הפרויקט שלנו עוסק במאמר Learning rate branching heuristic for SAT solvers. במהלך הפרויקט מימשנו את האלגוריתמים המתוארים במאמר במסגרת של מימוש של Edusat solver בסיסי עם היוריסטיקה VSIDS ובדקנו האם ישנו שיפור בביצועים.

דו"ח סיום פרויקט באלגוריתמים בלוגיקה

Learning rate branching heuristic for SAT solvers by Jia Hui Liang, Vijay Ganesh, Pascal Poupart, and Krzysztof Czarnecki
University of Waterloo, Waterloo, Canada

שי כליפה, יונתן להט

תוכן

הצגת עקרונות ומושגים רלוונטיים להמשך:

MAB algorithm called exponential recency weighted average (ERWA):

אלגוריתמי MAB או multi armed bandit הינם אלגוריתמי בינה מלאכותית שמיועדים לקביעת הפעולה שתביא למקסימום את תוחלת הרווח של שחקן. הדוגמה הנפוצה שניתנת באלגוריתמים מן הסוג הנ"ל היא ניסיון למצוא את המכונה בעלת תוחלת הרווח הכי גבוהה בקזינו. האלגוריתם מתחלק לשני שלבים exploration ו exploitation. בשלב הexploration האלגוריתם מנסה מכונות באקראי ומחשב לכל מכונה ממוצע במקרה שלנו של exponential recency weighted average אנו מקטינים באופן אקספוננציאלי את המשקל שניתן לתצפיות ישנות על ידי עדכון הממוצע על ידי כפל הערך הישן פי $1-\alpha$ ותצפית חדשה פי α. ככל שנראה יותר דוגמאות נוכל לסמוך יותר על נכונות הממוצע שחישבנו ולכן נקטין את α לאורך הריצה. בשלב ה*exploitation* האלגוריתם מנצל את מה שלמד ובוחר במכונה שחושב לה הממוצע הכי גבוהה ומשתמש בה ומוסיף את התוצאה לממוצע כמו בשלב ה*exploration*. במהלך הריצה מבצעים את שני השלבים לחילופין בהתחלה יותר *exploration* כדי ללמוד את הסביבה ואז יותר *exploitation* כדי להשתמש במה שנלמד לבחירת אסטרטגיה. במקרה של ההיוריסטיקה המתוארת במאמר ה*exploration* מבוצע על ידי *propagation* , ה *exploitation* מבוצע על ידי בחירת המשתנה עם ערך היוריסטיקה הגבוהה ביותר ב*Decide*.

Conflict side and Reason side:

המאמר מציג חלוקה של הimplication graph לשני צדדים צד הconflict וצד הreason. הגרף מחולק לפי הlearnt clause כאשר כל מי שנמצא מימין לlearnt clause בגרף כלומר כל מה שנגרר על ידי הlearnt clause כולל הconflict נקרא conflict side וכל מה שהשתתף בהסקת הlearnt clause נקרא Reason side.

Interval:

מוגדר במאמר כמספר הפסוקיות שנלמדו מהרגע שלמשתנה הושם ערך עד הרג שבו המשתנה איבד את ערכו.

Learning Rate:

מוגדר במאמר להיות מספר הפעמים בהם משתנה היה חלק מה Conflict side במשך הזמן בו היה לו ערך לחלק למספר הפסוקיות שנלמדו כאשר היה לו ערך. הנ"ל משערך כמה המשתנה משמעותי בלמידת Conflicts במטרה למצוא משתנים שיכולים לייצר הרבה Conflicts ושהשמה טובה שלהם יכולה לעזור ללמוד מהר יותר.

Reason side rate:

מוגדר במאמר להיות מספר הפעמים בהם משתנה לקח חלק בהסקת ה learnt clause (היה שייך לReason side) במשך הזמן בו היה לו ערך לחלק במספר הפסוקיות שנלמדו כאשר היה לו ערך. הנ"ל מגדיל את הציון של משתנים שמשתתפים בהסקת הlearnt clause כהערכה שהשמה מוקדמת וטובה שלהם יכולה לעזור ללמוד מהר יותר.

Locality:

קיים יתרון מובהק לאלגוריתם שנותן עדיפות לחיפוש באזור שבו הוא מחפש כרגע וממצה אותו עד תום על פני אלגוריתמים שנעים וזזים מאזור אחד במרחב החיפוש למשנהו. כדי לממש את העיקרון הזה בכל conflict מכפילים את הציון של כל המשתנים שאין להם השמה בdiscount factor במאמר 0.95 וזה למעשה נותן יתרון למשתנים שאכן יש להם השמה באותו שלב.

אלגוריתמים ומימושים שלהם:

ERWA:

מתוך המאמר:

procedure AFTERCONFLICTANALYSIS($learntClauseVars \subseteq Vars$, $conflictSide \subseteq Vars$)
Called after a learnt clause is generated from conflict analysis.
  $LearntCounter \leftarrow LearntCounter + 1$
  for $v \in conflictSide \cup learntClauseVars$ **do**
    $Participated_v \leftarrow Participated_v + 1$
  if $\alpha > 0.06$ **then**
    $\alpha \leftarrow \alpha - 10^{-6}$

משתנים:

```
double alpha; // learning rate for ERWA
vector<double> m_Q; // Var => Qv score
double m_curr_Q; // holds the max Qv score of unassigned
variable
vector<int> time_assigned; // # of learnt clauses at
assignment
vector<int> participated; // # of conflicts the variable
participated in
```

alpha מייצג את α מהמאמר וקובע בכמה נתקן את הממוצע.

m_Q מחזיק לכל משתנה את הייצוג שלו לפי היוריסטיקה.

m_curr_Q מחזיק את הציון של המשתנים שכרגע נרצה לבחור ב*Decide*.

Time_assigned מחזיק לכל משתנה כמה פסוקיות נלמדו כאשר הושם לו ערך.

Participated מחזיק לכל משתנה בכמה *conflict sides* הוא השתתף מאז שקיבל ערך

חלקי מימוש שמתחזקים נכונות:

```
if (!marked[v]) {
                ++participated[v];
```

כל המשתנים שנעבור עליהם בחישוב ה*learnt clause* ב*analyze* שייכים ל*conflict side* ו*marked* דואג שלא נעבור על אותו משתנה פעמיים.

```
if (VarDecHeuristic != VAR_DEC_HEURISTIC::MINISAT) if (alpha >
0.06) alpha -= 1e-6;
```

בכל שלושת ה*Heuristics* נרצה להקטין את α ב10^{-6} כפי שעושים במאמר.

שני קטעי הקוד הנ"ל נלקחו מ*analysis* (הפונקציה שמנתחת *conflicts*)
ומבוצעים תוך כדי ניתוח הקונפליקט ולא ממש אחריו כדי לחסוך זמן ריצה.
שאר הפונקציות והמימושים הרלוונטיים משותפים לשלושת ה*Heuristics* ונדון בהן בנפרד.

ERWA + RSR:

מתוך המאמר:

$$\textbf{procedure } \textsc{AfterConflictAnalysis}(learntClauseVars \subseteq Vars,\ conflictSide \subseteq Vars)$$
$$Algorithm1.AfterConflictAnalysis(learntClauseVars, conflictSide)$$
$$\textbf{for } v \in (\bigcup_{u \in learntClauseVars} reason(u)) \setminus learntClauseVars \textbf{ do}$$
$$Reasoned_v \leftarrow Reasoned_v + 1$$

תוספת למשתני ERWA שרלוונטיים לאלגוריתם הנוכחי:

```
vector<int> reasoned; // # of conflicts the variable reasoned
in
```

reasoned מחזיק לכל משתנה את מספר הlearnt clauses שהוא השתתף ביצירתן.

חלקי מימוש שמתחזקים נכונות:

```
if (VarDecHeuristic == VAR_DEC_HEURISTIC::ERWA_RSR ||
VarDecHeuristic == VAR_DEC_HEURISTIC::LRB)
{
	for (clause_it it = new_clause.cl().begin(); it !=
		new_clause.cl().end(); ++it)
	{
		Lit l = *it;
		Var va = l2v(l);
		int ant = antecedent[va];
		if (ant == -1) continue;
		Clause ant_clause = cnf[ant];
		for (clause_it it2 = ant_clause.cl().begin(); it2 !=
			ant_clause.cl().end(); ++it2)
		{
			Lit l2 = *it2;
			Var va2 = l2v(l2);
			if (va2 != va && !in_learnt_clause[va2])
				reasoned[va2] += 1;
		}
}
```

בחלק זה של הקוד אנו עוברים על הlearnt clause בודקים לכל משתנה בה האם הוא הוסק על ידי propagation אם כן אנו מוסיפים כל משתנה בפסוקית

ממנה עשינו propagation לreason של הlearnt clause כפי שמתואר באלגוריתם במאמר.
גם חלק קוד זה נלקח מanalysis ומבוצע אחרי בניית הlearnt clause.

LRB

תוספת למשתנים קודמים שרלוונטית לאלגוריתם הנוכחי:

```
vector<double> factors; // # factor to double Q in LRB var =>
factor
```

factors מכיל לכל משתנה פי כמה להכפיל את הציון הקודם שלו לפני תיקון הציון.

```
if (VarDecHeuristic == VAR_DEC_HEURISTIC::LRB) {
      double factor = 0.95;
      for (Var i = 1; i < nvars + 1; i++)
      {
            if (state[i] == VarState::V_UNASSIGNED)
            {
                  factors[i] *= factor;
            }
      }
}
```

בחלק זה של הקוד אנו מכפילים לכל משתנה שאין לו השמה את הפקטור פי 0.95 כדי שכאשר נשנה את הציון נקטין אותו פי הפקטור הנכון.
גם קטע הקוד הזה נלקח מanalysis ומבוצע לאחר בניית הlearnt clause.

קוד משותף לשלושת הHeuristics והסברים:

אתחול המשתנים המוזכרים לעיל:

```
time_assigned.resize(nvars + 1);
participated.resize(nvars + 1);
reasoned.resize(nvars + 1);
factors.resize(nvars + 1);
m_Q.resize(nvars + 1);
m_curr_Q = 0.0f;
for (int v = 1; v <= nvars; ++v) {
      m_Q[v] = 0;
      time_assigned[v] = 0;
      participated[v] = 0;
      reasoned[v] = 0;
      factors[v] = 1;
}
```

לקוח מתוך הפונקציה initialize.

מתוך המאמר:

procedure ONASSIGN($v \in Vars$)

$Assigned_v \leftarrow LearntCounter$
$Participated_v \leftarrow 0$

procedure ONASSIGN($v \in Vars$)
$Algorithm1.OnAssign()$
$Reasoned_v \leftarrow 0$

ממומשים על ידי:

```
void Solver::reset_after_assigment(Var v)
{
	participated[v] = 0;
	reasoned[v] = 0;
	time_assigned[v] = num_learned;
}
```

מתוך המאמר:

procedure ONUNASSIGN($v \in Vars$)

$Interval \leftarrow LearntCounter - Assigned_v$
if $Interval > 0$ **then**
$r \leftarrow Participated_v / Interval.$
$Q_v = (1-\alpha) \cdot Q_v + \alpha \cdot r$

procedure ONUNASSIGN($v \in Vars$)

$Interval \leftarrow LearntCounter - Assigned_v$
if $Interval > 0$ **then**
$r \leftarrow Participated_v / Interval.$
$rsr \leftarrow Reasoned_v / Interval.$
$Q_v = (1-\alpha) \cdot Q_v + \alpha \cdot (r + rsr)$

procedure AFTERCONFLICTANALYSIS($learntClauseVars \subseteq Vars$, $conflictSide \subseteq Vars$)

$Algorithm2.AfterConflictAnalysis(learntClauseVars, conflictSide)$
$U \leftarrow \{v \in Vars \mid isUnassigned(v)\}$
for $v \in U$ **do**
$Q_v \leftarrow 0.95 \times Q_v.$

ממומשים ביחד ב:

```
void Solver::bumpQScore(int var_idx)
{
	double new_score;
	double score = m_Q[var_idx];

	if (score > 0) {
		Assert(m_Q_Score2Vars.find(score) !=
		m_Q_Score2Vars.end());
		m_Q_Score2Vars[score].erase(var_idx);
		if (m_Q_Score2Vars[score].size() == 0)
			m_Q_Score2Vars.erase(score);
	}
	double LR;
	double RSR;
	double interval = num_learned - time_assigned[var_idx];
	if (num_learned == 0)
	{
		LR = 0;
		RSR = 0;
	}
	else if (interval != 0)
	{
		LR = participated[var_idx] / interval;
		RSR = reasoned[var_idx] / interval;
```

```
        }
        else return;
        new_score = (1 - alpha) * factors[var_idx] * score +
        alpha * (LR + RSR);
        m_Q[var_idx] = new_score;
        factors[var_idx] = 1;
        if (m_Q_Score2Vars.find(new_score) !=
              m_Q_Score2Vars.end())
              m_Q_Score2Vars[new_score].insert(var_idx);
        else
              m_Q_Score2Vars[new_score] = unordered_set<int>({
              var_idx });
}
```

כאשר ברירת המחדל של reasoned, factors היא ניטרלית (0 ו 1 בהתאמה) כך שהפונקציה מחשבת נכון גם אם נשתמש בERWA שלא משתמש במשתנים אלה. אנו משנים את reasoned, factors מברירות המחדל שלהם רק אם משתמשים בHeuristic שצריכה אותם לחישוב. כמו כן אנו קוראים לפונקציה לאחר שהמשתנה מאבד את השמתו.

דוגמה לDecide והסברים עליו:

```
case  VAR_DEC_HEURISTIC::ERWA: {
        if (m_should_reset_iterators)
              reset_iterators_Q(m_curr_Q);
        Var v = 0;
        int cnt = 0;
        if (m_Q_Score2Vars_it == m_Q_Score2Vars.end()) break;
        while (true) { // scores from high to low
              while (m_VarsSameQ_it != m_Q_Score2Vars_it->
                    second.end())
              {
                    v = *m_VarsSameQ_it;
                    ++m_VarsSameQ_it;
                    ++cnt;
                    if (state[v] == VarState::V_UNASSIGNED)
                    { // found a var to assign
                          m_curr_Q = m_Q_Score2Vars_it->first;
                          assert(m_curr_Q == m_Q[v]);
                          best_lit = getVal(v);
                          goto Apply_decision;
                    }
              }
              ++m_Q_Score2Vars_it;
              if (m_Q_Score2Vars_it == m_Q_Score2Vars.end())
                     break;
              m_VarsSameQ_it = m_Q_Score2Vars_it->second.begin();
        }
        break;
```

}

כדי שנוכל לבצע השוואה apples to apples ניסינו לשמור ככל הניתן על המבני נתונים שהאלגוריתם השתמש בהם בVSIDS כך שלא יהיה לנו overhead מצד אחת הHeuristics במהלך Decide שלא קשור לערך עצמו.

לכן פונקציית הDecide זהה ביצועית לפונקציה בVSIDS רק עם מבני נתונים שמותאמים אליה.

הפונקציה עובדת על ידי תחזוקת מילון שמפתחותיו ציונים וערכיו הם קבוצת משתנים עם הציון הזה. הפונקציה עוברת על המילון עד שהיא מוצאת משתנה ללא השמה (בעל הציון הכי גבוהה) ומחזירה אותו.

Decide עובדת אותו דבר לשלושת הHeuristics הקוד שוכפל לנוחות שינויים. באם היינו צריכים לשנות לאחת מהHeuristics את הDecide למרות הרצון שלנו לא לעשות זאת רצינו שהקוד יאפשר זאת בקלות.

תוצאות:

אלו טבלאות של התוצאות על פני הסטים השונים:

זו הטבלה עבור היורסטיקה Phasesaving :

		Average Time	Finished	Num of conflicts
ERWA	Easy	0.03725	72	23.13888888888889
	Sat	166.14992857142857	13	3396.0
	Unsat	62.18919999999999	5	488.6
	2002 – beta	94.63805276381903	375	4996.095477386934
RSR	Easy	0.036847222222222226	72	23.75
	Sat	192.4457142857143	13	3367.5714285714284
	Unsat	33.4746	5	334.2
	2002 – beta	93.2177763819095	385	6040.228643216081
LRB	Easy	0.040638888888888884	72	25.055555555555557
	Sat	187.1147142857143	13	3310.714285714286
	Unsat	38.765600000000006	5	333.6
	2002 – beta	108.90097236180914	378	6591.459798994975
VSIDS	Easy	0.07333333333333335	72	45.5
	Sat	202.09349999999998	14	5318.285714285715
	Unsat	34.365	5	279.8
	2002 – beta	92.54488944723622	378	6843.934673366834

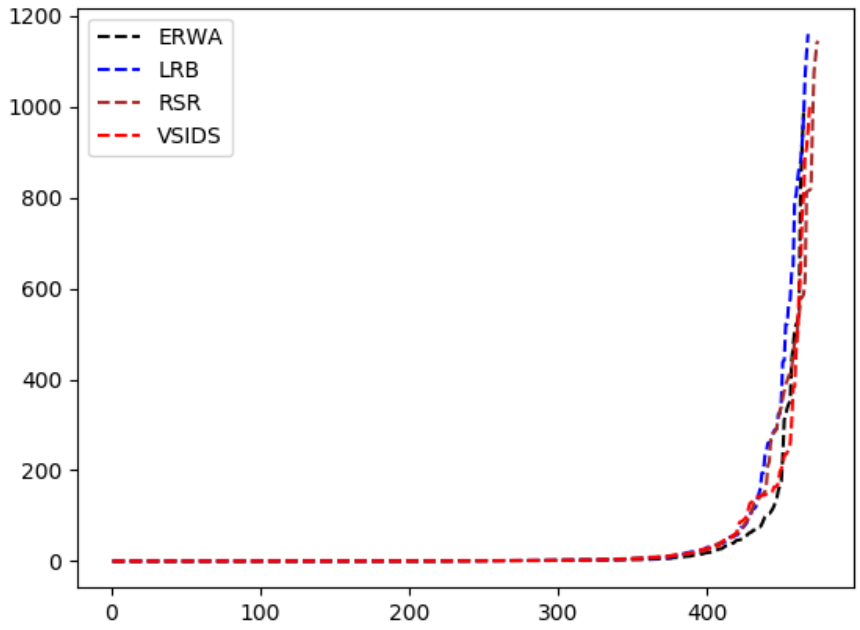
זו הטבלה עבור היורסטיקה Litscore :

	Average Time	Finished	Num of conflicts
ERWA	130.68304907975448	450	6188.668711656442
RSR	126.80247852760735	458	5917.067484662577
LRB	110.8268425357873	464	5057.231083844581
VSIDS	116.50357055214722	455	5812.963190184049

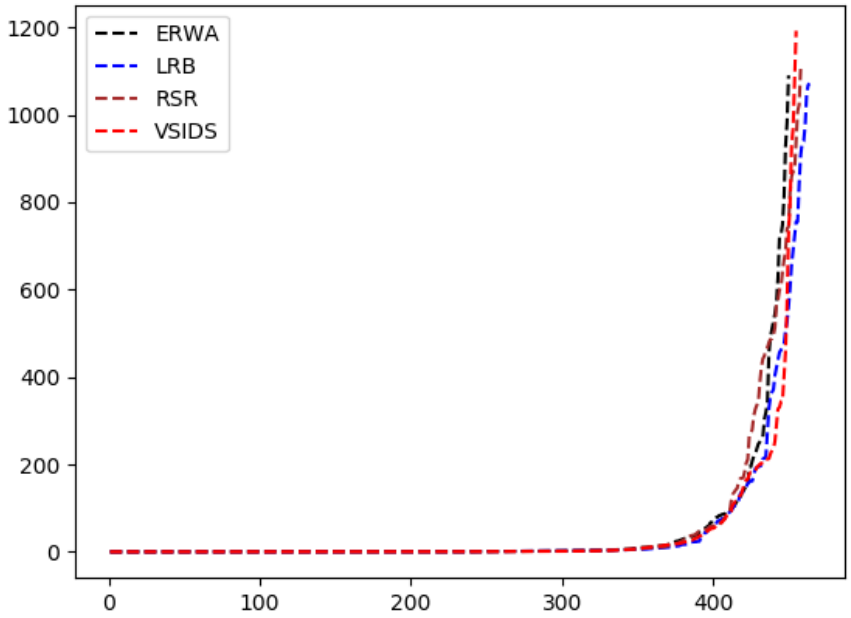
עבור היוריסטיקה Litscore הרצנו את כל הסטים ביחד ולכן אין הפרדה בטבלה של התוצאות.

אלו הגרפים שמשווים בין היוריסטיקות השונות:

זה הגרף של Phasesaving :



זה הגרף של Litscore :



קישור לקוד:

https://github.com/shai-califa/project-algorithms-in-logic/tree/main