://www.geeksforgeeks.org/stack-implementation-in-operating-system-uses-by-processor/>

יצירת Heap – תוכנה מקבלת בעת התחלתה כמות מסוימת של מידע, ויכולה לבקש עוד. כשמבקשים לאחסן משתנה, בהתאם לאימפלמנטציה של ה-Heap, מפונה כמות מסוימת של מקום המתאימה לפחות לגודל המשתנה, ותלוי באימפלמנטציה, יכולים לאחסן במקום מסוים בתוך ה-Heap מידע מסוים לגבי בקשות אחסון, כמו המקום שלהם וגודלם לדוגמה. מקורות:

* + <https://en.wikipedia.org/wiki/Memory_management#HEAP>
  + <https://discourse.julialang.org/t/a-nice-explanation-of-memory-stack-vs-heap/53915>

בסוף, על אף איכות הפתרונות הקיימים, הלכתי על פתרון אחר, שיותר מתאים לסגנון הפרויקט, וקצת יותר פשוט. קראתי לפתרון "Referrer".

הReferrer מורכב ממספר מפות של כתובות הנמצאות אחד אחרי השני, ומופרדות באמצעות "כותרות", המכילות את מיקום הבלוק ככתובת, ואורך המפה הקודמת והנוכחית כמספר בעל 16 ביטים (ערך מקסימלי: 65535). בצד, בדומה ל-Stack, אנו שומרים את מיקום הכותרת האחרונה, אך בשונה, גם את האורך **הנוכחי** שלה. כל פעם שמוכרז קשר כלשהו בין מזהה לערך, נוספת למפה האחרונה זוג מפתח-ערך, כאשר ה-hash של המזהה הוא המפתח, והכתובת + סוג הערך המוצמד למזהה מהווים את הערך של המפתח במפה. כל פעם שנפתחת מסגרת חדשה (התחלת בלוק של קוד: קריאה לפונקציה, תנאי...) נוספת כותרת חדשה עם מפה חדשה, וההפך קורה כשנגמר בלוק הקוד. זה מאפשר variable shadowing – הגדרת משתנה לאותו שם פעמיים, כשאחד מההכרזות נמצאות במסגרת "עמוקה יותר".

ההבדל העיקרי בין הפתרון הזה לאחרים שהזכרתי מקודם, שהוא גם הסיבה העיקרית לבחירה בו, היא דווקא זה שהשימוש בפתרון הנוכחי הוא יחיד – בזמן שה-Stack וה-Heap מספקים ביחד פתרון לאחסון + מאגר אזכורים, כבר הייתה לי מערכת אחסון, ולא רציתי לתכנת משהו שאשתמש רק בחלק ממנו, כי זה 1) נראה לא טוב ו2) משאיר מקום לטעות עם מפתחים שמשתמשים בפרויקט כספריה, ולכן לקחתי את הפתרון המקורי הזה – משומש אך ורק לאזכורים, ועושה זאת בצורה מסודרת בלי לקחת כמות "הזויה" של זיכרון.

### חישוב והערכת ביטויים

חלק בלתי נפרד מתכנות זה הערכת ביטויים על מנת לייצר ערך. הבעיה היא, זה לא כל-כך פשוט – יש סדרי פעולות חשבוניות, סוג הביטוי יכול להשתנות באמצע, וכן הלאה. יש פתרון אחד ידוע לזה, והשתמשתי בגרסה קצת שונה שלו, על מנת להתחשב בפיצ'רים מסוימים של השפה (הגדרת אופרטורים בזמן ריצה וכינויים, כמו define add = +)

הפתרון קיים, והגרסת ה"השראה" שלו:

Shunting Yard –לוקחים את הביטוי המתמטי כמערך של מזהים, ויוצרים סטאק ריק שאמור להכיל את האופרטורים, ומערך פלט שאמור להכיל את הביטוי המסודר, לפי פורמט שהוחלט מראש (סימון פולני, סימון פולני הפוך או עץ syntax). מערך הפלט נבנה כך – לכל טוקן בביטוי המקורי:

* + אם הוא מספר, מוסיפים אותו ישר לפלט
  + אם הוא אופרטור/פונקציה, יש כמה אופציות:
    - אם האופרטור בדרגה גבוהה יותר מהאופרטור שבראש הסטאק, הוא נוסף לסטאק
    - אם האופרטורים באותה דרגה/האופרטור החדש בדרגה נמוכה יותר, האופרטור הקיים נוסף לפלט ומורד מהסטאק, במקומו מוסיפים את האופרטור החדש

מקורות:

* + <https://en.wikipedia.org/wiki/Shunting_yard_algorithm>
  + <https://brilliant.org/wiki/shunting-yard-algorithm/>

גרסה בפרויקט:

Shunting Yard (Inspired) – האלגוריתם מפוצל לשני שלבים:

* + group – לפי האופרטורים המוגדרים ולפי ערכי המזהים בקלט, מרכיב עץ syntax המורכב מביטויים קטנים יותר באורך של עד 3 טוקנים, המכילים עד 2 ערכים ואופרטור אחד. לא נוצר סטאק לאופרטורים, במקום זה, אנו עוברים על האופרטורים בקבוצות, מהחשובים ביותר להכי פחות חשובים, וכך יוצא שטוקנים בעלי אופרטור חשוב יותר, לדוגמה, ^ (חזקה) יקובצו מוקדם יותר מכאלה ברמה נמוכה יותר, לדוגמה, +. בעצם, כל הפעולה נעשית קצת כמו מיון מערך In-place. בסוף, יוצא שביטוי שנכנס ככה:
    - 2 + 5! \* 3 ^ -4

יצא ככה:

* + - (2 + ((5 !) \* (3 ^ (- 4))))
  + calculate – יוצרים 3 משתנים – ערך נוכחי, אופרטור נוכחי, ערך עד עכשיו. עוברים על עץ הsyntax שgroup מייצר, ועבור כל טוקן:
    - אם הוא מספר, מציבים אותו ב"ערך נוכחי", ואם יש ביטוי, קוראים שוב לcalculate עליו
      * אם יש כבר אופרטור, זה אומר שהביטוי חייב להסתיים. מחשבים את הביטוי כאשר "ערך עד עכשיו" בצד שמאל ו"ערך נוכחי" בצד ימין, ומציבים את התוצאה ב"ערך עד עכשיו".
      * אם אין אופרטור ו"ערך עד עכשיו" לא מוגדר, ערכו הופך לערך הזה.
      * אם אין אופרטור ויש "ערך עד עכשיו" נזרקת שגיאה ששני מספרים באו אחד אחרי השני
    - אם הוא אופרטור מציבים אותו ב"אופרטור נוכחי".
      * אם האופרטור הוא הטוקן האחרון, מחשבים את הביטוי כאשר "ערך עד עכשיו" בהתחלה, והאופרטור בסוף.

ההבדל העיקרי בין האלגוריתם שלי לאחד הקלאסי הוא השינוי מאחסון המידע בסטאק ופלט למודיפיקציה In-place (גם לאחד הקלאסי יש גרסה של אחסון באמצעות עץ syntax דומה לאחד שאני מרכיב, לכן זה לא הבדל). הסיבה היחידה להבדל היא נוחות ועקביות – הרוב המוחלט של הפרויקט מתכונת בעזרת פונקציות רקורסיביות, ואני מרגיש מאוד בנוח איתן, אז החלטתי שגם האימפלמנטציה של האלגוריתם הזה יהיה רקורסיבי.

### **Hashing**

כשתכנתתי ניהול זיכרון, החלטתי שאובייקטים יאוחסנו כמפות hash של השדות שלהם. לכן, הייתי צריך להחליט על אלגוריתם hashing. ישנן יחסית הרבה אופציות זמינות, אך לקחתי אחת סבירה יחסית, מאילוצים:

SipHash – אלגוריתם hashing המשתמש בשיטת Add -> Rotate -> Xor על מנת לייצר hashים. אלגוריתם זה אינו קריפטוגרפי, או במילים אחרות, אינו נועד להצפנה. הוא קיים על מנת להציב אלגוריתם אלטרנטבי שטוב למלחמה במתקפות התנגשות, בהם התוקף מנסה למצוא שני ערכים המנסים למצוא את אותו הhash. אם משתמשים בSipHash, גם אם התוקף יודע את המפתח ואת תוצאת האלגוריתם, או את ערך שעושים לו hashing ואת תוצאת האלגוריתם, לא יהיה ניתן לנחש את הנתון החסר. מקורות:

* + <https://en.wikipedia.org/wiki/SipHash>

MurmurHash – אלגוריתם hashing המבוסס על אותה שיטה (ARX). גם הוא לא קריפטוגרפי, ומטרתו להיות פונקציית hashing מהירה. יש לה חסינות סבירה להתנגשויות, אך לא חסינה למתקפות מכוונות. MurMur היא משפחה של פונקציות hashing בעלת 3 דורות:

* + MurMur1 – הגרסה הראשונה, ניסתה להיות שיטה מהירה יותר של Lookup3, והצליחה. מאפשרת hashing רק אל תוך מספר 32 בתים
  + MurMur2 – הגרסה השנייה, בעל המון גרסאות אלטרנטיביות. פשוט גרסה יותר טובה של MurMur1 עם יותר אופציות
  + MurMur3 – הגרסה השלישית והעדכנית. שיפור על הגרסה השניה, מציע גם ייצור hashים באורך 128 בתים.

מקורות:

* + [https://en.wikipedia.org/wiki/MurmurHash](https://en.wikipedia.org/wiki/SipHash)

בחרתי באלגוריתם MurMur1 ממשפחת MurMur – ספציפית בחרתי בסוג האלגוריתמים מאילוץ, ובחרתי בדור הראשון מכיוון שהוא התאים טוב למקרה שלי – רציתי להשתמש באלגוריתם כדי לייצר אינדקסים במפת hash, והדור הראשון מייצר מספרים באורך 32 בתים, שלמקרה השימוש שלי מספיק.

## סביבת עבודה

### פיתוח

על מנת לתכנת ולהריץ את הקוד, יש להוריד את הקומפיילר של Haxe, ומספר ספריות:

Haxe Compiler – גרסה .14.3 לפחות

vision – מגיטהאב, בטא של גרסה 2.0.0 (לפחות)

hash – גרסה 1.0.1

hxOrderedMaps – לא מפורסם רשמית, מגיטהאב.

את הספריות ניתן להתקין באמצעות Haxelib, המותקן באופן אוטומטי כשמתקינים את הקומפיילר של Haxe. את הספריות הרשמיות ניתן להתקין באמצעות:

Haxelib install <libname>

או, עם ספריות מגיטהאב/גיטלאב/כל שירות אחר, באמצעות:

Haxelib git <libname> <link\_to\_repository>

### בדיקה

לפני שבודקים את הקוד, יש צורך להוריד את התוכנות והספריות שהוזכרו בפיתוח. לאחר מכן, ניתן לבדוק בשלושה דרכים:

לקוח אינטרנטי – יש לשים לב שהשורות הבאות בקובץ compile.hxml מבוטלות (באמצעות הוספת # בתחילתן):  
--interp#  
#--define unit  
והשורה הזאת פועלת (באמצעות מחיקת ה#)  
--js interp.js  
לאחר מכן, בונים את התוכנה באמצעות Haxe compile.hxml, ונכנסים/מרעננים את הקובץ index.html הנמצא בשורש של הפרויקט.

לקוח שורת פקודה – יש להחליף את ה-# בין השורה של --interp ו --js interp.js, וכן להשאיר את unit מבוטל:  
--interp  
#--js interp.js  
#--define unit

לאחר מכן, כמו קודם, בונים את הפרויקט, ומקבלים קצת מידע ושני "משולשים" בשורת הפקודה, ומשם ניתן לבדוק את הפרויקט. יש לבנות מחדש כדי לשנות את הפרויקט

unit testing – יש לשים לב ש --js interp.js מבוטל, ו --interp,  
 --define unit לא מבוטלים:  
--interp  
#--js interp.js  
--define unit

לאחר מכן, בונים את הפרויקט, וכל 14 הבדיקות יורצו, אחת אחר השניה, וידווחו עם הבדיקה הצליחה, ואם לא מה הערך הלא צפוי שהוחזר, עץ הsyntax, הקוד, והפלט.

# מימוש הפרויקט

## חלקים ומחלקות

כמו שהוזכר קודם לכן, הפרויקט מורכב ממספר חלקים העובדים ברצף, אך אינם מסתמכים אחד על השני, וחלק מיוחד הנקרא tools, המספק כלים לשאר החלקים. ישנם 3 חלקים "מג'וריים", בעוד שאחד מהם מכיל בתוכו עוד חלק גדול יחסית (הזיכרון). אתייחס לחלק הזה ולחלק-הורה שלו בנפרד.

קיימים ארבעה סוגים עיקריים של מבני מידע בפרויקט:

מחלקה (class) – הסוג הקלאסי, יכול לייצג אובייקט ואת עצמו. מכיל שדות סטטיים ותלויי מקרה

אבסטרקט (abstract) – סוג של זמן קומפילציה בלבד, מתקמפל בסוף לסוג אחר שהוא בנוי עליו. שדות סטטיים קיימים בסוף על אובייקט נפרד, והקוד של שדות תלויי מקרה מוצבים בשורה בה מבוקש הערך. נמצא בשימוש מטעמי מהירות.

ספירה (enum) – הספירה הקלאסית, בתוספת התכונה המיוחדת של יצירת [algebraic data types](https://code.haxe.org/category/beginner/enum-adt.html).

ספירה אבסטרקטית – הספירה הקלאסית, ללא פיצ'רים נוספים. כל אלמנט מיצוג ע"י ערך מסוג אחר. מתקמפל בסוף לסוג שהוא בנוי עליו, באותה התנהגות כמו אבסטרקט רגיל.

הגדרה (typedef) – דרך מיוחדת ליצור כינוי, או לתת מבנה קונקרטי לאובייקט דינמי, כך שיהיה חייב להכיל את השדות המוזכרים בהגדרה. ערכו יכול להיות או סוג/אבסרקט/וכו', או "אובייקט" בעל שדות המוגדר באמצעות סוגריים מסולסלים. [קישור להסבר מורחב](https://haxe.org/manual/type-system-typedef.html)

### חבילה – little.lexer

ספירה – LexerTokens – מכיל את הטוקנים שמשתמשת בהם המחלקה Lexer, על מנת להפוך קוד בפורמט מחרוזת, לקוד המפוצל למזהים:

* + Identifier(name:String) – מייצג מזהה ששמו <name>
  + Sign(char:String) – מייצג אופרטור שסימנו <char>
  + Number(num:String) – מייצג מספר כלשהו שערכו <num>
  + Boolean(value:String) – מייצג ערך בוליאני שערכו true/false
  + Characters(string:String) – מייצג מחרוזת שתוכנה <string>
  + NullValue – מייצג את המזהה null
  + Newline – מייצג שורה חדשה
  + SplitLine – מייצג פיצול בשורה
  + Documentation(content:String) – מייצג דוקומנטציה/תגובה
* מחלקה – Lexer – מכיל פונקציות שביכולתן להפוך מחרוזת המכילה קוד (הכתוב בLittle) למערך מזהים מסוג LexerTokens:
  + lex(code:String):Array<LexerTokens> – מקבל קוד הכתוב בLittle, וממיר אותו למערך מעובד של טוקנים מסוג LexerTokens, בעזרת הפונקציות הבאות. עובר על הקוד אות אות.
  + separateBooleanIdentifiers(tokens:Array<LexerTokens>):Array<LexerTokens> – מקבל מערך של טוקנים מסוג LexerTokens, ומזהה אילו מה-Identifier(name:String) מכילים בתוך הname שלהם ערכים בוליאניים, ומפצל אותם לBoolean או NullValue.
  + mergeOrSplitKnownSigns(tokens:Array<LexerTokens>):Array<LexerTokens> – מקבך מערך של טוקנים מסוג LexerTokens, ומזהה מתי קומבינצית סימנים היא נכונה, ומתי צריך לפצל אותה. זה הכרחי, מכיוון שלא כל האופרטורים הם אות אחת, ולכן צריך לדעת מתי האופרטור הוא בודד ומתי באורך מסוים.

### חבילה – little.parser

ספירה – ParserTokens – מכיל את הטוקנים שמשתמשת בהם המחלקה Parser, על מנת להפוך את הקוד מקבוצת מזהים לעץ syntax שלם.

* + SetLine(line:Int) – טוקן המביע צורך לשנות את מספר השורה הנוכחית למספר אחר
  + SplitLine – מביע צורך להפסיק את קריאת השורה ברצף, להגביר את מספר החלק הנוכחי בשורה הנוכחית.
  + Variable(name:ParserTokens, type:ParserTokens, ?doc:ParserTokens) – מבטא יצירת משתנה, ששמו, סוגו והדוקומנטציה שלו מבוטאות בעזרת טוקנים שונים. אתם הטורנים חייבים "להיפתר" למזהה/תגובה, בהתאם לפרמטר.
  + Function(name:ParserTokens, params:ParserTokens, type:ParserTokens, ?doc:ParserTokens) – מבטא יצירת פונקציה ששמה, סוגה, והדוקומנטציה שלה מבוטאים בעזרת טוקנים, הנפתרים למזהים/תגובות, בהתאם למקרה. params צריך להיות טוקן מסוג PartArray, המכיל הכרזות משתנה מסוג Variable.
  + ConditionCall(name:ParserTokens, exp:ParserTokens, body:ParserTokens) – מבטא קריאה לתנאי ששמו מבוטא בעזרת טוקנים הנפתרים לטוקן מסוג Identifier, "הפרמטר" של התנאי יכול להיות כל טוקן, והגוף של התנאי יהיה כל טוקן הניתן להרצה, בד"כ טוקן מסוג Block.
  + Write(assignees:Array<ParserTokens>, value:ParserTokens) – טוקן המייצג כתיבה של ערך, value, לקבוצה של מזהים, או לפחות טוקנים שאמורים להפתר למזהים (טוקנים מסוג Identifier).
  + Identifier(word:String) – מייצג את המזהה. בד"כ, כשנתקלים בו בקוד, יש למשוך את ערכו מהזיכרון בהתאם לשמו.
  + TypeDeclaration(value:ParserTokens, type:ParserTokens) – מיצג יציקת ערך מסוים לסוג שאינו בהכרח של אותו ערך. לא מבטיח התאמה בין הערך לסוג.
  + FunctionCall(name:ParserTokens, params:ParserTokens) – מבטא קריאה לפונקציה, כאשר שמה מבוטא באמצעות טוקן כזה או אחר הנפתר לIdentifier, והפרמטרים מובאים באמצעות טוקן מסוג PartArray
  + Return(value:ParserTokens, type:ParserTokens) – מבטא החזרת ערך בפונקציה – כשמורץ, אמור לסיים הרצה לפני שכל הטוקנים סיימו להריץ
  + Expression(parts:Array<ParserTokens>, type:ParserTokens) – מבטא מספר טוקנים אחד אחרי השני, המחוברים בהיותם בתוך סוגריים רגילים.
  + Block(body:Array<ParserTokens>, type:ParserTokens) – מבטא מספר טוקנים, שמטרתם להיות מורצים, אחד אחרי השני. מבוטא בעזרת קוד הסגור בסוגריים מסולסלים
  + PartArray(parts:Array<ParserTokens>) – מבטא סתם מערך של טוקנים. לא יכול להמצא בקוד רגיל, נוצר באופן מלאכותי ע"י הParser.
  + PropertyAccess(name:ParserTokens, property:ParserTokens) – מבטא גישה לשדה על טוקן אחר. הפרמטר name יכול להיות בעצמו PropertyAccess, ובמקרה זה יש גישה "משולשת" אל תוך שדה.
  + Sign(sign:String) – מייצג אופרטור שסימנו <sign>
  + Number(num:String) – מייצג מספר שלם שערכו <num>
  + Decimal(num:String) – מייצג מספר עשרוני שערכו <num>
  + Characters(string:String) – מייצג מחרוזת שמכילה את האותיות <string>
  + Documentation(doc:String) – מייצג דוקומנטציה
  + ErrorMessage(msg:String) – מייצג טוקן שגיאה האומר <msg>
  + NullValue – מייצג את הערך null
  + TrueValue – מייצג את הערך הבוליאני true
  + FalseValue – מייצג את הערך הבוליאני false
  + Custom(name:String, params:Array<ParserTokens>) – טוקן שמשתמשים בשפה בתור כלי יכולים לצור בעצמם, וכך לעזור להם השחלת מאקרואים.
* מחלקה – Parser – מכיל פונקציות המאפשרות המרה של מערך המזהים שקיבלנו מLexer, לעץ syntax מפורט ושלם.
  + additionalParsingLevels:Array<Array<ParserTokens> -> Array<ParserTokens>> - מערך של שלבי עיבוד נוספים למידע שמייצרת הפונקציה parse. מורכב מפונקציות, שיקראו מיד אחרי שהבניה ה"רגילה" הסתיימה.
  + parse(lexerTokens:Array<LexerTokens>):Array<ParserTokens> – לוקח קוד המיוצג באמצעות מערך מזהים, ממיר אותו לטוקנים מסוג ParserTokens, ומעביר אותם מספר שלבי בניה, עד שנוצר עץ syntax שלם. שלבי הבניה הן הפונקציות הבאות, ואחריהן באות אלה שנמצאות בadditionalParsingLevels.
  + convert(lexerTokens:Array<LexerTokens>):Array<ParserTokens> – שלב ההמרה – עובר על כל הטוקנים מסוג LexerTokens, ממיר אותם, ומחזיר מערך של טוקנים זהים במשמעותם מסוג ParserTokens.
  + mergeBlocks(pre:Array<ParserTokens>):Array<ParserTokens> – ממיר כל קבוצת טוקנים המוקפת בסוגריים מסולסלים לטוקן מסוג Block.
  + mergeExpressions(pre:Array<ParserTokens>):Array<ParserTokens> – ממיר כל קבוצת טוקנים המוקפת בסוגריים רגילים לטוקן מסוג Expression.
  + mergePropertyOperations(pre:Array<ParserTokens>):Array<ParserTokens> – מאחד כל מקרה של טוקנים שיש ביניהם אופרטור שאמור להעיד על גישה לשדה, לטוקן מסוג PropertyAccess.
  + mergeTypeDecls(pre:Array<ParserTokens>):Array<ParserTokens> – מאחד כל מקרה שיש מזהה שמשמעותו "הדגשת" סוג, ואחריו טוקן אחר לTypeDeclaration
  + mergeComplexStructures(pre:Array<ParserTokens>):Array<ParserTokens> – יוצר הכרזות משתנים, פונקציות, החזרות פונקציה וקריאות לתנאים לפי רצפים מסוימים של טוקנים בקוד.
  + mergeCalls(pre:Array<ParserTokens>):Array<ParserTokens> – משלב טוקנים ספציפיים שאחריהם סוגריים ללא הפרדה לטוקן FunctionCall.
  + mergeWrites(pre:Array<ParserTokens>):Array<ParserTokens> – משלב רצפי השוואה לטוקן מסוג Write
  + mergeValuesWithTypeDeclarations(pre:Array<ParserTokens>):Array<ParserTokens> – משלב טוקנים שאחריהם בא TypeDeclaration ללא ערך, לTypeDeclaration יחיד עם ערך.
  + mergeNonBlockBodies(pre:Array<ParserTokens>):Array<ParserTokens> – מתקן מקרים של קריאות לתנאים בהם במקום לספק בלוק של קוד, המתכנת מספק שורת קוד/טוקן אחר.
  + mergeElses(pre:Array<ParserTokens>):Array<ParserTokens> – פונקציית הדוגמה שבתוך additionalParsingLevels, מוסיפה פיצ'ר – תומכת ברצפי else אחרי תנאי if.
  + line:Int – השורה הנוכחית עליה הParser נמצא
  + linePart:Int – החלק הנוכחי בשורה הנוכחית בו הParser נמצא
  + setline(l:Int) – עורך את השורה הנוכחית, מאפס את החלק הנוכחי
  + nextPart() – מגביר את החלק הנוכחי.
  + resetLines() – מאפס את השורה הנוכחית, מאפס את החלק הנוכחי.

### חבילה – little.interpreter

ספירה – InterpTokens – מכיל את הטוקנים שמשתמשות בהם מחלקות ההרצה, על מנת לממש את הטוקנים ולהפוך אותם לתוכנה עובדת.

* + SetLine(line:Int) – מייצג שינוי בשורה הנוכחית.
  + SplitLine – מייצג מעבר לחלק הבא בשורה הנוכחית.
  + VariableDeclaration(name:InterpTokens, type:InterpTokens, ?doc:InterpTokens) – מייצג הכרזת משתנה, ששמו, סוגו והדוקומנטציה שלו מובטאות בעזרת טוקנים שונים.
  + FunctionDeclaration(name:InterpTokens, params:InterpTokens, type:InterpTokens, ?doc:InterpTokens) – מייצג הכרזת פונקציה, ששמה, סוג ההחזרה שלה והדוקומנטציה שלה מבוטאים בעזרת טוקנים שונים. שדה הפרמטרים חייב להיות טוקן מסוג PartArray.
  + ConditionCode(callers:Map<Array<InterpTokens>, InterpTokens>) – מייצג את הערך של תנאי/לולאה.
  + ConditionCall(name:InterpTokens, exp:InterpTokens, body:InterpTokens) – מייצג קריאה לתנאי או לולאה מסוימת עם תנאי הרצה exp ובלוק הקוד body
  + FunctionCode(requiredParams:OrderedMap<String, InterpTokens>, body:InterpTokens) – מייצג את הערך של פונקציה (פרמטרים מחוברים עם בלוק של קוד)
  + FunctionCall(name:InterpTokens, params:InterpTokens) – מייצג קריאה לפונקציה ששמה מבוטא באמצעות name עם הפרמטרים params.
  + FunctionReturn(value:InterpTokens, type:InterpTokens) – מייצג טענת יציאה של פונקציה. הרצת בלוק של קוד מופסקת בעת התקלות בטוקן זה.
  + Write(assignees:Array<InterpTokens>, value:InterpTokens) – מייצג כתיבה של ערך value לN אלמנטים המוכלים בתוך assignees.
  + TypeCast(value:InterpTokens, type:InterpTokens) – מייצג ניסיון יציקה של הערך value אל תוך סוג המבוטא באמצעות type.
  + Expression(parts:Array<InterpTokens>, type:InterpTokens) – מייצג רצף פעולות המקובצות בתוך סוגריים רגילים
  + Block(body:Array<InterpTokens>, type:InterpTokens) – מייצג רצף פקודות, המקובצות בתוך סוגריים מסולסלים.
  + PartArray(parts:Array<InterpTokens>) – דרך לקבוץ מספר אלמנטים אל תוך טוקן יחיד בלי להוסיף metadata לגביו.
  + PropertyAccess(name:InterpTokens, property:InterpTokens) – מייצג גישה לשדה המבוטא בעזרת property שנמצא על ההורה אשר מבוטא בעזרת name.
  + Number(num:Int) – מייצג מספר שלם 32 ביטים בעל סימן.
  + Decimal(num:Float) – מייצג מספר עשרוני 64 ביטים בעל סימן.
  + Characters(string:String) – מייצג מחרוזת.
  + Documentation(doc:String) – מייצג תגובה.
  + ClassPointer(pointer:MemoryPointer) – מייצג את הערך של סוג, בעזרת מצביע אליו.
  + Sign(sign:String) – מייצג את הערך של אופרטור
  + NullValue – ערך ה-null.
  + TrueValue – ערך המייצג אמת
  + FalseValue – ערך המייצג שקר
  + Identifier(word:String) – מקבץ אותיות ללא הקשר מסוים, בד"כ מיצג גישה לאלמנט כלשהו בזיכרון, או השתמשות במילת מפתח.
  + Object(props:Map<String, {documentation:String, value:InterpTokens}>, typeName:String) – מייצג את הערך של אובייקט דינמי מסוג typeName עם השדות props.
  + HaxeExtern(func:Void -> InterpTokens) – מספק דרך להפעיל קוד הכתוב ב-Haxe תוך כדי הפעלת קוד Little.
* מחלקה – Interpreter – מכילה פעולות המסוגלות "לגשר: בין הטוקנים של InterpTokens למה שהם מייצגים ממשית.
  + convert(pre:Rest<little.parser.Tokens.ParserTokens>):Array<InterpTokens> - ממיר טוקנים מסוג ParserTokens לכאלה מסוג InterpTokens, על מנת שקורא הקוד יוכל להפעיל את אותם טוקנים.
  + error(message:String, layer:Layer = INTERPRETER):InterpTokens – זורק שגיאה ומזהה אותה עם שכבה מסוימת, ומחזיר את אותו טוקן שגיאה. ההחזרה לכאורה מיותרת , שכן קורא הקוד מפסיק לעבוד בעת שגיאה, אך היא עדיין נמצאת שם בשביל מפתחים שמעוניינים לבטל את ה"קריסה", ולעבוד עם ערך השגיאה העצמם.
  + warn(message:String, layer:Layer = INTERPRETER):InterpTokens – מעלה שגיאה בצורה של אזהרה, כך שהיא עדיין מודפסת, אך לא עוצרת את התוכנה. מחזירה את טוקן השגיאה.
  + assert(token:InterpTokens, isType:EitherType<InterpTokensSimple, Array<InterpTokensSimple>>, ?errorMessage:String = null) – מוודא שהטוקן הנתון הוא מסוג הטוקנים שיוזכרו בהמשך הפונקציה. אם הוא לא מהסוג שלהם, נזרקת שגיאה ברמה של קוד ה-Little, ומוחזר NullValue. אחרת, הטוקן שהובא מוחזר ללא שינוי.
  + setLine(l:Int) – אומר לקורא הקוד שאנחנו כרגע בשורה l, ומשגר אירועי שינוי שורה ושינוי חלק בשורה.
  + setModule(m:String) - אומר לקורא הקוד שאנחנו כרגע במודולה m, ומשגר אירועי שינוי מודולה אם אכן מודולת ההרצה השתנתה.
  + splitLine() – אומר לקורא הקוד שהחלק שאנו קוראים כרגע בשורה נגמר (מבוטא באמצעות פסיק או סמי-נקודותיים). משגר אירוע פיצול שורה.
  + declareVariable(name:InterpTokens, type:InterpTokens, doc:InterpTokens) – כותב לזיכרון משתנה ששמו name, סוגו type וערכו NullValue. משגר אירועי יצירת שדה מסוג משתנה.
  + declareFunction(name:InterpTokens, params:InterpTokens, doc:InterpTokens) – כותב לזיכרון פונקציה ששמה name, וערכה קוד של פונקציה המקבל את הפרמטרים שparams מייצג, ולא עושה כלום איתם. קוד הפונקציה מקובל בעזרת פונקציית write. משגר אירועי יצירת שדה מסוג פונקציה.
  + condition(name:InterpTokens, pattern:InterpTokens, body:InterpTokens):InterpTokens – מריץ את התנאי/לולאה ששמה name, באמצעות תנאי ההרצה pattern, ומחליט כמה פעמים להריץ את בלוק הקוד body. מחזיר את הטוקן שהחזרה האחרונה נגמרה איתו. משגר אירועי קריאה לתנאי/לולאה.
  + write(assignees:Array<InterpTokens>, value:InterpTokens):InterpTokens – כותב את הערך value למשתנים ששמם נמצא בassignees:
    - למשתנים רגילים, כל ערך יעובד ויאוחסן
    - בשביל פונקציות, אם הערך הוא בלוק של קוד, הוא יערוך חלק מערך של הפונקציה, ובכך ישלים את declareFunction.

משגר אירועי כתיבה לערך אם השמות אליהם הוא כתב.

* + call(name:InterpTokens, params:InterpTokens):InterpTokens – קורא לפונקציה ששמה name עם הפרמטרים שבתוך הExpression או PartArray, params. מוסיף entry באופן זמני לLittle.runtime.callStack. משגר אירועי קריאה לפונקציה.
  + read(name:InterpTokens):InterpTokens – מחזיר את הערך של משתנה ששמו name בזיכרון.
  + typeCast(value:InterpTokens, type:InterpTokens):InterpTokens – לפי הערך והסוג שמקבלים, הפונקציה מחפשת פונקציית יציקה מתאימה. אם יש היא מפעילה אותה, אם אין נזרקת שגיאה שפונקציית יציקה לא קיימת. משגר אירועי יציקת ערך לסוג.
  + run(body:Array<InterpTokens>, propagateReturns = false):InterpTokens – מריץ בלוק של קוד בעזרת הפונקציות שהוזכרו לעיל. אם נתקל ב-FunctionReturn, וpropagateReturns הוא אמת, מפסיק הרצה מחזיר את מלוא הטוקן. אחרת, מעריך את טוקן ההחזרה ומחזיר את ההערכה. אם בכלל לא נתקלים בטוקן החזרה, הערך האחרון שעובד מוחזר.
  + evaluate(exp:InterpTokens, ?dontThrow:Bool = false):InterpTokens – מחלץ את הערך המעובד של טוקן יחיד. משתמש במגוון הפונקציות לעיל כשצריך. כשdontThrow מופעל, שגיאות שמוערכות ע"י הפונקציה לא נזרקות החוצה, אלא רק מוחזרות.
  + calculate(p:Array<InterpTokens>):InterpTokens – מעריך את הערך של קבוצה של טוקנים בעזרת חישוב שלהם והיחס ביניהם, המבוטא בעזרת אופרטורים ומזהים למיניהם. משתמש בפונקציה group על מנת לסדר אותם עם רצף פעולות נכון.
  + group(tokens:Array<InterpTokens>):Array<InterpTokens> - לוקח רצף של טוקנים אשר ביניהם אופרטורים, ומחזיר כמין עץ, המכיל PartArrays, אחד בתוך השני, של עד ל3 אלמנטים, המבטאים את הביטוי המתמטי.
* מחלקה – ByteCode – אחראית על הפיכת קוד בצורת טוקנים, לקוד בתים קומפקטי, שאפשר לאחסן בזיכרון יחסית בקלות
  + compile(...tokens:InterpTokens):String – לוקח קוד בפורמט של עץ syntax, ומחזיר אותו בפורמט קוד בתים, כString.
  + decompile(bytecode:String):Array<InterpTokens> - לוקח קוד-בתים, והופך אותו למערך טוקנים המייצג עץ syntax, שאפשר להריץ.
* מחלקה – StdOut – מייצגת את הפלט של קורא הקוד.
  + output:String – הפלט של ההרצה, כמחרוזת
  + stdoutTokens:Array<InterpTokens> - הטוקנים האינדיבידואלים שניסו להדפיס לoutput, ללא מודפיקציה מעבר לעיבוד.
  + reset() – מאפס את השדות שנאמרו להלן.
* מחלקה – Runtime – מכיל מידע על זמן הריצה, ומידע לאחר הריצה.
  + line(default, null):Int – השורה שאותה אנו מתחילים לקרוא
  + linePart(default, null):Int – החלק בשורה אותו אנו מתחילים לקרוא. שורה מפוצלת בעזרת פסיקים או סמי-נקודותיים.
  + currentToken(default, null):InterpTokens – הטוקן אותו אנו הולכים להריץ.
  + module(default, null):String – המודולה בה אנו מריצים קוד כרגע.
  + previousToken(default, null):InterpTokens – הטוקן שהרגע הורץ.
  + exitCode(default, null):Int – טענת היציאה של הקוד. יהיה שונה מ-0 אם התוכנה קרסה.
  + errorThrown(default, null):Bool – אומר האם נזרקה שגיאה או לא
  + errorToken(default, null):InterpTokens – טוקן השגיאה שנזרק.
  + onLineChanged:Array<Int -> Void> - אירוע המשוגר כאשר שורה מתחילה להיקרא
  + onModuleChanged:Array<String -> Void> - אירוע המשוגר כאשר מודולה משתנה. יכול לקרות כאשר מריצים פונקציות ממודולות אחרות.
  + onLineSplit:Array<Void -> Void> - אירוע המשוגר כאשר אנו מתחילים לקרוא חלק משורה. משוגר גם כשמחליפים שורה.
  + onTokenInterpreted:Array<InterpTokens -> Void> - אירוע המשוגר מיד לאחר שאנו מסיימים להריץ טוקן.
  + onErrorThrown:Array<(String, Int, String) -> Void> - אירוע המשוגר מיד לאחר זריקת שגיאה.
  + onWarningPrinted:Array<(String, Int, String) -> Void> - אירוע המשוגר מיד לאחר העלאת אזהרה.
  + onWriteValue:Array<Array<String> -> Void> - אירוע המשוגר מיד לאחר שנכתב ערך לאחד או יותר משתנים/פונקציות/שדות.
  + onFunctionCalled:Array<(String, Array<InterpTokens>) -> Void> - אירוע המשוגר מיד לפני הרצת פונקציה
  + onConditionCalled:Array<(String, Array<InterpTokens>, InterpTokens) -> Void> - אירוע המשוגר מיד לפני קריאה לתנאי/לולאה.
  + onFieldDeclared:Array<(String, FieldDeclarationType) -> Void> - אירוע המשוגר מיד לאחר שמוכרז משתנה או פונקציה.
  + onTypeCast:Array<(InterpTokens, String) -> Void> - אירוע המשוגר מיד לאחר ניסיון יציקת ערך לסוג שאינו שלו.
  + stdout:StdOut – הפלט הסטנדרטי.
  + callStack:Array<{module:String, line:Int, linePart:Int, token:InterpTokens}> - סטאק הקריאות, משומש כאשר נזרקת שגיאה. משתנה לפני ואחרי קריאה לפונקציה.
  + throwError(token:InterpTokens, ?layer:Layer = INTERPRETER):InterpTokens – זורק שגיאה משכבה מסוימת, ועוצר את ההרצה.
  + warn(token:InterpTokens, ?layer:Layer = INTERPRETER) – מדפיס שגיאה משכבה מסוימת, ולא עוצר את ההרצה.
  + print(item:String) – מדפיס מחרוזת כלשהי.
  + broadcast(item:String) – פונקציה שאפשר לערוך, שווה ערך פונקציונאלית לprint. נועד למפתחים.
* ספירה – FieldDeclarartionType – משומש ע"י אירוע ההכרזה.
  + VARIABLE – הכרזת משתנה. זמין באופן ישיר בפרויקט
  + FUNCTION – הכרזת פונקציה. זמין באופן ישיר בפרויקט.
  + CLASS – הכרזת סוג. לא זמין באופן ישיר בפרויקט.
  + CONDITION – הכרזת תנאי/לולאה. לא זמין בגרסה זו של הפרויקט.
  + OPERATOR – הכרזת אופרטור. לא זמין בגרסה זו של הפרויקט.

### חבילה – little.interpreter.memory

אבסטרקט – MemoryPointer – מייצג כתובת בזיכרון, פועל כמספר 32 ביטים לאחר קומפילציה.

* + rawLocation(get, set):Int – המספר שמתחת לMemoryPointer הזה.
  + toString() – ממיר את הכתובת למחרוזת
  + toArray():Array<Int> - ממיר את הכתובת למערך של ביטים, שערכם מ-128 ל127.
  + toBytes():Bytes – ממיר את הכתובת למערך ביטים אמיתי
  + toInt():Int – rawLocation רק כפונקציה.

מחלקה – Memory – נבנה כאבסטרקציה על שאר מבנה הזיכרון – מכיל פונקציות גישה, כתיבה ואחסון ערכים ערכים בצורה קלה עם דוקומנטציה ותגובות נרחבות.

* + storage:Storage – האחסון שמשתמש בו הזיכרון.
  + referrer:Referrer – הReferrer שמשתמש בו הזיכרון.
  + externs:ExternalInterfacing – interface האקסטרנים שמתשתמש בו הזיכרון.
  + constants:ConstantPool – בריכת הקבועים שמשתמש בו הזיכרון.
  + operator:Operators – עוד interface לאקסטרנים, הפעם מעוצב לאופרטורים.
  + memoryChunkSize:Int = 512 – כל פעם שמבוקשת כמות מסוימת של זיכרון, משתמשים בערך הזה כדי לדעת כמה.
  + maxMemorySize:Int = 1024 \* 1024 \* 2 – כמות הזיכרון המקסימלית שהזיכרון מסוגל לבקש.
  + currentMemorySize(get, never):Int – כמות הזיכרון בשימוש כרגע, בקפיצות של memoryChunkSize.
  + reset() – מאפס או יוצר מחדש את השדות storage, referrer, externs, constants.
  + store(token:InterpTokens):MemoryPointer – מאחסן ערך פשוט בזיכרון, ומחזיר מצביע אליו. לא מסוגל לעבד מזהים, רק ערכים
  + retrieve(token:InterpTokens):MemoryPointer – כמו store, רק גם מסוגל לעקוב אחר מזהים, ועוקב אחרי חוקי pass-by-value/reference.
  + read(...path:String):{objectValue:InterpTokens, objectTypeName:String, objectAddress:MemoryPointer} – משתמש באחסוני הזיכרון הזמינים כדי להחזיר את הערך, מיקום והסוג של שדה כלשהו הנמצא בסוף path.
  + readFrom(value:{objectValue:InterpTokens, objectAddress:MemoryPointer}, ...path:String) – הרחבה של read, המסוגלת להתחיל קריאה מערך סטטי ולא רק ממזהה. שימושי במקרים כמו 6.toString(), בהם הפונקציה read תנסה לגשת למשתנה ששמו 6 ותכשל.
  + write(path:Array<String>, ?value:InterpTokens, ?type:String, ?doc:String) – יוצר ערך חדש עם סוג ודוקומנטציה מסוימת לשדה הנמצא בסוף path. אם אחד מהפרמטרים הסופיים הוא Null, נותנים ערכי "לא ידוע" לשדה (סוג Unknown/Anything, ערך NullValue)
  + set(path:Array<String>, ?value:InterpTokens, ?type:String, ?doc:String) – עורך שדה קיים הנמצא בסוף path. אם אחד מהפרמטרים הסופיים null, לא עורכים את החלק של הפרמטר הזה בשדה. אם השדה לא קיים, נזרקת שגיאה ברמת קוד Little.
  + allocate(size:Int):MemoryPointer – מבקש שלמור על כמות מסוימת של ביטים, ומחזיר את הכתובת של ההתחלה שלהם.
  + free(pointer:MemoryPointer, size:Int) – מפנה כמות מסויימית של ביטים השוכנים בכתובת מסוימת.
  + getTypeInformation(name:String):TypeInfo – מחלץ מידע על סוגים, בים אם הם מאוחסנים בזיכרון אקסטרני או רגיל. המידע כולל שם, שדות שונים, גודל אובייקט מסוגם, וmetadata לגבי הסוג.
  + getTypeName(pointer:MemoryPointer):String – משתמש בstorage ו-externs על מנת לחלץ שם של סוג בעזרת כתובתו בלבד.

מחלקה - Storage – אחראית על הכנסת ערכים למערך הזיכרון, ווידוא שלא נכתב שום דבר מעליהם כשלא צפוי שזה יקרה

* + storage:ByteArray – מערך הבתים שמשתמשת בו המחלקה
  + parent:Memory – backreference לMemory.
  + reserved:ByteArray – מערך בתים המייצג את המקומות הפנויים והתפוסים.
  + requestMemory() – מבקש עוד memoryChunkSize ביטים מהמערכת.
  + storeByte(b:Int):MemoryPointer – מאחסן ביט, ומחזיר את הכתובת שלו
  + setByte(address:MemoryPointer, b:Int) – מכניס ביט בכתובת מסוימת.
  + readByte(address:MemoryPointer):Int – קורא ביט מכתובת מסוימת, ומחזיר את ערכו
  + freeByte(address:MemoryPointer) – מפנה ביט הנמצא בכתובת מסוימת
  + storeBytes(size:Int, ?b:ByteArray):MemoryPointer – מאחסן מערך ביטים, ומחזיר את הכתובת שלהם
  + setBytes(address:MemoryPointer, bytes:ByteArray) – מכניס מערך בתים בכתובת מסוימת.
  + readBytes(address:MemoryPointer, size:Int):ByteArray – קורא מערך בתים מכתובת מסוימת, ומחזיר אותו
  + freeBytes(address:MemoryPointer, size:Int) – מפנה מערך בתים הנמצא בכתובת מסוימת
  + storeArray(length:Int, elementSize:Int, ?defaultElement:ByteArray):MemoryPointer – מאחסן מערך, ומחזיר את הכתובת שלו. מערך מאוחסן כאורך מערך, גודל אלמנט, ומיד לאחר מכן תוכן המערך.
  + setArray(address:MemoryPointer, length:Int, elementSize:Int, ?defaultElement:ByteArray) – מכניס מערך בכתובת מסוימת.
  + readArray(address:MemoryPointer):Array<ByteArray> – קורא מערך מכתובת מסוימת, ומחזיר אותו
  + freeArray(address:MemoryPointer) – מפנה מערך הנמצא בכתובת מסוימת
  + storeInt16(b:Int):MemoryPointer – מאחסן מספר שלם 16 בתים בעל סימן, ומחזיר את הכתובת שלו
  + setInt16(address:MemoryPointer, b:Int) – מכניס את הערך של מספר שלם 16 בתים בעל סימן בכתובת מסוימת.
  + readInt16(address:MemoryPointer):Int – קורא מספר שלם 16 בתים בעל סימן מכתובת מסוימת, ומחזיר את ערכו
  + freeInt16(address:MemoryPointer) – מפנה מספר שלם 16 בתים בעל סימן הנמצא בכתובת מסוימת
  + storeUInt16(b:Int):MemoryPointer – מאחסן מספר שלם 16 בתים ללא סימן, ומחזיר את הכתובת שלו
  + setUInt16(address:MemoryPointer, b:Int) – מכניס את הערך של מספר שלם 16 בתים ללא סימן בכתובת מסוימת.
  + readUInt16(address:MemoryPointer) – קורא מספר שלם 16 בתים ללא סימן מכתובת מסוימת, ומחזיר את ערכו
  + freeUInt16(address:MemoryPointer) – מפנה מספר שלם 16 בתים ללא סימן הנמצא בכתובת מסוימת
  + storeInt32(b:Int):MemoryPointer – מאחסן מספר שלם 32 בתים בעל סימן, ומחזיר את הכתובת שלו
  + setInt32(address:MemoryPointer, b:Int) – מכניס את הערך של מספר שלם 32 בתים בעל סימן בכתובת מסוימת.
  + readInt32(address:MemoryPointer):Int – קורא מספר שלם 32 בתים בעל סימן מכתובת מסוימת, ומחזיר את ערכו
  + freeInt32(address:MemoryPointer) – מפנה מספר שלם 32 בתים בעל סימן הנמצא בכתובת מסוימת
  + storeUInt32(b:UInt):MemoryPointer – מאחסן מספר שלם 32 בתים ללא סימן, ומחזיר את הכתובת שלו
  + setUInt32(address:MemoryPointer, b:UInt) – מכניס את הערך של מספר שלם 32 בתים ללא סימן בכתובת מסוימת.
  + readUInt32(address:MemoryPointer):UInt – קורא מספר שלם 32 בתים ללא סימן מכתובת מסוימת, ומחזיר את ערכו
  + freeUInt32(address:MemoryPointer) – מפנה מספר שלם 32 בתים ללא סימן הנמצא בכתובת מסוימת
  + storeDouble(b:Float):MemoryPointer – מאחסן מספר עשרוני 64 בתים בעל סימן, ומחזיר את הכתובת שלו
  + setDouble(address:MemoryPointer, b:Float) – מכניס את הערך של מספר עשרוני 64 בתים בעל סימן בכתובת מסוימת.
  + readDouble(address:MemoryPointer):Float – קורא מספר עשרוני 64 בתים בעל סימן מכתובת מסוימת, ומחזיר את ערכו
  + freeDouble(address:MemoryPointer) – מפנה מספר עשרוני 64 בתים בעל סימן הנמצא בכתובת מסוימת
  + storePointer(p:MemoryPointer):MemoryPointer – מאחסן כתובת בזיכרון, ומחזיר את הכתובת שלה
  + setPointer(address:MemoryPointer, p:MemoryPointer) – מכניס את הערך של כתובת בזיכרון בכתובת מסוימת.
  + readPointer(address:MemoryPointer):MemoryPointer – קורא כתובת בזיכרון מכתובת מסוימת, ומחזיר את ערכה
  + freePointer(address:MemoryPointer) – מפנה כתובת בזיכרון הנמצאת בכתובת מסוימת
  + storeString(b:String):MemoryPointer - מאחסן מחרוזת, ומחזיר את הכתובת שלה. מאוחסן כאורך ומיד לאחריו תוכן המחרוזת.
  + setString(address:MemoryPointer, b:String) – מכניס את הערך של מחרוזת בכתובת מסוימת.
  + readString(address:MemoryPointer):String – קורא מחרוזת מכתובת מסוימת, ומחזיר את ערכוה
  + freeString(address:MemoryPointer) – מפנה מחרוזת הנמצאת בכתובת מסוימת
  + storeCodeBlock(caller:InterpTokens):MemoryPointer – מאחסן ערך של פונקציה, ומחזיר את הכתובת שלו. מאוחסן כקוד-בתים.
  + setCodeBlock(address:MemoryPointer, caller:InterpTokens) – מכניס את הערך של פונקציה בכתובת מסוימת.
  + readCodeBlock(address:MemoryPointer):InterpTokens – קורא פונקציה מכתובת מסוימת, ומחזיר את ערכה
  + freeCodeBlock(address:MemoryPointer) – מפנה פונקציה הנמצאת בכתובת מסוימת
  + storeCondition(caller:InterpTokens):MemoryPointer – מאחסן תנאי/לולאה בזיכרון, ומחזיר את הכתובת שלו. מאוחסן כקוד-בתים.
  + setCondition(address:MemoryPointer, caller:InterpTokens) – מכניס את הערך של תנאי/לולאה בכתובת מסוימת.
  + readCondition(address:MemoryPointer):InterpTokens – קורא תנאי/לולאה מכתובת מסוימת, ומחזיר את ערכה
  + freeCondition(address:MemoryPointer) – מפנה תנאי/לולאה הנמצאת בכתובת מסוימת
  + storeSign(sign:String) – מאחסן אופרטור, ומחזיר את הכתובת שלו
  + setSign(address:MemoryPointer, sign:String) – מכניס אופרטור בכתובת מסוימת.
  + readSign(address:MemoryPointer):InterpTokens – קורא אופרטור מכתובת מסוימת, ומחזיר את ערכו
  + freeSign(address:MemoryPointer) – מפנה אופרטור הנמצא בכתובת מסוימת
  + storeStatic(token:InterpTokens):MemoryPointer – מאחסן אלמנט בעל גודל סטטי/מחרוזת, ומחזיר את הכתובת שבה הערך אוחסן.
  + storeObject(object:InterpTokens):MemoryPointer – מאחסן אובייקט דינמי, ומחזיר את הכתובת שלו. אובייקט כזה מאוחסן כ8 ביטים של אורך ומיקום, ומפת Hash נוספת במקום אחר.
  + setObject(address:MemoryPointer, object:InterpTokens) – מכניס אובייקט דינמי בכתובת מסוימת.
  + readObject(pointer:MemoryPointer):InterpTokens – קורא אובייקט דינמי מכתובת מסוימת, ומחזיר את ערכו
  + freeObject(pointer:MemoryPointer) – מפנה אובייקט דינמי הנמצא בכתובת מסוימת
  + storeType(name:String, statics:Map<String, {value:InterpTokens, documentation:String, type:String}>, instances:Map<String, {documentation:String, type:String}>) – מאחסן סוג, ומחזיר את הכתובת שלו. סוג מאוחסן כמו 2 אובייקטים ברצף – שני מפות hash לשדות תלויי מקרה ושדות סטטיים, שאליהם שני מצביעים ושני אורכים.
  + setType(address:MemoryPointer, name:String, statics:Map<String, {value:InterpTokens, documentation:String, type:String}>, instances:Map<String, {documentation:String, type:String}>) – מכניס סוג בכתובת מסוימת.
  + readType(pointer:MemoryPointer):TypeInfo – קורא סוג מכתובת מסוימת, ומחזיר את ערכו
  + freeType(pointer:MemoryPointer) – מפנה סוג הנמצא בכתובת מסוימת
* מחלקה – Referrer – עוקבת ומצמידה משתנים לערכם וסוגם באמצעות מבנה שילובי של סטאק ומפת hash.
  + parent:Memory – backreference ל-Memory
  + bytes:ByteArray – מערך הבתים שבו המחלקה משתמשת.
  + currentScopeStart(get, null):Int – מספר המייצג את המקום שבו הפריים העכשווי מתחיל. לא ניתן לעריכה ישירות, יש לערוך את תחילת מערך הביטים על מנת לשנות.
  + currentScopeLength(get, null):Int – מספר המייצג את כמות המפתחות הנמצאות בפריים העכשווי.
  + pushScope() – מוסיף header המכיל את כמות האלמנטים בפריים הקודם, וכמות האלמנטי בפריים הזה (0) בתור שני מספרי 16 בתים. מעדכן את currentScopeStart.
  + popScope() – לא עורך שום מידע מחוץ לcurrentScopeStart – מחשב לפי הנתונים הזמינים את תחילת הפריים הלפני-אחרון, ועורך את currentScopeStart לערך הזה.
  + reference(key:String, address:MemoryPointer, type:String) – מוסיף את המפתח key ומצמיד אותו לכתובת וסוג מסוים בפריים הנוכחי.
  + dereference(key:String) – מוחק את המפתח key מהפריים הנוכחי.
  + get(key:String):{address:MemoryPointer, type:String} - מאחזר את הכתובת והסוג המוצמדים למפתח מסוים. אם המפתח לא נמצא בפריים העכשווי, צוללים לפריים עמוק יותר. אם המפתח לא נמצא, נזרקת שגיאה ברמת קוד הHaxe ולא Little (מפסיק הרצה של התוכנה לגמרי)
  + set(key:String, value:{?address:MemoryPointer, ?type:String}) – עורך את הכתובת או סוג של מפתח מסוים. אם המפתח לא נמצא בפריים העכשווי, צוללים לפריים עמוק יותר. אם המפתח לא נמצא, נזרקת שגיאה ברמת קוד הHaxe ולא Little (מפסיק הרצה של התוכנה לגמרי)
  + exists(key:String):Bool – על מנת למנוע את השגיאות שהוזכרו לעיל, אפשר להשתמש בפונקציה זו כדי לבדוק האם מוצמד ערך כלשהו למפתח מסוים בפריים העכשווי, או באחד עמוק יותר.
  + keyValueIterator():KeyValueIterator<String, {address:MemoryPointer, type:String}> - מחזיר איטרטור העובר על כל המפתחות וערכיהן, מתחילת הפריים העדכני לסופו, ואז לפריים הבא, עד שנגמרים הפריימים.
* מחלקה – HashTables – אחראי על יצירת, קריאת ועריכת מפות hash לאחסון אובייקטים בזיכרון
  + generateObjectHashTable(pairs:Array<{key:String, keyPointer:MemoryPointer, value:MemoryPointer, type:MemoryPointer, doc:MemoryPointer}>) – מקבל מערך של חמישיות המייצגות מפתחות וערכים במפת hash. לפי כמות המפתחות, יוצר מפה בגודל מסוים. מחזיר את המפה כמערך ביטים.
  + readObjectHashTable(bytes:ByteArray, ?storage:Storage):Array<{key:Null<String>, keyPointer:MemoryPointer, value:MemoryPointer, type:MemoryPointer, doc:MemoryPointer}> - מעבד מערך ביטים אל תוך מערך חמישיות המייצג את מפת ה-hash של האובייקט. כשמסופק Instance של Storage, משתמשים בו על מנת לקרוא את המפתחות המיוצגים במפה בעזרת keyPointer.
  + hashTableHasKey(hashTable:ByteArray, key:String, storage:Storage):Bool – בודק האם מפת hash מכילה מפתח מסוים. מכיוון שכל מפה מכילה את המפתח באמצעות מצביע, אנו צריכים גם את הStorage – שנותן את המסוגלות לקשר בין הכתובת למחרוזת עצמה
  + hashTableGetKey(hashTable:ByteArray, key:String, storage:Storage):{key:String, keyPointer:MemoryPointer, value:MemoryPointer, type:MemoryPointer, doc:MemoryPointer} – בשביל מפת hash מסוימת שהמצביעים למפתחותיה "מתייחסים" לStorage מסוים, מסוגל לאחזר מפתח מסוים, ע"י הוצאת hash שלו, וגישה למפה, או חיפוש לפי הצורך
  + objectAddKey(object:MemoryPointer, key:String, value:MemoryPointer, type:MemoryPointer, doc:MemoryPointer, storage:Storage) – מוסיף entry למפת hash מסוימת המאוחסנת בStorage מסוים, הקשורה לאובייקט מסוים. אם המפה מלאה ביותר מ70%, המפה מאוחסנת מחדש בגודל גדול יותר, והמפה הקודמת מפונה. גדול המפה החדשה יהיה פי 3 מהכמות שזקוקים אליה בשביל מפה מלאה (בשביל 10 מפתחות הלוקחים כל אחד 4 מצביעים (16 ביטים בפרויקט הזה), יבוקשו 480 ביטים)
  + objectSetKey(object:MemoryPointer, key:String, pair:{?value:MemoryPointer, ?type:MemoryPointer, ?doc:MemoryPointer}, storage:Storage) – עורך מפתח שכבר קיים במפת hash של אובייקט מסוים, ונותן לו ערך אחר, לפי הערכים של האובייקט pair, שכן ערך שבאובייקט pair שהוא null לא נערך. אם המפתח לא נמצא, נזרקת שגיאה ברמת קוד Haxe.
  + objectGetKey(object:MemoryPointer, key:String, storage:Storage):{key:String, keyPointer:MemoryPointer, value:MemoryPointer, type:MemoryPointer, doc:MemoryPointer} – פונקציית עזר המאחדת גישה למפת הhash של אובייקט, וקבלת מפתח באמצעות hashTableGetKey.
  + getHashTableOf(objectPointer:MemoryPointer, storage:Storage):ByteArray – פונקציית עזר המקצרת את אחזור מפת הhash של אובייקט לשורה אחת, במקום 3 שורות (לקרוא את אורך המפה ב4 ביטים ראשונים, מיקום המפה בזיכרון ב4 האחרים, וקריאת הביטים לפי האורך והמיקום.)
* מחלקה – ExternalInterfacing – מגשר בין קריאת פונקציות הכתובות ב-Haxe לערכים של Little, באמצעות "אחסון" אותם פונקציות כעצים.
  + parent:Memory – backreference ל-Memory
  + externToPointer:Map<String, MemoryPointer> - מפה המשמשת לקישור סוגים אקסטרניים למיקום בזיכרון. בד"כ משומש עם אחסון ביט יחיד: storage.storeByte()
  + pointerToExtern(get ,null):Map<MemoryPointer, String> - ההפך מהמפה לעיל. איטי יותר, כי צריך לייצר את המפה כל פעם שרוצים לגשת לזה.
  + instanceProperties:ExtTree = new ExtTree(0, null, null, 0) – עץ הפונקציות הקשורות למשתנים תלויי מקרה. (לדוגמה, “”.toLowerCase())
  + globalProperties:ExtTree = new ExtTree(0, null, null, 0) – עץ הפונקציות הקשורות ישירות לאובייקטים וסוגים. (לדוגמה, Characters.fromCharCode(72))
  + createPathFor(extType:ExtTree, ...path:String):ExtTree – יוצר את המסלול/עוקב אחריו במידת הצורך (תלוי אם המסלול קיים או לא) בעץ הנתון (instanceProperties או globalProperties), ומחזיר את האיבר שבסוף המסלול.
  + createAllPathsFor(...path:String) – יוצר במידת הצורך את המסלול בשני העצים, instanceProperties ו-globalProperties.
  + hasGlobal(...path:String):Bool – בודק האם קיים המסלול path בעץ globalProperties.
  + hasInstance(...path:String):Bool – בודק האם קיים המסלול path בעץ instanceProperties.
  + getGlobal(...path:String):{objectValue:InterpTokens, objectAddress:MemoryPointer} – על אף שמאחזר הערך שבכל איבר בעץ זקוק לשני פרמטרים, ערך אובייקט ומיקום בזיכרון, מכיוון שמדובר באובייקט סטטי, אין שימוש בשני הפרמטרים האלה – לכן, המאחזר נקרא עם null לערך האובייקט ו-1 למיקומו, והערך מוחזר.
* מחלקה – ExtTree – העץ עצמו, אחראי על המבנה של הערכים האקסטניים.
  + getter:(objectValue:InterpTokens, objectAddress:MemoryPointer) -> {objectValue:InterpTokens, objectAddress:MemoryPointer} – מאחזר הערכים – מקבל את ערך האובייקט ההורה ואת כתובת ההורה, ולפיהם מחזיר ערך כלשהו וכתובתו בזיכרון.
  + doc:MemoryPointer – הכתובת של הדוקומנטציה של שדה אקסטרני מסוים.
  + type:MemoryPointer – הכתובת של הסוג שמחזיר המאחזר של שדה אקסטרני מסוים.
  + properties:Map<String, ExtTree> - הילדים של העץ.
* מחלקה – ConstantPool – "בריכה" של ערכים קבועים מסוימים, שלא יכולים להיות מפונים פעמיים, ולא יכולים להשתנות. קיים על מנת לשמר זיכרון.
  + capacity(default, null):Int = 24 – כמות הביטים שהבריכ לקוחת מאחסון של Storage.
  + NULL:MemoryPointer = 0 – המצביע לערך null
  + FALSE:MemoryPointer = 1 – המצביע לערך השקר
  + TRUE:MemoryPointer = 2 – המצביע לערך האמת
  + ZERO:MemoryPointer = 3 – המצביע לערך 0. לוקח 8 ביטים, על מנת שיוכל לייצג מספרים מביט 1 ועד 8 ביטים (byte -> double)
  + INT:MemoryPointer = 11 – המצביע לסוג המספר השלם
  + FLOAT:MemoryPointer = 12 – המצביע לסוג המספר העשרוני
  + BOOL:MemoryPointer = 13 – המצביע לסוג הערך הבוליאני
  + DYNAMIC:MemoryPointer = 14 – המצביע לסוג ה"דינמי" – מייצג כל סוג אחר, חוץ מ-Unknown.
  + TYPE:MemoryPointer = 15 – המצביע לסוג של מחלקות
  + UNKNOWN:MemoryPointer = 16 – המצביע לסוג שאינו ידוע. קיים בשבי בלוקים של קוד וביטויים שסוגם אינו ידוע בזמן שלפני ההרצה עצמה. גם יכול להופיע כאשר משתנה מוכרז ללא סוג או ערך.
  + ERROR:MemoryPointer = 17 – המצביע לשגיאות.
  + EXTERN:MemoryPointer = 18 – מצביע ברירת החדל לערים אקסטרניים שלא ניתן לאחסן בזיכרון רגיל. קיים בשביל פונקציות אקסטרניות, שכן לא ניתן לאחסן טוקנים מסוג HaxeExtern בזיכרון, מהגבלה של הספרייה הסטנדרטית של Haxe.
  + EMPTY\_STRING:MemoryPointer = 19 – המצביע למחרוזת הריקה
  + get(token:InterpTokens):MemoryPointer – פונקציית עזר המחליפה "קיר" של switch-case, המחלצת את המצביע של ערך מסוים המובא כטוקן. אם הטוקן לא נמצא בבריכה, נזרקת שגיאה ברמת קוד ה-Haxe.
  + getFromPointer(pointer:MemoryPointer):InterpTokens – פעולת ההפך מ-get, גם זורקת שגיאה ברמת קוד ה-Haxe.
  + hasPointer(pointer:MemoryPointer):Bool – בודקת האם הכתובת הנתונה נמצאת בבריכת הקבועים.
  + hasType(typeName:String) – בודקת האם סוג מסוים נמצא בתוך ברכית הקבועים.
  + getType(typeName:String):MemoryPointer – מאחזר את כתובת הסוג typeName הנמצא בתוך בריכת הקבועים. אם הוא לא נמצא, נזרקת שגיאה ברמת קוד Haxe.
* מחלקה – Operators – הרחבה של ExternalInterfacing המתואמת לאופרטורים במקום למזהים קלאסיים.
  + priority:Map<Int, Array<{sign:String, side:OperatorType}>> = [] – מפה המקשרת בין אופרטור מסוים, למיקום שלו בסדר הפעולות כאשר הוא פועל על צד מסוים.
  + standard:Map<String, (lhs:InterpTokens, rhs:InterpTokens) -> InterpTokens> = new Map() – מפה המקשרת בין אופרטורים הפועלים על שני הצדדים, לcallback שאמור לממש את פעולת האופרטור.
  + rhsOnly:Map<String, (InterpTokens) -> InterpTokens> = new Map() – אותו דבר כמו standard, אך בשביל אופרטורים הפועלים רק עם אופרנד בצד ימין.
  + lhsOnly:Map<String, (InterpTokens) -> InterpTokens> = new Map() – אותו דבר כמו standard, אך בשביל אופרטורים הפועלים רק עם אופרנד בצד שמאל.
  + setPriority(op:String, type:OperatorType, opPriority:String) – עורך את מפת סדר הפעולות, ומוסיף אופרטור מסוים על צד מסוים לדרגה בסדר הפעולות לפי opPriority. opPriprity יכול להיות מגוון דברים: first, last, with, before, after, between או פשוט מספר.
  + getPriority(op:String, type:OperatorType):Int – מאחזר את המיקום של אופרטור מסוים הפועל על צד מסוים בסדר הפעולות.
  + iterateByPriority():Iterator<Array<{sign:String, side:OperatorType}>> - איטרטור העובר על המפה priority לפי דרגות.
  + call(lhs:InterpTokens, op:String) – מפעיל אופרטור כלשהו עם ארגומנט צד שמאל.
  + call(op:String, rhs:InterpTokens) – מפעיל אופרטור כלשהו עם ארגומנט צד ימין.
  + call(?lhs:InterpTokens = null, op:String, ?rhs:InterpTokens = null):InterpTokens – מפעיל אופרטור כלשהו עם שני הצדדים.

### חבילה – little.tools

מחלקה – Converison – מספקת פעולות להמרה חלקה בין ערכים בHaxe לטוקנים של Little, וכן להפך.

* + extractHaxeType(type:ValueType):String – לא קשור ספציפית לLittle, אך מאפשר קישור בין טוקן סוג **של Haxe** לשם של הסוג.
  + toLittleValue(val:Dynamic):InterpTokens – מנסה להמיר ערך Haxe כלשהו לטוקן Little. כאשר אי אפשר, מחזיר NullValue.
  + toHaxeValue(val:InterpTokens):Dynamic – מנסה להמיר טוקן לערך Haxe. כאשר אי אפשר, מחזיר null.
  + toLittleType(type:String) – ממיר סוגים בסיסיים בHaxe למראה שלהם בLittle (String => Characters)
* מחלקה – Extensions – מכיל פונקציות עזר המרחיבות על כאלה שכבר קיימות על סוגים כמו Array, InterpTokens, ועוד.
  + is(token:ParserTokens, ...tokens:ParserTokensSimple) – בודק האם השם כותרת של טוקן מסוים מסוג ParserTokens נמצא בתוך הפרמטרים הבאים.
  + is(token:InterpTokens, ...tokens:InterpTokensSimple) - בודק האם השם כותרת של טוקן מסוים מסוג InterpTokens נמצא בתוך הפרמטרים הבאים.
  + tokenize(code:String):Array<InterpTokens> - קיצור ל: Interpreter.convert(...Parser.parse(Lexer.lex(code)))
  + eval(code:String):InterpTokens – קיצור ל: Interpreter.run(Interpreter.convert(...Parser.parse(Lexer.lex(code))))
  + parameter(token:ParserTokens, index:Int):Dynamic – מחלץ את הפרמטר ה-index שבADT מסוג InterpTokens- token.
  + parameter(token:InterpTokens, index:Int):Dynamic – מחלץ את הפרמטר ה-index שבADT מסוג ParserTokens- token.
  + passedByValue(token:InterpTokens):Bool – בודק האם טוקן מסוים אמור להיום מעובר לפי ערך.
  + passedByReference(token:InterpTokens):Bool – בודק האם ערך מסוים אמור להיות מועבר לפי אזכור.
  + staticallyStorable(token:InterpTokens):Bool – בודק האם ניתן לקרוא ל storage.storeStatic על טוקן מסוים.
  + extractIdentifier(token:InterpTokens):String – מייצג טוקן מסוים כמחרוזת.
  + asStringPath(token:InterpTokens):Array<String> - מיצג טוקן מסוים שהוא מסלול מזהים כמערך של מזהים.
  + asJoinedStringPath(token:InterpTokens):String – לוקח את asStringPath ומצרף אותו באמצעות Little.keywords.PROPERTY\_ACCESS\_SIGN
  + type(token:InterpTokens):String – מחזיר את הסוג של טוקן מסוים, בהקשר של הריצה הנוכחית.
  + asObjectToken(o:Map<String, InterpTokens>, typeName:String):InterpTokens – לוקח מפה של מחרוזות לטוקנים, ויוצר ממנה אובייקט בעזרת שם סוג האובייקט.
  + asEmptyObject(a:Array<Dynamic>, typeName:String):InterpTokens – יוצר אובייקט ללא שדות מסוג מסוים בעזרת מערך ריק.
  + asTokenPath(string:String):InterpTokens – ההפך מasJoinedStringPath.
  + extractValue(address:MemoryPointer, type:String):InterpTokens – מנסה לקרוא ערך מהזיכרון של ההרצה הנוכחית בעזרת מיקום וסוג.
  + writeInPlace(address:MemoryPointer, value:InterpTokens) – כותב ערך מסוים למקום מסוים בזיכרון, ללא התייחסות להאם המקום פנוי או לא.
  + toIdentifierPath(propertyAccess:InterpTokens):Array<InterpTokens> - ממיר טוקן PropertyAccess לקבוצה של Identifiers. האלמנט הראשון לא חייב להיות מזהה.
  + containsAny<T>(array:Array<T>, func:T -> Bool):Bool – הרחבה למערך קלאסי, בודק האם הפונקציה הנתונה מחזירה אמת לאלמנט כלשהו במערך.
  + toArray<T>(iter:Iterator<T>):Array<T> - ממיר איטרטור (מבנה הספירה בטווח של Haxe) למערך של האלמנטים שהוא מייצג.
* ספירה – ParserTokensSimple – הכותרות של אלמנטים ב-[ParserTokens](#_חבילה_–_little.parser), בUPPER\_SNAKE case.
* ספירה – InterpTokensSimple – הכותרות של אלמנטים ב-[InterpTokens](#_חבילה_–_little.interpreter), בUPPER\_SNAKE case.
* ספירה אבסטרקטית – Layer – כאשר נזרקת שגיאה או אזהרה במצב debug, מוזכר המקום שזרק את אותה שגיאה. המקומות נלקחים מכאן
  + LEXER = "Lexer" – שלב הבניה הראשון
  + PARSER = "Parser" – שלב הבניה שני
  + PARSER\_MACRO = "Parser, Macro" – מאקרואים בשלב הבנייה השני.
  + INTERPRETER = "Interpreter" – שלב ההרצה, כללי.
  + INTERPRETER\_VALUE\_EVALUATOR = "Interpreter, Value Evaluator" – שלב ההרצה, הערכת ביטויים
  + INTERPRETER\_EXPRESSION\_EVALUATOR = "Interpreter, Expression Evaluator" – שלב ההרצה, חישוב ביטויים
  + INTERPRETER\_TOKEN\_VALUE\_STRINGIFIER = "Interpreter, Token Value Stringifier" – שלב ההרצה, הפיכת טוקן למחרוזת.
  + INTERPRETER\_TOKEN\_IDENTIFIER\_STRINGIFIER = "Interpreter, Token Identifier Stringifier" – שלב ההרצה, הפיכת מזהה למחרוזת.
  + MEMORY = "Memory" – זיכרון, כללי.
  + MEMORY\_REFERRER = "Memory, Referrer" – זיכרון, Referrer.
  + MEMORY\_STORAGE = "Memory, Storage" – זיכרון, Storage
  + MEMORY\_EXTERNAL\_INTERFACING = "Memory, External Interfacing" – זיכרון, אלמנטים אקסטרניים.
  + MEMORY\_SIZE\_EVALUATOR = "Memory, Size Evaluator" – זיכרון, חישוב גודל אלמנט.
  + getIndexOf(layer:String):Int – ממיר שכבה מסוימת למספרה לפי סדר ההכרזה בספירה האבסטרקטית. משומש כexitCode בשפה.
* מחלקה – Plugins – גישור שני, בין המפתח הרגיל לExternalInterfacing וחלק משאר הזיכרון. מאפשר הכנסה טבעית כמה שאפשר של אלמנטים מHaxe אל תוך הריצה של קוד Little.
  + registerType(typeName:String, fields:TypeFields) – מכניס סוג אקסטרני לזמן הריצה, באמצעות צורת כתיבה טבעית אך עדיין קרובה למקור ככל האפשר. ניתן להכריז על מפונקציות ומשתנים סטטיים ותלויי מקרה, וכל אחד מהם יכול להחזיר או רק ערך, או גם ערך וגם כתובת, תלוי ברצון המפתח ובמקרה. ניתן גם לאחסן אובייקטים כשדות סטטיים בדרך קלה.
  + registerVariable(variableName:String, variableType:String, ?documentation:String, ?staticValue:InterpTokens, ?valueGetter:Void -> InterpTokens) – מכריז על משתנה גלובלי הנמצא בשורש, עם סוג, דוקומנטציה, וערך מסוים. ניתן לתת ערך סטטי, אך גם ניתן לתת ערך שיכול להשתנות, בעזרת נתינת פונקציית אחזור לפונקציה הזו.
  + registerFunction(functionName:String, ?documentation:String, expectedParameters:EitherType<String, Array<InterpTokens>>, callback:Array<{objectValue:InterpTokens, objectTypeName:String, objectAddress:MemoryPointer}> -> InterpTokens, returnType:String) – מכריז על פונקציה גלובלית הנמצאת בשורש, עם דוקומנטציה, פרמטרים, וגוף במכה אחת. ניתן לספק פרמטרים גם כמחרוזת המכילה הכרזת פרמטרים בLittle, או פשוט מערך של טוקנים מסוג InterpTokens. הcallback מקבל את כל הפרמטרים שהובאו לפונקציה מהצד של Little גם כערך וגם ככתובת.
  + registerCondition(conditionName:String, ?documentation:String ,callback:(params:Array<InterpTokens>, body:Array<InterpTokens>) -> InterpTokens) – מכריז על לולאה/תנאי, עם דוקומנטציה מסוימת. המפתח יכול לקבל גישה לתנאי ההרצה של התנאי/לולאה ולגוף שלה, ולבחור כמה פעמים/איך הוא רוצה להריץ את הגוף (או, תכנית, אפילו את תנאי ההרצה, שום דבר לא מונע זאת)
  + registerInstanceVariable(propertyName:String, propertyType:String, onType:String, ?documentation:String, ?staticValue:InterpTokens, ?valueGetter:(objectValue:InterpTokens, objectAddress:MemoryPointer) -> InterpTokens) – דומה לregisterVariable, אך בהקשר של משתנה על סוג מסוים. הcallbakc מקבל שדרוג, ומקבל גם מידע על ההורה של אותו שדה באותה גישה.
  + registerInstanceFunction(propertyName:String, onType:String, ?documentation:String, expectedParameters:EitherType<String, Array<InterpTokens>>, callback:(objectValue:InterpTokens, objectAddress:MemoryPointer, params:Array<{objectValue:InterpTokens, objectTypeName:String, objectAddress:MemoryPointer}>) -> InterpTokens, returnType:String) – דומה לregisterFunction, אך בהקשר של פונקצייה על סוג ערך מסוים. כמו מקודם, ה callbackמקבל שדרוג קל על מנת שיכול להיות תלוי בהורה שלו.
  + registerOperator(symbol:String, info:OperatorInfo) – מכריז על אופרטור, הפועל על צדדים מסוימים, עם עדיפות מסוימת ותומך בסוגים מסוימים, או, בשילוב סוגים בסדר מסוים.
* הגדרה – OperatorInfo – הגדרות לאופרטור המוכרז:
  + ?lhsAllowedTypes:Array<String> - סוגי הערכים שאפשר להעביר לצד השמאלי של האופרטור.
  + ?rhsAllowedTypes:Array<String> - סוגי הערכים שאפשר להעביר לצד הימני של האופרטור
  + ?allowedTypeCombos:Array<{lhs:String, rhs:String}> - קומבינציות סוגים מיוחדות שיש בהן תמיכה, מעבר לסוגים המוסכמים.
  + ?callback:(InterpTokens, InterpTokens) -> InterpTokens – פונקציות אחזור הערך של הפעולה עם האופרטור, כאשר האופרטור מקבל שני צדדים. אם operatorType אינו LHS\_RHS, או, גם singleSidedCallback קיים, נזרקות שגיאות הסבר מתאימות.
  + ?singleSidedOperatorCallback:InterpTokens -> InterpTokens –פונקציות אחזור הערך של הפעולה עם האופרטור, כאשר האופרטור מקבל רק צד אחד. אם operatorType אינו LHS או RHS, או, גם callback קיים, נזרקות שגיאות הסבר מתאימות.
  + ?operatorType:OperatorType – סוג האופרטור – מחליט אם הוא מקבל רק צד שמאל (LHS), רק צד ימין (RHS), או צריך את שניהם (LHS\_RHS).
  + priority:String – הדרגה של האופרטור בסדר העדיפויות. יש לשדה זה אפשרויות שאמורות להקל על הכנסת דרגה:
    - אינדקס פשוט: מספר של רגה, ככל שיותר נמוך הדרגה יותר מוקדמת. -1 תמיד יהיה הכי גבוה.
    - first – האופרטור בעל הדרגה הנמוכה ביותר, יתייחסו אליו ראשון.
    - last – ההפך מfirst.
    - before <sign> - יצורף לדרגה אחת לפני האופרטור המוזכר. על מנת להבדיל בין צדדים, יש להשתמש ב\_: \_+ (RHS), +\_ (LHS), \_+\_ או רק + (LHS\_RHS).
    - after <sign> - ההפך מbefore, דרגה אחת אחרי
    - with <sign> - יצורף באותה דרגה כמו האופרטור המוזכר.
    - between <sign> <sign> - האופרטור יצורף בדיוק באמצע בין הדרגות של הסימנים הנתונים. יווצרו דרגות במקרה הצורך
* .הגדרה – TypeFields – שם אחר למפה מאוד ארוכה, שאמור לבטא את אפשרויות הרכבת השדות של registerType:

typedef TypeFields = Map<String, OneOfSeven<

    // Instance fields:

    (address:MemoryPointer, value:InterpTokens) -> InterpTokens, // variable

    (address:MemoryPointer, value:InterpTokens) -> {address:MemoryPointer, value:InterpTokens}, // variable, with pointer

    (address:MemoryPointer, value:InterpTokens, givenParams:Array<InterpTokens>) -> InterpTokens, // function

        // Static fields:

    () -> InterpTokens, // variable

    () -> {address:MemoryPointer, value:InterpTokens}, // variable

    (givenParams:Array<InterpTokens>) -> InterpTokens, // function

    TypeFields // nested object

>>;

* אבסטרקט – OneOfSeven – על מנת לספק השלמת קוד למפתחים, הסוג מתקמפל לסוג דינמי, אך לפי קומפילציה מסוגל לייצג ערך שהוא אחר מ7 סוגים:

abstract OneOfSeven<T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7>(Dynamic)

    from T1 from T2 from T3 from T4 from T5 from T6 from T7

    to T1 to T2 to T3 to T4 to T5 to T6 to T7 {}

הסיבה שיש רק 7 סוגים היא הגבלה של השפה – משום מה, שרת הקומפליצה (completion) מסרב להתייחס לאבסטרקטים כאלה של מעל ל8 סוגים בצורה צפויה. דיווחתי על הבאג למפתחי שרת הקומפליציה.

מחלקה – PrepareRun – אחראית על יצירת הספריה הסטנדרטית

* + prepared:Bool – האם הספריה אכן נוספה להרצה הנוכחית. נערך מבחוץ.
  + addTypes() – מוסיף סוגים מסוימים, ושדות לכל הסוגים שזקוקים להם
  + addFunctions() – מוסיף פונקציות גלובאליות, כמו הדפסה וזריקת שגיאה
  + addProps() – מוסיף שדות תלויי מקרה גלובליים, כמו .type ו.address
  + addSigns() – מוסיף את כל האופרטורים שהשפה תומכת בהם out-of-the-box
  + addConditions() – מוסיף את כל הלולאות והתנאים שהשפה תומכת בהם.
* מחלקה – PrettyPrinter – מספקת יכולות פירמוט והדפסת עץ syntax של קוד ומערכי טוקנים.
  + printParserAst(ast:Array<ParserTokens>, ?spacingBetweenNodes:Int = 6) – מחזיר מחרוזת של עץ הsyntax שמייצג מערך טוקני Parser בצורה יפה, עם ריווח מסוים בין כל קומה בעץ.
  + printInterpreterAst(ast:Array<InterpTokens>, ?spacingBetweenNodes:Int = 6) – מחזיר מחרוזת של עץ הsyntax שמייצג מערך טוקני Interpreter בצורה יפה, עם ריווח מסוים בין כל קומה בעץ.
  + stringifyParser(?code:Array<ParserTokens>, ?token:ParserTokens) – מחזיר את הקוד המובא כמערך טוקני Parser כמחרוזת קוד מפורמטת.
  + stringifyInterpreter(?code:Array<InterpTokens>, ?token:InterpTokens) - מחזיר את הקוד המובא כמערך טוקני Interpreter כמחרוזת קוד מפורמטת.
  + prettyPrintOperatorPriority(priority:Map<Int, Array<{sign:String, side:OperatorType}>>) – מחזיר מחרוזת המייצגת את מפת סדר פעולות של האופרטורים בצורה יפה.
* מחלקה - TextTools – מחלקה חיצונית שהעתקתי כי רציתי לבצע בה שינויים. מכילה מגוון פונקציות הרחבה למחרוזות. מכיוון שהמחלקה לא מהפרויקט הזה לא אפרט עליה.

### מחלקות נוספות

מחלקה – Little – המחלקה העיקרית של הפרויקט, שותנת גישה לכל הפונקציות "ההכרחיות" לשימוש בסיס. כל עוד מפתח לא מנסה להשתמש בשפה בצורה מתקדמת יותר, אין סיבה שישתמש בכלים שהמחלקה לא מציעה.

* + keywords:KeywordConfig – מילות המפתח שהשפה תשתמש בהם כאשר יורץ או יבנה קוד
  + runtime(default, null):Runtime – מכיל מידע על זמן הריצה, אירועים בריצה, ותוצאות אחרי הריצה, כמו טענת יציאה.
  + memory(default, null):Memory – הזיכרון שישתמש בו מריץ הקוד על מנת לאחסן ערכים.
  + plugin(default, null):Plugins – הוספת אלמנטים אקסטרניים, ממשתנים רגילים ועד סוגים ואופרטורים.
  + queue(default, null):Queue<String> - תור ההרצה, נעשה שימוש כאשר משתמשים בloadModule.
  + debug:Bool – מחליט האם הקוד מורץ במצב debug. במצב זה, כשמודפסים דברים נוספת השכבה ממנה ההדפסה נקראה.
  + version:String – הגרסה של בונה הקוד והמריץ. בפרויקט הזה, הוא יהיה 1.0.0-f, כשf מציין שהפרויקט מאפשר "רק" Functional Programming.
  + loadModule(code:String, name:String, debug:Bool = false, runRightBeforeMain:Bool = false) – טוען קוד ומריץ אותו לפני הקוד "הראשי". אם runRightBeforeMain מאופשר, אנו מתעלמים מפרמטר הdebug ומוסיפים את הקוד לתור. אם לא, debug מופעל באופן זמני בהתאם לערך הפרמטר, והקוד מורץ תחת שם המודולה הנתונה.
  + run(code:String, ?debug:Bool) – מריץ קוד, וגם מריץ לפניו כל קוד הנמצא בתור, במצב debug, לפי ערך הפרמטר, או אם הוא Null, לפי ערך Little.debug.
  + compile(code:String):Array<InterpTokens> - רק בונה את הקוד בלי להריץ אותו, ומחזיר את עץ הsyntax.
  + format(code:String):String – בונה וממיר מחדש את הקוד למחרוזת, ובכך מפרמט את הקוד.
  + reset() – מאפס את כל האלמנטים שצריך לאפס לפני ריצה חדשה וטריה (זיכרון, תור...)

מחלקה – KeywordConfig – כל מילות המפתח והסימנים שמתשמשת בהם השפה. קיימים בין 50 ל100, ולכן לא אכתוב הסבר על כולם, אלא על כאלה חשובים/לא בהכרח מובנים.

* + VARIABLE\_DECLARATION:String
  + FUNCTION\_DECLARATION:String
  + TYPE\_DECL\_OR\_CAST:String
  + FUNCTION\_RETURN:String
  + NULL\_VALUE:String
  + TRUE\_VALUE:String
  + FALSE\_VALUE:String
  + TYPE\_DYNAMIC:String
  + TYPE\_INT:String
  + TYPE\_FLOAT:String
  + TYPE\_BOOLEAN:String
  + TYPE\_STRING:String
  + TYPE\_OBJECT:String
  + TYPE\_MEMORY:String
  + TYPE\_ARRAY:String
  + TYPE\_FUNCTION:String
  + TYPE\_CONDITION:String
  + TYPE\_MODULE:String
  + TYPE\_SIGN:String
  + MAIN\_MODULE\_NAME:String – מודלת ברירת המחדל, ממנה מורץ הקוד של Little.run.
  + OBJECT\_TYPE\_PROPERTY\_NAME:String
  + OBJECT\_ADDRESS\_PROPERTY\_NAME:String
  + PRINT\_FUNCTION\_NAME:String
  + RAISE\_ERROR\_FUNCTION\_NAME:String
  + READ\_FUNCTION\_NAME:String
  + RUN\_CODE\_FUNCTION\_NAME:String
  + CONDITION\_PATTERN\_PARAMETER\_NAME:String – כאשר קוראים לתנאי/לולאה, תנאי ההרצה מאוחסן במשתנה בשם הזה.
  + CONDITION\_BODY\_PARAMETER\_NAME:String – כאשר קוראים לתנאי/לולאה, גוף הלולאה מאוחסן במשתנה בשם הזה.
  + CONDITION\_\_FOR\_LOOP:String
  + CONDITION\_\_WHILE\_LOOP:String
  + CONDITION\_\_IF:String
  + CONDITION\_\_ELSE:String
  + CONDITION\_\_WHENEVER:String
  + CONDITION\_\_AFTER:String
  + TYPE\_UNKNOWN:String
  + RECOGNIZED\_SIGNS:Array<String> - לא אמור להיערך, אופרטורים שנוספו מאוחסנים כאן על מנת שיוכלו להיקרא.
  + PROPERTY\_ACCESS\_SIGN:String – גישה לשדה על ערך מסוים.
  + EQUALS\_SIGN:String
  + NOT\_EQUALS\_SIGN:String
  + LARGER\_SIGN:String
  + SMALLER\_SIGN:String
  + LARGER\_EQUALS\_SIGN:String
  + SMALLER\_EQUALS\_SIGN:String
  + XOR\_SIGN:String
  + OR\_SIGN:String
  + AND\_SIGN:String
  + NOT\_SIGN:String
  + ADD\_SIGN:String
  + SUBTRACT\_SIGN:String
  + MULTIPLY\_SIGN:String
  + DIVIDE\_SIGN:String
  + MOD\_SIGN:String
  + POW\_SIGN:String
  + FACTORIAL\_SIGN:String
  + SQRT\_SIGN:String
  + NEGATE\_SIGN:String
  + POSITIVE\_SIGN:String
  + STDLIB\_\_FLOAT\_isWhole:String
  + STDLIB\_\_STRING\_length:String
  + STDLIB\_\_STRING\_toLowerCase:String
  + STDLIB\_\_STRING\_toUpperCase:String
  + STDLIB\_\_STRING\_trim:String
  + STDLIB\_\_STRING\_substring:String
  + STDLIB\_\_STRING\_charAt:String
  + STDLIB\_\_STRING\_split:String
  + STDLIB\_\_STRING\_replace:String
  + STDLIB\_\_STRING\_remove:String
  + STDLIB\_\_STRING\_contains:String
  + STDLIB\_\_STRING\_indexOf:String
  + STDLIB\_\_STRING\_lastIndexOf:String
  + STDLIB\_\_STRING\_startsWith:String
  + STDLIB\_\_STRING\_endsWith:String
  + STDLIB\_\_STRING\_fromCharCode:String
  + STDLIB\_\_ARRAY\_length:String
  + STDLIB\_\_ARRAY\_elementType:String
  + STDLIB\_\_ARRAY\_get:String
  + STDLIB\_\_ARRAY\_set:String
  + STDLIB\_\_MEMORY\_allocate:String
  + STDLIB\_\_MEMORY\_free:String
  + STDLIB\_\_MEMORY\_read:String
  + STDLIB\_\_MEMORY\_write:String
  + STDLIB\_\_MEMORY\_size:String
  + STDLIB\_\_MEMORY\_maxSize:String
  + FOR\_LOOP\_FROM:String
  + FOR\_LOOP\_TO:String
  + FOR\_LOOP\_JUMP:String
  + TYPE\_CAST\_FUNCTION\_PREFIX:String
  + INSTANTIATE\_FUNCTION\_NAME:String
  + - change(config:KeywordConfig)משנה את הקונפיגורציה הנוכחית להקונפיגורציה

## קוד "יפה" ותכנות אלגוריתמים

### קריאה לפונקציות אקסטרניות

כחלק מהפרויקט, מאופשרת קריאה לפונקציות אקסטרניות, באותה דרך ו"קשיחות" כמו פונקציה רגילה (כמות פרמטרים סטטית, סוגים קונקרטיים לכל פרמטר, סוג החזרה...)  
בזכות הטוקן HaxeExtern, שמאפשר לנו להריץ קוד Haxe תוך כדי זמן ריצה של קוד Little זה נהפך ליחסית קל, אבל הבעיות מתחילות בפרמטרים – בגלל שפרמטרים מובאים לפונקציה בתור "הדבקה" של ההכרזה שלהם לגוף הפונקציה, אי אפשר בקלות לאחזר את אותם ערכים. לכן, הייתי צריך לעשות קצת "ריקודים" בשביל להשיג את המידע הזה:

var token:InterpTokens = FunctionCode(paramMap, Block([

            FunctionReturn(HaxeExtern(() -> callback(paramMap.keys().toArray().map(key -> memory.read(key))), returnTypeToken)

        ], returnTypeToken));

(הסבר מקדים – callback היא הפונקציה האקסטרנית עצמה, paramMap מייצג את הפרמטרים שפונקציה מבקשת. FunctionCode זה ה"ערך" של פונקציה. Block זה פשוט בלוק של קוד. returnTypeToken הוא סוג הערך המוחזר ע"י הפונקציה)

קורה כאן משהו כזה – HaxeExtern מבקש פונקציה ללא פרמטרים ושמחזירה טוקן. callback מחזיר את הערך שאנחנו צריכים, אך צריך פרמטרים כמערך. אנו יודעים שכל הפרמטרים צריכים להיות מובאים, ולכן, אנו מדביקים את ערכי הפרמטרים כך:

לוקחים את השמות של הפרמטרים כIterator

ממירים למערך

לכל מפתח במערך, קוראים אותו מהזיכרון, ומחזירים את הערך, המצביע והסוג שלו.

### Shunting Yard – השראה

חישוב הביטויים של הפרויקט נעשה באמצעות אלגוריתם בהשראת Shunting Yard, לפחות בחלק החישובי שלו. האימפלמנטציה עצמה מאוד ארוכה (כ150) שורות, אבל רובה עדיין לוגית.

לפני שמתחילים, יש לדעת את ההבדל בין PartArray לExpression – על אף שהוא פשוט, הוא הכרחי להבנת האלגוריתם – Expression זה הצורה הטבעית של קיבוץ אלמנטים, בעוד שPartArray היא הגרסה המלאכותית, שהאלגוריתם מכניס.

הנה הפונקציות. נתחיל דווקא מהאחרונה, group:

public static function group(tokens:Array<InterpTokens>):Array<InterpTokens> {

    var post = tokens;

    var pre = [];

    for (operatorGroup in Little.memory.operators.iterateByPriority()) {

        pre = post.copy();

        post = [];

        // We'll group everything by only recognizing specific signs each "stage" -

        // The signs recognized first will be of the highest priority.

        // One drawback of this system is that its a little messier to detect chaining (e.g. 5!!, √√√64)

        var i = 0;

        while (i < pre.length) {

            var token = pre[i].is(IDENTIFIER, BLOCK) ? evaluate(pre[i]) : pre[i];

            switch token {

                case Sign(operatorGroup.filter(x -> x.sign == \_).length > 0 => true): {

                    // If theres an operator before this one, its RHS\_ONLY. If theres an operator after, its LHS\_ONLY

                    // If theres no operator, its LHS\_RHS

                    // First lets do a simple edge case - i = pre.length - 1 => LHS\_ONLY operator.

                    if (i == pre.length - 1) {

                        post.push(PartArray([post.pop(), token]));

                        break;

                    }

                    var lookbehind = post.length > 0 ? post[post.length - 1] /\* Post has only evaluated tokens \*/ : Sign("\_"); // Just an arbitrary "sign" to not have null here

                    var lookahead = pre[i + 1].is(IDENTIFIER, BLOCK) ? evaluate(pre[i + 1]) : pre[i + 1];

if (lookahead.is(SIGN) && operatorGroup.filter(x -> x.sign == lookahead.parameter(0)).length > 0) {

                        /\* This can be one of two cases:

                        - were working on a binary operator before a unary operator (1 or more)

                        - were working on a unary operator (1 or more) before a binary operator

                        We should naturally prioritize unary operators since they, resulting from their definition, always come first.

                        This makes the parsing very easy, since the first possible binary operator must be the binary one: (pretend +, - and ! are of the same priority)

                        5!! + ---5

                        both + and - cant be LHS\_ONLY, so grouping is:

                        (((5!)!) + (-(-(-5)))) \*/

                        if (operatorGroup.filter(x -> x.sign == token.parameter(0) && x.side == LHS\_ONLY).length > 0) {

                            post.push(PartArray([post.pop(), token]));

                        } else if (operatorGroup.filter(x -> x.sign == token.parameter(0) && x.side == LHS\_RHS).length > 0) {

                            var operand1 = post.pop();

                            var op = lookahead;

                            // We have to repeat the check in RHS\_ONLY, since RHS can also start with a sign

                            if (i + 2 >= pre.length) error("Expression ended with an operator, when an operand was expected.");

                            var lookahead2 = pre[i + 2].is(IDENTIFIER, BLOCK) ? evaluate(pre[i + 2]) : pre[i + 2];

                            if (!lookahead2.is(SIGN)) {

                                post.push(PartArray([operand1, token, PartArray([lookahead, lookahead2])]));

                                i += 2; // +2 because we consumed both lookahead and lookahead2 for the PartArray arg

                            } else {

                                var g = [];

                                while (lookahead2.is(SIGN) && operatorGroup.filter(x -> x.sign == lookahead2.parameter(0) && x.side == RHS\_ONLY).length > 0) {

                                    g.push(lookahead2);

                                    i++;

                                    if (i + 2 >= pre.length) error("Expression ended with an operator, when an operand was expected.");

                                    lookahead2 = pre[i + 2].is(IDENTIFIER, BLOCK) ? evaluate(pre[i + 2]) : pre[i + 2];

                                }

                                // Last token is an operand

                                g.push(lookahead2);

                                // And increment i since lookahead2 uses i + 1

                                i++;

                                var operand2 = g.length == 1 ? g[0] : PartArray(group(g));

                                post.push(PartArray([operand1, op, operand2]));

                            }

                        } else if (operatorGroup.filter(x -> x.sign == token.parameter(0) && x.side == RHS\_ONLY).length > 0) {

                            error("An operator that expects a right side can't be preceded by an operator that expects a left side.");

                        }

                    } else {

                        // Both sides are regular operands, so we just pop from `post` and take the lookahead

                        // And no, we should'nt worry about order of operations here. because of this "algorithm"'s format, all

                        // operators are of the same priority, and its the user's responsibility to use parentheses when needed.

                        if (lookahead.is(SIGN)) {

                            post.push(PartArray([post.pop(), token]));

                        } else {

                            post.push(PartArray([post.pop(), token, lookahead]));

                            i++;

                        }

                    }

                }

                case Expression(parts, type): post.push(Expression(group(parts), type));

                case \_: post.push(token);

            }

            i++;

        }

    }

    return post;

}

ואז נעבור לcalculate:

public static function calculate(p:Array<InterpTokens>):InterpTokens {

    while (p.length == 1 && p[0].parameter(0) is Array && !p[0].is(BLOCK)) p = p[0].parameter(0);

    var tokens = group(p);

    var castType:InterpTokens = null;

    if (tokens.length == 1) {

        if (tokens[0].is(PART\_ARRAY)) tokens = tokens[0].parameter(0);

        else if (tokens[0].is(EXPRESSION)) {

            tokens = tokens[0].parameter(0);

            castType = tokens[0].parameter(1);

        } else if (tokens[0].is(BLOCK)) {

            tokens = [run(tokens[0].parameter(0))];

            castType = tokens[0].parameter(1);

        }

    }

    var calculated:InterpTokens = null;

    var sign:String = "";

    tokens = tokens.filter(x -> x != null); // Safety clause, for strange edge cases such as 2 + ---5.

    for (token in tokens) {

        switch token {

            case PartArray(parts): {

                if (sign != "" && calculated == null) calculated = Little.memory.operators.call(sign, calculate(parts)); // RHS operator

                else if (calculated == null) calculated = calculate(parts);

                else if (sign == "") error('Two values cannot come one after the other ($calculated, $token). At least one of them should be an operator, or, put an operator in between.');

                else {

                    calculated = Little.memory.operators.call(calculated, sign, calculate(parts)); // standard operator

                }

            }

            case Sign(s): {

                sign = s;

                if (tokens.length == 1) return token;

                if (tokens[tokens.length - 1].equals(token)) calculated = Little.memory.operators.call(calculated, sign); //LHS operator

            }

            case Expression(parts, t): {

                var val = t != null ? typeCast(calculate(parts), t) : calculate(parts);

                if (sign != "" && calculated == null) calculated = Little.memory.operators.call(sign, val); // RHS operator

                else if (calculated == null) calculated = val;

                else if (sign == "") error('Two values cannot come one after the other ($calculated, $token). At least one of them should be an operator, or, put an operator in between.');

                else {

                    calculated = Little.memory.operators.call(calculated, sign, val); // standard operator

                }

            }

            case SetModule(module): setModule(module);

            case \_: {

                if (sign != "" && calculated == null) calculated = Little.memory.operators.call(sign, token);

                else if (sign == "" && calculated != null) throw 'Unexpected token: $token After calculating $calculated';

                else if (calculated == null) calculated = token;

                else if (sign == "") error('Two values cannot come one after the other ($calculated, $token). At least one of them should be an operator, or, put an operator in between.');

                else {

                    calculated = Little.memory.operators.call(calculated, sign, token);

                }

            }

        }

    }

    if (castType != null) return typeCast(calculated, castType);

    return calculated;

}

#### group()

הפונקציה מתחילה ישר ולעניין, מכייון שאין ערך בלבדוק למקרי קיצון, הם כולם יתנהגו נכון.  
אופרטורים בזמן הריצה מופרדים לקבוצות לפי סדר פעולות. את סדר הפעולות ואת הסימנים אנו באמת מושכים משם, בשורה:

        for (operatorGroup in Little.operators.iterateByPriority()) {

ואז מתחילים לעבור על הטוקנים של השכבה הנוכחית – כל פעם שאנו מסיימים קבוצה, הטוקנים האלו מעובדים קצת יותר:

        while (i < pre.length) {

מכיוון שאופרטור יכול להתבטא גם כמזהה או בלוק, יש לחשב אותם, ורק אז להתחיל:

            var token = pre[i].is(IDENTIFIER, BLOCK) ? evaluate(pre[i]) : pre[i];

ועכשיו, מתחיל ה"סיבוך" האמיתי – בסופו של יום יש רק 3 מקרים בהם צריך לבנות את הoutput בצורה שונה, אך אחד מהם מאוד, *מאוד* סבוך. אתחיל מהמקרים הסופיים, שהם התקלות במספר או ביטוי:

case Expression(parts, type): post.push(Expression(group(parts), type));

case \_: post.push(token);

המקרה האחר אולי נראה קצת סבוך, אבל הוא פשוט בודק האם קיבלנו אופרטור, והאם הסימן שהוא מכיל נמצא בשכבה הנוכחית:

case Sign(operatorGroup.filter(x -> x.sign == \_).length > 0 => true):

בדיקה זו מתחילה במקרה קצה פשוט, שהוא האם הסימן נמצא בסוף המערך, במקרה כזה הוא חייב להיות אופרטור של צד שמאל בלבד:

if (i == pre.length - 1) {

post.push(PartArray([post.pop(), token]));

break;

}

לאחר הבדיקה, אנו מושכים את הטוקן מלפנים ומאחורה, ובודקים שני מקרים:

**מקרה ראשון: מלפנינו יש אופרטור, והוא באותה דרגה בסדר הפעולות כמו האופרטור הזה.**

מייצג מספר מקרים:

* + **סאב-מקרה שני: אנחנו אופרטור חד צדדי של צד שמאל, ומלפנינו אופרטור דו צדדי.** במקרה זה, אנו פשוט לוקחים את הטוקן האחרון שעיבדנו, ושמים אותו איתנו כאשר הטוקן הוא אופרנד שמאלי.
  + **סאב-מקרה ראשון: אנחנו אופרטור דו-צדדי, ומלפנינו סימנים חד-צדדיים ברצף.** במקרה זה, אנו עוקבים אחר הסימנים ומוסיפים אותם למערך:

var g = [];

while (lookahead2.is(SIGN) && operatorGroup.filter(x -> x.sign == lookahead2.parameter(0) && x.side == RHS\_ONLY).length > 0) {

    g.push(lookahead2);

    i++;

    if (i + 2 >= pre.length) error("Expression ended with an operator, when an operand was expected.");

    lookahead2 = pre[i + 2].is(IDENTIFIER, BLOCK) ? evaluate(pre[i + 2]) : pre[i + 2];

}

// Last token is an operand

g.push(lookahead2);

// And increment i since lookahead2 uses i + 1

i++;

לאחר שבנינו את המערך והוספנו את האופרנד שאחרי הסימנים, הופכים אותו לאופרנד השמאלי, בעזרת קריאה רקורסיבית לgroup על המערך שבנינו (כשהאיבר האחרון במערך זה האופרנד שקבוצת האופרטורים החד צדדיים פועלים עליו):

var operand2 = g.length == 1 ? g[0] : PartArray(group(g));

עכשיו שיש לנו את הצד **הימני** של האופרטור שאנחנו עובדים עליו כרגע, וכבר מלפני זה יש לנו את האופרנד השמאלי:

var operand1 = post.pop();

לוקחים את הטוקן הקודם, ובונים PartArray על הכל:

post.push(PartArray([operand1, op, operand2]));

* **מקרה שני: מלפנינו טוקן של ערך, מאוחרינו אופרטור בעל עדיפות נמוכה או ערך**

גם מייצג שני מקרים:

* + **סאב-מקרה ראשון: יש מלפנינו אופרטור כלשהו.** במקרה כזה אנחנו אופרטור חד צדדי של צד שמאל:

if (lookahead.is(SIGN)) {

post.push(PartArray([post.pop(), token]));

}

* + **סאב-מקרה שני: יש מלפנינו ערך.** אם מלפנינו ומאחורינו יש טוקן שניתן להתייחס אליו כערך, אנחנו אופרטור דו-צדדי רגיל. אנו מוסיפים לi מכיוון שצרכנו את lookahead:

else {

    post.push(PartArray([post.pop(), token, lookahead]));

    i++;

}

#### calculate()

פונקציה יותר פשוטה - הפונקציה מתחילה בדאגה למקרים פשוטים/פירוק אלמנט אחד המכיל הרבה אחרים, למערך אלמנטים נורמאלי.

אנו מכריזים על 3 משתנים: אופרטור עדכני, ערך מחושב עד עכשיו, וסוג מחושב עד עכשיו.

לאחר מכן, אנו מתחילים לעבור על הטוקנים, אחד אחרי השני. כל טוקן יכול להיות אחד מ4 מקרים.

**מקרה ראשון: קביעת מודולה.** אנו מתעלמים, שכן הטוקן הזה מופיע בתחילת כל גוף אשר מסוגל לקפוץ שורות קוד, ואין לא ערך אמיתי.

**מקרה שני: אופרטור.** האופרטור העדכני נערך לאופרטור הזה.שני מקרי קצה:

* + **ראשון-** זה הטוקן היחיד שנמצא. הוא מוחזר.
  + **שני-** זה הטוקן האחרון במערך. מחשבים קריאה לערך שחושב עד עכשיו באופרנד שמאלי לאופרטור הזה.שמים אותה בתוך הערך והסוג המחושבים.
* **מקרה שלישי: PartArray או Expression.** מדובר בסוגריים שאו הפונקציה group שמה, או שהמשתמש שם. מכאן הפעולות הבאות מותנות:
  + **יש אופרטור עדכני והמחושב עד עכשיו לא קיים.** משווים את הערך הנוכחי לקריאה לאופרטור העדכני עם אופרנד צד ימין בלבד.
  + **אין ערך מחושב עד עכשיו.** משווים אותו לחישוב של הסוגריים הנוכחיים.
  + **יש ערך מחושב, אין אופרטור.** זורקים שגיאה ברמת Little, שכן שני אופרנדים ללא הקשר לא יכולים לבוא מיד אחרי השני.
  + **אחרת:** קוראים לאופרטור הנוכחי עם הערך המחושב עד עכשיו באופרנד שמאלי, והסוגריים הנוכחיים כאופרנד ימני. משווים את התוצאה לערך העדכני.

תלוי במקרה, יש אפשרות לנסות יציקה לסוג מסוים

* **מקרה רביעי: כמו מקרה שלישי, אך עם כל טוקן ערך אחר.** התנהגות זהה למקרה 3, אך ללא אפשרות ליצוק את הערך לסוג.

### עיצוב ה-Referrer

(לא אדביק כאן קוד ספציפי, מעבר לפונקציה אחת, רק כדי להראות את ה"קטע".)

הReferrer נעשה כמין שילוב של מבנה הסטאק והheap – הוא בנוי כמו הסטאק בדרך שמסגרות נוספות אליו, ודומה לheap בדרך שזיכרון מנוהל בו.

כל מסגרת בנויה כמערך, שכל תא בו בגודל 16 ביטים, ומכיל 4 פיסות מידע:

4 ביטים ראשונים – ערך הhash של שם המשתנה

4 ביטים שניים – מיקום שם המשתנה במחרוזת בזיכרון

4 ביטים שלישיים – מיקום הערך בזיכרון

4 ביטים אחרונים – מיקום סוג הערך בזיכרון.

בתחילת כל מסגרת יש header של 4 ביטים, המורכב גם הוא מחלקים:

שני ביטים ראשונים – כמות האלמנטים הנמצאים במסגרת הקודמת

שני ביטים אחרונים – כמות האלמנטים שנוספו עד עכשיו למסגרת הנוכחית

מעבר לheader שיש לכל מסגרת, המערך מתחיל ב4 ביטים של UInt32 שמצביעים על מיקום המסגרת הנוכחית בזיכרון הReferrer.

מבנה זה מאפשר לבצע פעולות חשובות במהירות ובקלות, כמו לשחק עם מסגרות במהירות ובקלות, ולעבור על אלמנטים בקצת קוד, ועדיין במהירות:

/\*\*

        Creates a new scope. Fields created after this will be added to the new scope, and won't affect fields from the previous scopes.

    \*\*/

    public function pushScope() {

        var currentScopeLength = bytes.getUInt16(bytes.getInt32(0) + 2);

        var currentScopeStart = bytes.getInt32(0) + 4; // each header is 4 bytes long.

        var header = new ByteArray(4);

        header.setUInt16(0, currentScopeLength);

        header.setUInt16(2, 0); // Currently, 0 elements ahead.

        var writePosition = currentScopeStart + currentScopeLength \* KEY\_SIZE;

        if (writePosition + 2 + 2 > bytes.length) {

            requestMemory();

        }

        bytes.setBytes(writePosition, header);

        bytes.setInt32(0, writePosition); // Update the start of the scope.

    }

    /\*\*

        Removes the last scope. TODO: Garbage collection.

    \*\*/

    public function popScope() {

        var currentScopePosition = bytes.getInt32(0);

        var previousScopeLength = bytes.getUInt16(currentScopePosition);

        var currentScopeLength = bytes.getUInt16(currentScopePosition + 2);

        // Update the start of the scope. Also, -4 is for the header, since we need to point to its start.

        bytes.setInt32(0, currentScopePosition - previousScopeLength \* KEY\_SIZE - 4);

    }

/\*\*

        Returns an iterator over all key/value pairs in all scopes, starting from the current scope, and going up the parent scopes.

    \*\*/

    public function keyValueIterator():KeyValueIterator<String, {address:MemoryPointer, type:String}> {

        var map = new Map<String, {address:MemoryPointer, type:String}>();

        var checkingScope = currentScopeStart;

        var elementCount = bytes.getUInt16(currentScopeStart + 2);

        var nextScope = currentScopeStart - bytes.getUInt16(currentScopeStart) \* KEY\_SIZE - 4;

        do {

            var i = checkingScope;

            while (i < (checkingScope + elementCount \* KEY\_SIZE)) {

                var stringName = parent.storage.readString(bytes.getInt32(i + 4));

                map.set(stringName, {

                    address: MemoryPointer.fromInt(bytes.getInt32(i + 4 + POINTER\_SIZE)),

                    type: parent.storage.readString(bytes.getInt32(i + 4 + POINTER\_SIZE \* 2))

                });

                i += KEY\_SIZE;

            }

            checkingScope = nextScope;

            elementCount = bytes.getUInt16(nextScope + 2);

            nextScope = nextScope - bytes.getUInt16(nextScope) \* KEY\_SIZE - 4;

        } while (checkingScope != 0);

        return map.keyValueIterator();

    }

בעוד שה"חסרונות" שבמבנה מהסוג שלו בקושי משתממשות

חסרון ראשון: גישה בסיבוכיות O(n) – לא רלוונטי מכיוון שרק לעיתים נדירות מאוד מסגרת אחת בReferrer תכיל הרבה מפתחות. במקרה כזה, אפשר אפילו להגיד שזו בעיה אצל המפתח...

חסרון שני: גודל – גם לא רלוונטי, המקרים היחידים בהם מפתח יכול למלא את הReferrer "מהר במיוחד" הם גם אותם מקרים שבהרצות רגילות הוא יקבל stack overflow, אז אולי הטרמינציה המוקדמת אפילו מועילה...

### יצירת סוגים אקסטרניים

גם כאן הקוד ארוך ואולי נראה סבוך, אך יחסית פשוט. אפצל את ההסבר והתכונות לשלבים למען הנוחות. להלן הקוד:

@:noCompletion static var \_\_noTypeCreation:Bool;

    /\*\*

        registers a class in little code, or extends the fields of an existing class. The class' fields are dictated by this function's `fields` attribute,

        which provides instance & static functions, variables, and nested objects.

        The allowed key-value types in `fields`'s key-value pairs:

        |Key Syntax                                           | Type                                                                                                                          | Application       | Description |

        |-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------|

        |`public <Type> <name>`                               | `(address:MemoryPointer, value:InterpTokens) -> InterpTokens`                                                                 | Instance Variable | A function that returns a value, that can be based on its parent. The returned value is stored in memory upon retrieval. |

        |`public <Type> <name>`                               | `(address:MemoryPointer, value:InterpTokens) -> {address:MemoryPointer, value:InterpTokens}`                                  | Instance Variable | A function that returns a value, that can be based on its parent. The returned value is not stored in memory, and we rely upon the given pointer to be correct. |

        |`public <Type> <name> (define <param> as <Type>)`    | `(address:MemoryPointer, value:InterpTokens, givenParams:Array<InterpTokens>) -> InterpTokens`                                | Instance Function | A function, that returns a value based on its parent & other given parameters, provided by a Little function call. The returned value is stored in memory upon retrieval. |

        |`static <Type> <name>`                               | `() -> InterpTokens`                                                                                                          | Static Variable   | A function that returns a static value. The returned value is stored in memory upon retrieval. |

        |`static <Type> <name>`                               | `() -> {address:MemoryPointer, value:InterpTokens}`                                                                           | Static Variable   | A function that returns a static value. The returned value is not stored in memory, and we rely upon the given pointer to be correct. |

        |`static <Type> <name> ()`                            | `(givenParams:Array<InterpTokens>) -> InterpTokens`                                                                           | Static Function   | A function that returns a value based on some given parameters, provided by a Little function call. The returned value is stored in memory upon retrieval. |

        |`static <Type> <name>`                               | `TypeFields`                                                                                                                  | Static Variable   | Another option for a static variable, but this time it's for a nested object. The object itself isn't allocated in Little's memory, but its decedents may be. instance objects are not available this way, since they are tied to an object, thus needing to be allocated many times. |

**\*\*Notice\*\*** - key syntax is very sensitive - must start with `public` or `static`, continue with a `little` type, then a name, and parameters if its a function. Each element separated by a single whitespace. Example:

            'public Number id'

            'static ${Conversion.toLittleType("String")} getProfile (define summed as ${Conversion.toLittleType("Bool")})'

**\*\*Notice 2\*\*** - for function parameters, syntax follows Little function parameter syntax - multiple parameter declarations, with optional type and optional default values, separated by a comma.

        @param typeName The name of the class. May be nested inside other "packages" using a `.` (for example. my\_pack.MyClass)

        @param fields A string map that has key-value pairs of certain types. Refer to the table above for more information.

    \*\*/

    public function registerType(typeName:String, fields:TypeFields) {

        var instances = memory.externs.createPathFor(memory.externs.instanceProperties, ...typeName.split("."));

        var statics = memory.externs.createPathFor(memory.externs.globalProperties, ...typeName.split("."));

        instances.type = statics.type = memory.getTypeInformation(Little.keywords.TYPE\_MODULE).pointer;

        if (\_\_noTypeCreation) \_\_noTypeCreation = false;

        else if (!memory.externs.externToPointer.exists(typeName) && !memory.constants.hasType(typeName)) {

            memory.externs.externToPointer[typeName] = memory.storage.storeByte(1);

            statics.getter = (\_, \_) -> {

                objectValue: ClassPointer(memory.externs.externToPointer[typeName]),

                objectAddress: memory.externs.externToPointer[typeName]

            }

        } else if (memory.constants.hasType(typeName) && !memory.externs.externToPointer.exists(typeName)) {

            memory.externs.externToPointer[typeName] = memory.constants.getType(typeName);

            statics.getter = (\_, \_) -> {

                objectValue: ClassPointer(memory.externs.externToPointer[typeName]),

                objectAddress: memory.externs.externToPointer[typeName]

            }

        }

        for (key => field in fields) {

            switch key.split(" ") {

                case (\_[0] == "public" && \_.length == 3) => true: {

                    var name = key.split(" ")[2];

                    var type = memory.getTypeInformation(key.split(" ")[1]).pointer;

                    instances.properties[name] = new ExtTree(type, (value, address) -> {

                        // We can't optimize for the two cases outside of the callback, since Haxe doesn't support

                        // type checking on function types.

                        try {

                            var result = untyped field(address, value);

                            if (result is InterpTokens) {

                                return {

                                    objectValue: result,

                                    objectAddress: memory.store(result)

                                };

                            }

                            return {

                                objectValue: untyped result.value,

                                objectAddress: untyped result.address

                            }

                        } catch (e) {

                            return {

                                objectValue: ErrorMessage('External Variable Error: ' + e.details()),

                                objectAddress: memory.constants.ERROR

                            }

                        }

                    });

                }

                case (\_[0] == "public") => true: {

                    var name = key.split(" ")[2];

                    var type = memory.getTypeInformation(key.split(" ")[1]);

                    var params = Interpreter.convert(...Parser.parse(Lexer.lex(key.replaceFirst('public function $name ', "").replaceFirst("(", "").replaceLast(")", ""))));

                    var paramMap = new OrderedMap<String, InterpTokens>();

                    for (entry in params) {

                        if (entry.is(SPLIT\_LINE, SET\_LINE)) continue;

                        switch entry {

                            case VariableDeclaration(name, null, \_): paramMap[name.extractIdentifier()] = TypeCast(NullValue, Identifier(Little.keywords.TYPE\_DYNAMIC));

                            case VariableDeclaration(name, type, \_): paramMap[name.extractIdentifier()] = TypeCast(NullValue, type);

                            case Write(assignees, value): {

                                switch assignees[0] {

                                    case VariableDeclaration(name, null, \_): paramMap[name.extractIdentifier()] = TypeCast(value, Identifier(Little.keywords.TYPE\_DYNAMIC));

                                    case VariableDeclaration(name, type, \_): paramMap[name.extractIdentifier()] = TypeCast(value, type);

                                    default:

                                }

                            }

                            default:

                        }

                    }

                    instances.properties[name] = new ExtTree(memory.getTypeInformation(Little.keywords.TYPE\_FUNCTION).pointer, (value, address) -> {

                        var returnType:InterpTokens = type.typeName.asTokenPath();

                        return {

                            objectValue: FunctionCode(paramMap, Block([

                                FunctionReturn(HaxeExtern(() -> {

                                    var result = (field : (MemoryPointer, InterpTokens, Array<InterpTokens>) -> InterpTokens)(address, value, paramMap.keys().toArray().map(key -> Interpreter.evaluate(memory.read(key).objectValue)));

                                    return result;

                                }), returnType)

                            ], returnType)),

                            objectAddress: memory.constants.EXTERN

                        }

                    });

                }

                case (\_[0] == "static" && \_.length == 3) => true: {

                    var name = key.split(" ")[2];

                    var type = memory.getTypeInformation(key.split(" ")[1]).pointer;

                    if (field is StringMap) {

                        \_\_noTypeCreation = true;

                        registerType(typeName + "." + name, field);

                        continue;

                    }

                    statics.properties[name] = new ExtTree(type, (\_, \_) -> {

                        // We can't optimize for the two cases outside of the callback, since Haxe doesn't support

                        // type checking on function types.

                            try {

                                var result = untyped field();

                                if (result is InterpTokens) {

                                    return {

                                        objectValue: result,

                                        objectAddress: memory.store(result)

                                    };

                                }

                                return {

                                    objectValue: untyped result.value,

                                    objectAddress: untyped result.address

                                }

                            } catch (e) {

                                return {

                                    objectValue: ErrorMessage('External Variable Error: ' + e.details()),

                                    objectAddress: memory.constants.ERROR

                                }

                            }

                    });

                }

                case (\_[0] == "static") => true: {

                    var name = key.split(" ")[2];

                    var type = memory.getTypeInformation(key.split(" ")[1]);

                    var params = Interpreter.convert(...Parser.parse(Lexer.lex(key.replaceFirst('static function $name ', "").replaceFirst("(", "").replaceLast(")", ""))));

                    var paramMap = new OrderedMap<String, InterpTokens>();

                    for (entry in params) {

                        if (entry.is(SPLIT\_LINE, SET\_LINE)) continue;

                        switch entry {

                            case VariableDeclaration(name, null, \_): paramMap[name.extractIdentifier()] = TypeCast(NullValue, Identifier(Little.keywords.TYPE\_DYNAMIC));

                            case VariableDeclaration(name, type, \_): paramMap[name.extractIdentifier()] = TypeCast(NullValue, type);

                            case Write(assignees, value): {

                                switch assignees[0] {

                                    case VariableDeclaration(name, null, \_): paramMap[name.extractIdentifier()] = TypeCast(value, Identifier(Little.keywords.TYPE\_DYNAMIC));

                                    case VariableDeclaration(name, type, \_): paramMap[name.extractIdentifier()] = TypeCast(value, type);

                                    default:

                                }

                            }

                            default:

                        }

                    }

                    statics.properties[name] = new ExtTree(memory.getTypeInformation(Little.keywords.TYPE\_FUNCTION).pointer, (\_, \_) -> {

                        var returnType:InterpTokens = type.typeName.asTokenPath();

                        return {

                            objectValue: FunctionCode(paramMap, Block([

                                FunctionReturn(HaxeExtern(() -> {

                                    var result = untyped field(paramMap.keys().toArray().map(key -> Interpreter.evaluate(memory.read(key).objectValue)));

                                    return result;

                                }), returnType)

                            ], returnType)),

                            objectAddress: memory.constants.EXTERN

                        }

                    });

                }

                case \_: throw 'Invalid key syntax for `$key`. Must start with either `public`/`static` continue with a type, and end with a variable name. (Example: `public Number myVar`). Each item must be separated by a single whitespace.';

            }

        }

    }

ועכשיו, ההסבר:

#### סוגי זוגות key-value

בגלל הגבלה של Haxe, המפה מספקת 7 אופציות לתכנות שדה במקום 8 (חסר מקרה ספציפי של פונקציה תלויית מקרה שמחזירה גם ערך וגם כתובת.). הפונקציה יודעת באיזה סוג משתמשים בעזרת הקלט מהמפתח. ישנם 4 סוגי קלט המוחלטים ע"י 2 זוגות של הקדמות:

public/static – אם המפתח מתחיל בpublic, השדה יהיה תלוי מקרה. static, השדה יהיה סטטי. כל דבר אחר יזרוק שגיאה.

מכיל/לא מכיל סוגריים – אם המפתח נגמר בסוגריים עם/בלי תוכן, מדובר בפונקציה. אחרת, מדובר במשתנה.

המידע הנוסף ההכרחי לא בהכרח מחליט על סוג השדה:

לאחר public או static, חייב לבוא סוג המשתנה, או סוג ההחזרה של הפונקציה

בתוך הסוגריים, חייבים להיות הכרזות פרמטרים הכתובים ספציפית בLittle. הם מחליטים על כמות וסוגם של הפרמטרים המובאים.

למפתח יש פורמט קבוע:

כל חלק במפתח מופרד ברווח אחד

סוגים ומילות מפתח הינם case sensitive

#### שדות תלויי מקרה

יוצרים עץ אקסטרנים ( ExtTree) חדש על עץ האקסטרנים של הסוג, שלקוח מinstanceProperties:

var instances = memory.externs.createPathFor(memory.externs.instanceProperties, ...typeName.split("."));

בהתאם לסוג השדה המבוקש, נותנים סוג שונה לעץ:

משתנים:

var type = memory.getTypeInformation(key.split(" ")[1]).pointer;

instances.properties[name] = new ExtTree(type, (value, address) -> {

פונקציות:

instances.properties[name] = new ExtTree(memory.getTypeInformation(Little.keywords.TYPE\_FUNCTION).pointer, (value, address) -> {

מכיוון שאנו נותנים למפתח להחזיר או ערך או זוג של מצביע וערך, צריך להתמודד עם זה בקריאה:

משתנים:

try {

    var result = untyped field(address, value);

    if (result is InterpTokens) {

        return {

            objectValue: result,

            objectAddress: memory.store(result)

        };

    }

    return {

        objectValue: untyped result.value,

        objectAddress: untyped result.address

    }

} catch (e) {

    return {

        objectValue: ErrorMessage('External Variable Error: ' + e.details()),

        objectAddress: memory.constants.ERROR

    }

}

כאן, קוראים לפונקציה שניתנה לנו עם המפתח. אם התוצאה היא ערך, משלימים את המצביע. אחרת, מחזירים את הזוג. במקרה שמשהו לא עובד, זורקים שגיאה ברמת Little.

פונקציות:

var returnType:InterpTokens = type.typeName.asTokenPath();

                        return {

                            objectValue: FunctionCode(paramMap, Block([

                                FunctionReturn(HaxeExtern(() -> {

                                    var result = (field : (MemoryPointer, InterpTokens, Array<InterpTokens>) -> InterpTokens)(address, value, paramMap.keys().toArray().map(key -> Interpreter.evaluate(memory.read(key).objectValue)));

                                    return result;

                                }), returnType)

                            ], returnType)),

                            objectAddress: memory.constants.EXTERN

                        }

מכיוון שאין שני אפשרויות לערך המוחזר, זה יותר פשוט. הערך שאנו מחזירים הוא פונקציה, המקבלת כמות פרמטרים מסוימת ומכילה טוקן החזרה יחיד הקורא לקוד חיצוני להחזיר לו ערך.

#### שדות סטטיים

המקרה כאן דומה מאוד, רק שהפעם אנו עובדים עם החלק הסטטי:

var statics = memory.externs.createPathFor(memory.externs.globalProperties, ...typeName.split("."));

ויש הבדל אחד – מכיוון שבמקרה של משתנים סטטיים אפשר גם להביא פשוט עוד מפה, אנו דואגים לזה, בדרך פשוטה במיוחד:

if (field is StringMap) {

                        \_\_noTypeCreation = true;

                        registerType(typeName + "." + name, field);

                        continue;

                    }

על אף שהשדה שנוצר הוא לא סוג, אפשר פשוט ליצור פרמטר חיצוני, שיבטל יצירת סוג. הפרמטר החיצוני בא לידי ביטוי בכל קריאה לפונרציה הזאת: (קטע קוד זה לקוח מתחילת הפונקציה)

if (\_\_noTypeCreation) \_\_noTypeCreation = false;

else if (!memory.externs.externToPointer.exists(typeName) && !memory.constants.hasType(typeName)) {

    memory.externs.externToPointer[typeName] = memory.storage.storeByte(1);

    statics.getter = (\_, \_) -> {

        objectValue: ClassPointer(memory.externs.externToPointer[typeName]),

        objectAddress: memory.externs.externToPointer[typeName]

    }

} else if (memory.constants.hasType(typeName) && !memory.externs.externToPointer.exists(typeName)) {

    memory.externs.externToPointer[typeName] = memory.constants.getType(typeName);

    statics.getter = (\_, \_) -> {

        objectValue: ClassPointer(memory.externs.externToPointer[typeName]),

        objectAddress: memory.externs.externToPointer[typeName]

    }

}

פשוט מאוד – לפני שמכריזים על אותו עץ כסוג, אנחנו מכניסים תנאי קטן, שאם הוא אמת, מונע יצירת סוג, וגורם לכל מקום אחר בקוד להתייחס לסוג שאנו יוצרים פה, כמו לאובייקט רגיל...

## בדיקות ותוצאות

יפה והכל שיש לנו סוויטת בדיקות רחבה, אבל גם צריך שהיא תעבוד...  
להבא, אפרט על כל הבדיקות, מהראשונה עד לאחרונה, ואפילו קצת על בדיקות שמעבר לסוויטה...

### בדיקה ביחידות (Unit Testing)

בדיקה מס' 1: Basic Math

* + מטרה: לבדוק שחישוב הביטויים המתמטיים של Little עובד, ויודע להמיר לסוג תוצאה אחר בעת הצורך.
  + בפועל: מדפיסים ביטוי מתמטי ערוך המערב סוגריים ואת האופרטורים +, -, \*, /, ^, !.
  + תוצאה: הצלחה
  + בעיות שהתגלו: מעולם לא היו בעיות רציניות מעבר לטעויות לא משמעותיות באלגוריתם החישוב.

בדיקה מס' 2: Variable declaration

* + מטרה: לבדוק שהכרזת משתנים רגילים עובדת, ולבדוק שניתן לאחזר את הערך שלהם במקרה הצורך
  + בפועל: מכריזים על 3 משתנים, אחד עם סוג וערך, אחד רק עם סוג, ואחד בלי סוג ובלי ערך. מדפיסים את ערך המשתנה הראשון, ואת סוגם של כל המשתנים, אחד אחרי השני.
  + תוצאה: הצלחה
  + בעיות שהתגלו: כשה-Referrer היה בפיתוח, קרו שגיאות בהן הReferrer לא שמר/קרא את שמות המשתנים נכון, אז היינו יכולים להכריז על משתנה, ו"לאבד" אותו מיד אחרי.

בדיקה מס' 3: Function declaration

* + מטרה: לבדוק שהכרזת פעולות רגילות עובדת,ושניתן לקרוא להם עם פרמטרים מסוימים עם סוגים קונקרטיים קבועים ע"י המתכנת.
  + בפועל: מוכרזות 3 פונקציות המדפיסות ערכים – אחת ללא פרמטרים, אחת עם פרמטר דינמי אחד, ואחת עם פרמטר מסוג קונקרטי. קוראים לשלושת הפונקציות.
  + תוצאה: הצלחה
  + בעיות שהתגלו: אותו סוג שגיאה של הכרזת משתנים – כשה-Referrer היה בפיתוח, קרו שגיאות שמירה וקריאה.

בדיקה מס' 4: Property access

* + מטרה: לבדוק האם גישה לשדה הנמצא בתוך אובייקט דינמי יכולה לערוך ולאחזר את אותו הערך של אותו שדה
  + בפועל: מכריזים על אובייקט דינמי חדש, ובתוכו שמים שני שדות, שאחד מהם גם אובייקט חדש. גם על האובייקט השני שמים שדה. מדפיסים את כל השדות שאינם אובייקטים.
  + תוצאה: הצלחה
  + בעיות שהתגלו: לא היו בעיות, אלא מודיפיקציות:
    - פעם, קריאות פונקציה היו יכולות להחשב כשדה שניגשים אליו (PropertyAccess(f, FunctionCall(name))), דבר שהיה חסר הגיון, ולכן שונה. עכשיו זה יסרק כ: FunctionCall(PropertAccess(f, name)).
    - לפני כן, הפונקציה שהייתה מייצרת PropertyAccessים הייתה הולכת מהסוף להתחלה, ולכן, כאשר הייתה מייצרת טוקנים כאלה שאחד בתוך השני, היה מאוד קשה לקרוא אותם: PropertyAccess(a, PropertyAccess(b, c)). כיוון הסריקה שונה, ועכשיו טוקנים כאלה נכנסים אחד בתוך השני כך: PropertyAccess(ProperyAccess(a, b), c).

בדיקה מס' 5: Loops

* + מטרה: לבדוק האם לולאות for וwhile עובדות כשורה.
  + בפועל: יוצרים משתנה, ןמריצים איתו לולאת while שמדפיסה אותו עד שמגיע ל-5. מריצים לאחר מכן לולאת for המדפיסה את הערכים מ0 עד 10 בקפיצות של 3.
  + תוצאה: הצלחה
  + בעיות שהתגלו: לא היו בעיות ספציפיות.

בדיקה מס' 6: Events and conditionals

* + לבדוק האם התנאי if ו"אירועי התנאי" after וwhenever עובדים כשורה.
  + בפועל: יוצרים משתנה, ומיד אחריו בודקים תנאי שחייב להיות שגוי. אחריו, מוספים את שני אירועי התנאי, ומשנים את ערך המשתנה. מצפים שהם יורצו במקרים מסוימים ובסדר מסוים.
  + תוצאה: הצלחה
  + בעיות שהתגלו: לא היו בעיות ספציפיות.

בדיקה מס' 7: Code blocks

* + מטרה: לוודא שניתן לייצר ערכים בעזרת בלוק של קוד המאחזר ערך, ולא רק ערך "inline"
  + מכריזים על משתנה, שערכו הוא בלוק של קוד שאמור להחזיר את המספר 180. את הערך של המשתנה מדפיסים.
  + תוצאה: הצלחה
  + בעיות שהתגלו: לא היו בעיות ספציפיות.

בדיקה מס' 8: Self assignment

* + מטרה: לוודא שניתן לשנות משתנה בעזרת הערך של עצמו. משמש לווידוא שימור קונטקסט במקרי שינוי עצמי.
  + יוצרים משתנה שערכו 1.2, ומשווים אותו לעצמו + 2 \* עצמו בסוגריים, לחלק לעצמו. מדפיסים את הערך הסופי, צריך להיות 3, מסוג מספר עשרוני.
  + תוצאה: הצלחה
  + בעיות שהתגלו: לא היו בעיות ספציפיות.

בדיקה מס' 9: If-Else

* + מטרה: לבדוק ששרשראות if-else עובדות כשורה.
  + בפועל: מתחילים עם תנאי הנפתר לfalse, ועליו לא להיות מורץ. אחריו יש else-if שגם חייב לא להיות מורץ. אחריו יש else ריק, ומכיוון שלא הורץ כלום עד עכשיו, חייב להיות מורץ.
  + תוצאה: הצלחה
  + בעיות שהתגלו: לא היו בעיות ספציפיות.

בדיקה מס' 10: Nested code blocks

* + מטרה: לבדוק שבלוקים של קוד הפועלים בתוך בלוקים אחרים יכולים לעשות הצללה על משתנים עם אותו השם, בבלוק חיצוני יותר (הכוונה – לשנות את הערך של משתנה באופן זמני רק לבלוק הנוכחי, בעזרת הכרזה על משתנה עם אותו שם כמו משתנה בבלוק חיצוני)
  + בפועל: מכריזים על משתנה I שערכו 3. מתחילם 3 בלוקים, אחד בתוך השני. בבלוק הכי פנימי I מוכרז שוב, עם הערך 5, ומודפס מיד לאחר מכן. אחרי הבלוקים, מודפס שוב ערכו של I, שצריך להיות הI ממקודם, שערכו 3.
  + תוצאה: הצלחה
  + בעיות שהתגלו: היתה פעם שגיאת off-by-one שהיתה קורית כשהיית מנסה ליצור מסגרת חדשה ב-Referrer כאשר לא היו משתנים במסגרת הנוכחית. בגלל גישה שגויה למערך הבתים, הheader החדשהיה יכול להיות ממוקם על מקום שכבר קים בו מידע, והיה יכול להתחשב בחלק מהמידע שם כמידע על הheader. זה היה יכול לגרום לכך שהזיכרון היה חושב שלמסגרת שלפני האחת הזאת יש כמות אלמנטים הזויה, וכך הייתה מדלגת אחורה לבתים "שליליים" וקורסת מגישה Out Of Bounds.

בדיקה מס' 11: Inline Blocks

* + מטרה: הרחבה של בדיקה 7, לוודא שניתן גם לאחזר מזהים בעזרת בלוק של קוד, ולא רק ערכים.
  + בפועל: מוכרז משתנה a שערכו בלוק של קוד, שבו מוחזר משתנה אחר שנוצר ומוכפל ב-10. אחר כך, מודפס עוד בלוק של קוד, שבו יש הוספה עצמית של 3 לערך של a, ואחרי ההוספה הוא מאוחזר.
  + תוצאה: הצלחה
  + בעיות שהתגלו: לא היו בעיות ספציפיות

בדיקה מס' 12: Constant pool

* + מטרה: לבדוק שבריכת הקבועים עובדת כשורה ויכולה לאחזר ערכים מתי שצריך במקום לפנות עוד מקום.
  + בפועל: מכריזים על 4 משתנים: שני nullים, 0, ו-0.0. מספיסים האם שני המשתנים הראשונים משתפים כתובת, והאם השניים האחרונים גם משתפים כתובת. שני הבדיקות אמורות לצאת אמת.
  + תוצאה: הצלחה
  + בעיות שהתגלו: המבנה פשוט, לא היו בעיות ספציפיות.

בדיקה מס' 13: Type Name Property

* + מטרה: לבדוק שהשדה הגלובלי type עובד כשורה, ואכן מדווח את הסוג הנכון לכל סוג ערך.
  + בפועל: מודפסים 6 סוגים, באותה מחרוזת, ללא רווח: הסוג של 5, 5.5, true, nothing (null), האופרטור + ,והסוג Number. צריך להדפיס: " NumberDecimalBooleanAnythingSignType"
  + תוצאה: הצלחה
  + בעיות שהתגלו: לא היו בעיות ספציפיות.

בדיקה מס' 14: Reference vs. Value

* + מטרה: לבדוק האם כשמשחקים עם ערכים שאמורים להיות מועברים כערך או כאזכור, האם מה שמועבר זה המיקום בזיכרון (לאלמנטים מאוזכרים) או הערך המועתק (לאלמנטים המועברים כערך).
  + בפועל: יוצרים משתנה a שערכו אובייקט חדש. יוצרים משתנה חדש b ומשווים אותו ל-a. מדפיסים האם הכתובות שלהם שוות (צריך לצאת אמת). יוצרים משתנה c ומשווים אותו ל502. יוצרים עוד משתנה, d, ומשווים אותו ל-c. מדפיסים האם הכתובות שלהם שוות (צריך לצאת שקר)
  + תוצאה: הצלחה
  + בעיות שהתגלו: כשהוספתי את הבדיקה הזאת, שכחתי לגמרי מזה שצריך להתקין מערכת שתבדיל בין סוגי הערכים. בעקבות הבדיקה, שונתה קצת צורת הגישה לזיכרון, וגם עכשיו יכולה לתמוך בהחזרת מזהים במקום ערכים, והמרתם לערכים בעת הצורך (לדוגמה, אם יש משתנה x שערכו 5, עכשיו אפשר להחזיר את המזהה x, ולא את המספר 5).

### בדיקות ידניות

**בעבוע אחזורים מתנאים ולולאות**: כשתכנתתי מחדש את הדרך שתנאים מאוחסנים בזיכרון, שמתי לב לoversight יחסית משמעותי: מכיוון שאני מריץ את גוף התנאי/הלולאה באמצעות פונקציית ההרצה הרגילה, אם תמצא בה המילה return בשום מקום, במקום שהיא תחזיר ערך מהפונקציה שממנה היא נקראת, היא פשוט תצא מהלולאה – כאילו היא מחזירה את הערך שמייצג בלוק הקוד של הלולאה.   
  
פתרתי את הבעיה בעזרת הוספת פרמטר לפונקציית ההרצה – propagateReturns – כאשר הפרמטר הוא true ואנחנו נתקלים בטוקן מסוג FunctionReturn, במקום להחזיר את ערכו של האחזור, הוא מחזיר ממש את טוקן האחזרה עצמו. ההחזרה מפסיקה את הלולאה, והלולאה נפתרת לטוקן FunctionReturn, אותו פונקציית ההרצה הרגילה (ללא propagateReturns) רואה, מפסיקה את הרצתה, ומחזירה את הערך המתאים.

**קריאת שדות מערכים "Inline"**: כשסיימתי עם הבסיס של מודולת הזיכרון בפרויקט, רציתי לבדוק כמה טוב היא עובדת עם גישה לשדות רגילים, שדות בתוך שדות, וכו'. אחת הבדיקות שביצעתי היא גישה לשדות גלובליים על ערכים שלא שמורים בזיכרון עדיין (לדוגמה: 5.type, 13.address), וגיליתי משהו יחסית חמור – כאשר אנו מנסים לקרוא מהזיכרון בעזרת פונקציית הקריאה הראשית, Memory.read, הפונקציה תמיד מנסה לעקוב אחרי כל מזהה שמובא לה כאילו הוא שם משתנה בפני עצמו, ולכן הפונקציה נכשלת במקרים שהמזהה הראשון הוא לא שם משתנה, אלא פשוט ערך.  
  
לאחר שהבנתי לגמרי את הבעיה, הפתרון היה יחסית פשוט – הכנתי אלטרנטיבה של הפונקציה, ששמה readFrom – הפונקציה הזאת, במקום לתחיל במשתנה, מתחילה במידע על הערך – ערכו, מיקומו בזיכרון, וסוגו. משם, הפונקציה משיגה מידע על שדות הערך, וממשיכה כמו הפונקציה read.

**השוואת משתנים לפונקציות חיצוניות**: כשבדקתי את הפרויקט לאחר כמה תוספות ושינויי, גיליתי עוד oversight משמעותי: מכיוון שהכתובת של פונקציות חיצוניות מעולם לא זמינה, הכתובת של כל פונקציה חיצונית היא כתובת הערך החיצוני הגלובלי – Memory.constants.EXTERN. לכן יוצא, שכשמשווים משתנה רגיל לפונקציה חיצונית, האינטרפרטר חושב שערכו זה קוד של פונקציה השוכן בכתובת של EXTERN. זה רע מאוד, מכיוון שבכתובת הזאת בכלל לא מאוחסנת פונקציה – אחריה עדיין נמצא חלק מבריכת הקבועים, ולכן גם לא ניתן לערוך את המשתנה, וגם אי אפשר לקרוא לפונקציה שהמשתנה מייצג.  
  
הפתרון יחסית "האקי", מכיוון שכחלק מההגבלות של השפה, לא ניתן לאחסן פונקציות "חיות" של Haxe ולהריץ אותן סתם כך, ואחסון הפונקציה מסתמך על שמירת הקוד בזיכרון בצורה כלשהי. לכן, כאשר הזיכרון מזהה ניסיון אחסון של פונקציה אקסטרנית, הוא שומר את ערך המשתנה לא כאותה פונקציה ממש, אלא כפונקציה אחרת, המקבלת את אותם פרמטרים כמו הפונקציה האקסטרנית, ומחזירה טוקן קריאה לאותה פונקציה אקסטרנית עם הפרמטרים הדרושים. זה נראה כך:

FunctionCode(params, Block([

    FunctionReturn(FunctionCall(token, PartArray(forwardedParams)), cell.objectTypeName.asTokenPath())

], cell.objectTypeName.asTokenPath()));

# מדריך למשתמש

.

├── src/

│ ├── js\_example/

│ │ └── JsExample.js.hx

│ ├── little/

│ │ ├── lexer/

│ │ │ ├── Lexer.hx

│ │ │ └── Tokens.hx

│ │ ├── parser/

│ │ │ ├── Parser.hx

│ │ │ └── Tokens.hx

│ │ ├── interpreter/

│ │ │ ├── memory/

│ │ │ │ ├── Memory.hx

│ │ │ │ ├── MemoryPointer.hx

│ │ │ │ ├── ConstantPool.hx

│ │ │ │ ├── ExternalInterfacing.hx

│ │ │ │ ├── HashTables.hx

│ │ │ │ ├── Operators.hx

│ │ │ │ ├── Referrer.hx

│ │ │ │ └── Storage.hx

│ │ │ ├── Interpreter.hx

│ │ │ ├── Runtime.hx

│ │ │ ├── ByteCode.hx

│ │ │ ├── StdOut.hx

│ │ │ └── Tokens.hx

│ │ ├── tools/

│ │ │ ├── Conversion.hx

│ │ │ ├── Extensions.hx

│ │ │ ├── Layer.hx

│ │ │ ├── Plugins.hx

│ │ │ ├── PrepareRun.hx

│ │ │ ├── PrettyPrinter.hx

│ │ │ └── TextTools.hx

│ │ ├── KeywordConfig.hx

│ │ └── Little.hx

│ ├── Main.hx

│ └── UnitTests.eval.hx

## עץ קבצים

├── clients/

│ ├── web/

│ │ ├── index.html

│ │ ├── interp.js

│ │ └── interp.map.js

│ ├── windows/

│ │ └── ---to be compiled---

│ └── linux/

│ └── ---to be compiled---

├── .gitignore

├── compile.hxml

├── demoCode.txt

├── Haxelib.json

├── index.html

├── LICSENSE

└── README.md

## התקנה

### למפתחי תוכנה

לפני שמתחילים, יש לוודא שהשפה Haxe והכלים שלה מותקנות כראוי: יש להתקין את הטרנספיילר של Haxe, ולבדוק ש:

הפקודה Haxe נמצאת בPATH, או לפחות ניתן למצוא את הקובץ ולהפעיל אותו בעזרת המסלול אליו.

הפקודה Haxelib עובדת, אמורה להדפיס מידע על שימוש במנהל הספריות.

מעבר לזה, אני ממליץ:

להוריד Visual Studio Code ולהוריד את ההרחבה Haxe Extension Pack

להוסיף בפרויקט שלהם תקיה ששמה .vscode, ולהוסיף בה את הקובץ tasks.json עם התוכן:

{

    "version": "2.0.0",

    "tasks": [

        {

            "type": "hxml",

            "file": "compile.hxml",

            "problemMatcher": [

                "$Haxe-absolute",

                "$Haxe",

                "$Haxe-error",

                "$Haxe-trace"

            ],

            "group": "build",

            "label": "Haxe: compile.hxml"

        }

    ]

}

עם הקובץ הזה, אפשר לבנות את הפרויקט שלך באמצעות לחיצה על Ctrl+Shift+B

עכשיו כשהכל מותקן כשורה, אפשר להוריד את הפרויקט כספריה באמצעות מנהל הספריות Haxelib, בעזרת הפקודה:  
Haxelib git little https://github.com/ShaharMS/Little/tree/branch/functional-programming

לכלול את הספריה בפרויקט שלך באמצעות הוספת השורה הזאת בקובץ הקומפילציה (hxml) שלך:

--library little

ועכשיו אפשר להשתמש בקוד!

#### Quickstart

ניתן להריץ קוד בעזרת הפונקציה Little.run:

Little.run("define x = 3, print(x)");

var output = Little.runtime.stdout.output;

להוסיף "קובץ" קוד להרצה באמצעות קריאה לLittle.loadModule לפני ההרצה. כמו כן, לשני הפונקציות יש פרמטר לאיפשור debugging. יש לציין שרק כאשר loadModule מורץ במקום פרמטר הdebug שלו משנה:

Little.loadModule("define x = 3", "MyModule");

Little.run("print(x)", true);

var output = Little.runtime.stdout.output;

לקמפל לקוד-בתים באמצעות הפונקציה Little.compile:

var ast = Little.compile("define x = 3, print(x + 6 ^ 3)");

File.saveContent(ByteCode.compile(...ast), "compiled.txt");

ולפרמט קוד באמצעות Little.format:

trace(Little.format("define    x=   3, print (x + 6^3)")); // define x = 3, print(x + 6 ^ 3)

הפונקציה reset משמשת למחיקת כל המידע על ההרצה האחרונה, כדי לתת לך להתכונן להרצה חדשה:

Little.run("define x = 3, print(x)"); // output: 3

Little.reset();

Little.run("print(x)"); // output: error: x is undefined

אפשר לגשת למאזיני אירועים,פונקציות הדפסה בסיסיות ומידע עדכני על ההרצה בעזרת השדה Little.runtime:

Little.runtime.onFieldDeclared.push((name, type) -> {

trace('$type declared: $name');

})

Little.run("define x = 3, print(x)"); // VARIABLE declared: x

לקרוא, לכתוב ולאחסן זיכרון בעזרת Little.memory:

Little.memory.write(["x"], Number(3), "Number");

Little.run("print(x)"); // output: 3

להוסיף אלמנטים אקסטרניים לשפה באמצעות Little.plugin:

Little.plugin.registerFunction("print3", "Idk", [], (params) ->{

    Little.runtime.print("3");

    return NullValue;

}, "Anything");

Little.run("print3()"); // output: 3

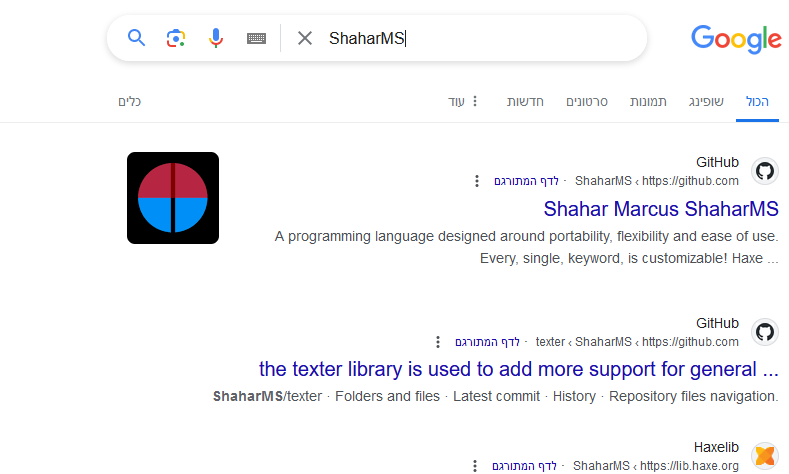
ולראות, לשנות מילים ולהחליף סטים של מילים שמורות בעזרת הפעולות שב-Little.keywords:

Little.keywords.PRINT\_FUNCTION\_NAME = "הדפס";

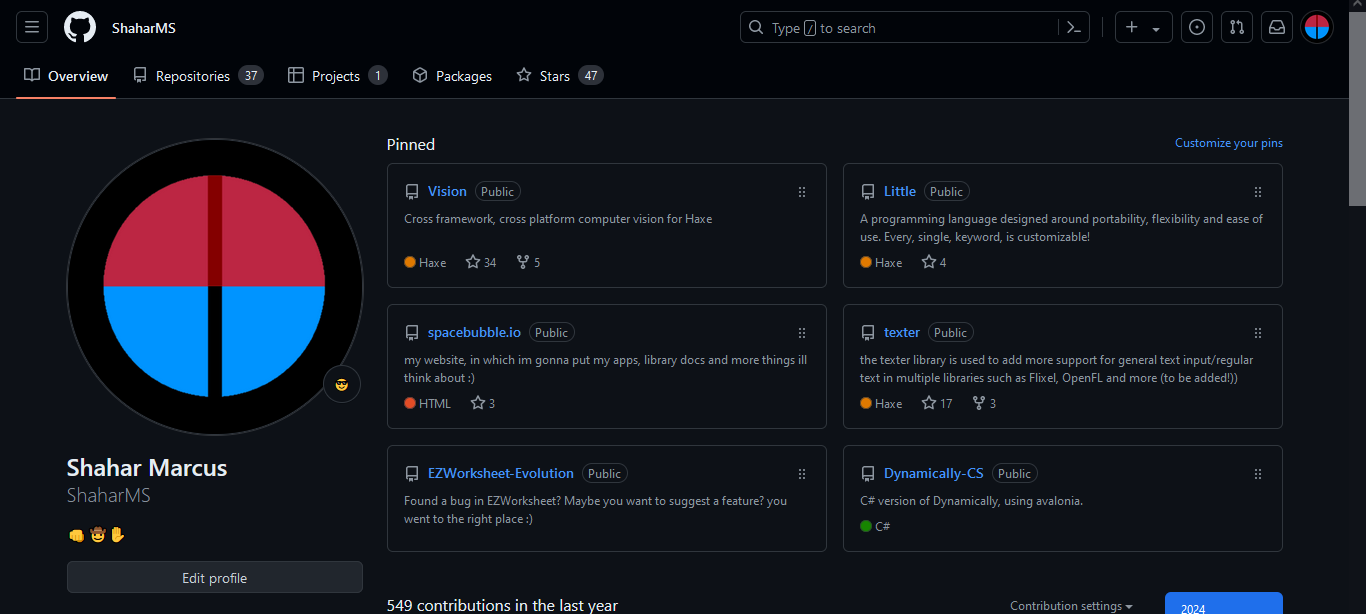
Little.run("הדפס(3)"); // output: 3

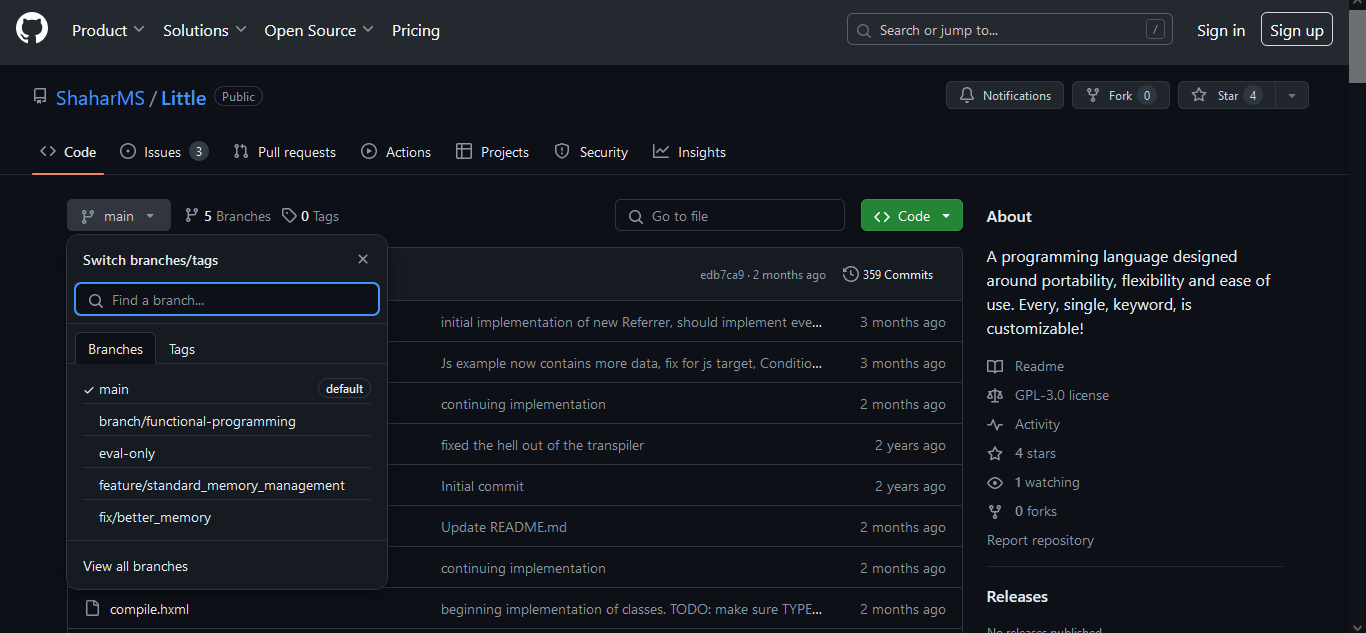
### מתכנתים ב-Little

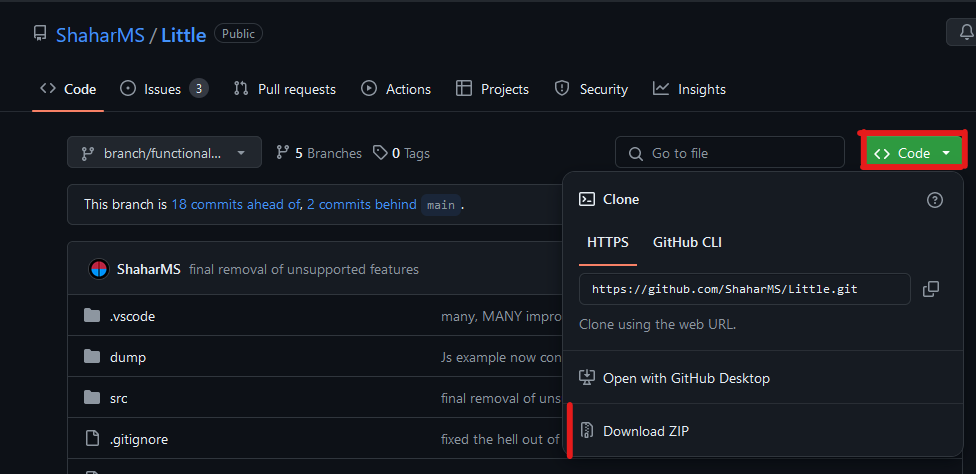
יש לחפש בדפדפן ShaharMS, ולהכנס לתוצאה הראשונה (כנראה):



לאחר הכניסה ללינק, יוצג המסך הבא. יש ללחוץ על הפרויקט Little ב"חלון" הימני העליון:



לאחר מכן, יוצג החלון של הענף הראשי של הפרויקט. אנו לא מעוניינים בענף הזה, לכן עלינו ללחוץ על הלחצן ולבחור את האופציה :

לאחר מכן, יש ללחוץ על הלחצן ולבחור את האופציה :

לאחר הורדת קובץ הZIP, יש לחלץ אותו (כל תוכנת חילוץ טובה), לגשת אל תוך הפרויקט, ולהכנס לתקיה clients. בתקיה יהיו 3 סוגי לקוחות בשלוש תקיות:

תקייה web – הלקוח האינטרנטי, זמין גם ב <https://spacebubble.io/little/demo>. מפעילים בעזרת חיצה כפולה על הקובץ index.html, או בפתיחה שלו בעזרת דפדפן כזה או אחר.

תקיה windows – לקוח שורת הפקודה כתוכנה להרצה בwindows.

תקיה linux – לקוח שורת הפקודה כתוכנה להרצה בlinux

#### Quickstart

לקוח אינטרנטי – יש להסתכל בצד הימני של המסך – מעבר לממקום להחלפת מילים שמורות, הוא גם מכיל דוגמאות קוד שאפשר ואמורים ללמוד מהם.

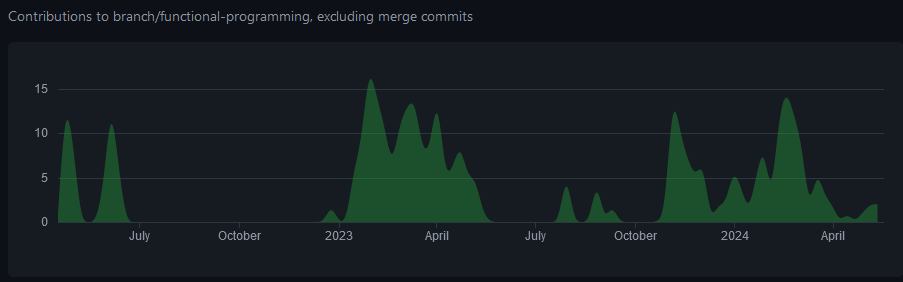
לקוח שורת פקודה – יש להשתמש בפקודה printSample! כמו שהוזכר תחת הכותרת [סוג לקוח: לומד תכנות, מתכנת Little](#_סוג_לקוח:_לומד)

# רפלקציה

## עבודה על הפרויקט

לצערי ולשמחתי, פרויקטים כאלה מעולם אינם נגמרים – אנחנו אולי יכולים להציב אבני דרך, אך אי אפשר "להשלים" פרויקטים כאלה.

אז הייתי חייב להחליט על אבן דרך "סופית". לגרסת הפרויקט שאני מגיש, הצבתי את אבן הדרך הסופית בתכנות פונקציונאלי. הצבתי את אבן הדרך הסופית שם משתי סיבות:  
הראשונה אולי ברורה, והיא שצריך לסיים עם הפרויקט מתישהו, אך מאחורי השניה יש מחשבה – תוך כדי התכנות של הפרויקט, שמתי לב שכשאני "חופר" יותר אל תוך נושאים מסוימים, הכרזת מחלקות לדוגמה, אני מבזבז הרבה מאוד זמן על תכנות דברים שאני גם כבר יודע איך עושים, וגם כוללים הרבה עבודה שחורה.

בקלות אפשר לראות שהפרויקט הזה היה מסע, שכלל עליות ומורדות, התלהבויות, הפסקות עבודה, ולפעמים אפילו Burnout:

(בתמונה: גרף תדירות commits לפי זמן, מאפריל 2022 עד מאי 2024)

מהפרויקט הזה למדתי על הרבה דברים, אך לא ישירות, ולכן, אני לא זוכר שאי פעם הייתה לי בעיה משמעותית עם תכנות של חלק מהפרויקט – כל פעם שהגעתי למשהו קשה, כבר למדתי הרבה מאוד, והייתי יכול להשתמש בניסיון ובידע שלי כדי לפתור אותו. לכן אפשר גם לראות, שרוב האלגוריתמים שהשתמשתי בהם בפרויקט הם גרסאות "השראה" של אלגוריתמים אחרים – לא הייתי צריך להצמד וללמוד ספציפית אך ורק ממקום אחד – כל פעם שנתקלתי בבעיה כזו או אחרת, לקחתי הרבה ידע מהרבה מקומות, ועיצבתי פתרון שבסוף עבד מצוין.

בגלל המודל שבעזרתו למדתי, יחסית קל לי להעיד על נושאים שלמדתי עליהם מהפרויקט:

Hashing

ניהול זיכרון, Stack/Heap

ByteCode וקוד מכונה

עצי syntax

שיטות עיבוד מידע בסדר גודל גדול/עצום

ומעבר לתחומים לימודיים, התחלתי להרגיש מאוד בנוח עם מגוון "דרכי תכנות", ובמיוחד רקורסיה, שכן רוב הפרויקט – מפונקציות, מחלקות ועד אובייקטים וADTים, כתוב מאילוץ בצורה רקורסיבית...

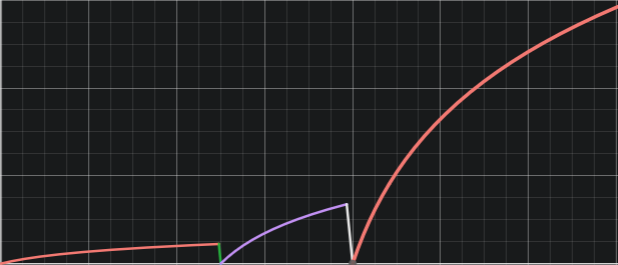
## תובנות

מתכנון ומתהליך "בניית" הפרויקט רכשתי מגוון כלים ולמדתי הרבה "לקחים" לעתיד:

**חשיבות תכנון הפרויקט**: תוך כדי בניית הפרויקט, "גיליתי" 3 סיבות ב3 מילים למה תכנון המבנה של הפרויקט זה דבר כל-כך חשוב:

* + **Scalability** – ככל שפרויקט נהיה רחב וגדול יותר, מתפתח דבר שקוראים לו "Software Rot" – יותר מדי חלקים שלא עובדים הכי טוב אחד עם השני, ולא בנויים טוב אחד על השני, מתחילים בסוף לזייף יותר ויותר, עד שאנחנו מגיעים למצב ששום דבר לא עובד כמצופה, וגם אין דרך חזור. מבנה פרויקט טוב מאט מאוד את היווצרות ה"עובש", ולכן התכנון כזה חשוב.
  + **Burnout** – כשהפרויקט בנוי כך שכל החלקי בבירור מפוצלים לחלקים שונים, שמשתמשים אך לא מסתמכים אחד על השני, אפשר לקפוץ מתכנות חלק אחד לחלק אחר בפרויקט, וההתקדמות גם נשארת קרובה לליניארית, וגם נמאס לך הרבה, *הרבה* יותר לאט...
  + **Learnability** – אחד מהדברים הכי מבאסים כשמפתח מחפש כלי להשתמש בו, או ללמוד ממנו. זה שהוא לא מצליח בכלל להבין את הכלי – איך כל דבר משתמש בכל דבר אחר, למה הרכיב הזה ספציפית חיוני, וכו'. לכן, על מנת שכולם יוכלו לפתח יותר טוב, אנחנו נרצה לפתח קוד טוב יותר, שמייצג דוגמה טובה יותר, וקל ללמוד גםם ממנו, וגם לאמץ את המבנה שלו...

**אסור לפחד מנושאים גדולים**: כשנושא נראה ענק, זה בדרך כלל אשליה – בסופו של יום, כל נושא מורכב מהרבה מאוד חלקים, שחלק חיוני לדעת, וחלק פחות. דבר חשוב שלמדתי במהלך הפרויקט, ואפילו בכלליות במהלך המסע שלי כמתכנת, זה שלכל שלב נתון, צריך לדעת כמות יחסית קטנה של מידע מאותו נושא, ואולי עם הזמן צריך להרחיב אותה, אבל זה לעולם לא באופן מידי – זה לא נכון להסתכל על נושא כמונולית', אלא כערמת אבנים...

**מותר לטעות, ואפילו בגדול**: יצא לי לעשות refactoring שלוש פעמים במהלך תכנות הפרויקט, וברטרוספקט, אני שמח על כל פעם שמחקתי את כל הקוד וכתבתי אותו מחדש. באף אחת מהפעמים שעשיתי זאת לא הפסדתי התקדמות: בסוף, יוצא שאדם מתכנת משהו, במשך אפילו חצי שנה, מבין שהדבר לא טוב, מתכנת את זה טוב יותר, ומדביק את הפער ואפילו יותר תוך שבועיים. אצרף גרף לזה:  
(בגרף: כל חלק עליה זה התקדמות בפרויקט, כל ירידה היא תכנות מחדש/refactor)  


## הסתכלות

### אחורנית

הפרויקט הזה פותח במשך שנתיים, בהם למדתי המון. ברור שהיו דברים שהייתי מיישם אחרת:

אופרטורים – גם בהסתכלות אחורה, אני לא 100% בטוח למה פיצלתי בין פעולות וערכים רגילים, לאופרטורים. אין בזה שום דבר טוב. האימפלמנטציה לא מאפשרת לי דינמית להכריז על משתנים, ובמיוחד שלא לאחזר אותן לפי הצדדים שהם מבקשים. פשוט, לא משהו...

אחסון פונקציות חיצוניות – אם הייתי יודע יותר, הייתי גם משקיע יותר בפתרון לשמירת פעולות אקסטרניות בזיכרון, ולא הייתי חייב להסתבך חודש שלם על בעיות שקשורות לאימפלמנטציה של זה.

### וקדימה

אם היו לי יותר משאבים ויותר זמן, הייתי מוסיף ומשנה יחסית הרבה דברים:

מחיקה שלמה ש מערכת האופרטורים, ושילובה עם המערכת הרגילה והאקסטרנית

מוסיף הכרזה על סוגים, אופרטורים, ותנאים ולולאות

הוספת זיהוי אופרטורים רב-סימניים גם כפיצ'ר של זמן ריצה, על מנת לאפשר הכרזה דינמית לגמרי של אופרטורים

הרחבה משמעותית של הספרייה הסטנדרטית שהשפה מספקת

מוסיף קומפיילר לקוד מכונה, ולא רק לקוד-בתים ספציפי

משפר את התמיכה בדוקומנטציה ברחבי השפה, ומאפשר גישה דינמית אליהם

## תודות

קודם כל, לאח שלי גיא, שהיה מוכן לעזור לי בכל נושא, אפילו אם ידע בו קצת יחסית, ואם כן, השקיע זמן מהיום שלו ללמוד על הנושא. תודה ענקית!

מעבר לו, לא קיבלתי עזרה מיוחדת מאדם ספציפי, אך כן מאוד נעזרתי בשלושה "מקורות":

Youtube, במיוחד ערוצים כמו Low Level Learning

Haxe Discord Server, מלא אנשים שיודעים מלא דברים, ובאופן מפתיע, מאוד ידידותיים ומוכנים תמיד לעזור

וכמובן, ויקיפדיה – באופן אירוני במיוחד, זה היה מקור המידע האולטימטיבי לאורך כל המסע הזה – ומה אני מופתע – הרבה אנשים שהרבה יותר חכמים ממני עבדו בצורה הרבה יותר מבוקרת מהרגיל על העמודים בויקיפדיה - הם חייבים להיות טובים...