

На 317. седници Наставно-научног већа одржаној у петак 23. 1. 2015. године, именовани смо за чланове комисије за преглед и оцену рукописа „Решавање проблема CSP техникама свођења на проблем SAT“ кандидата Мирка Стојадиновића као докторске тезе. Комисија је предати рукопис пажљиво прочитала и подноси следећи

Извештај

1 Биографија кандидата

Мирко Стојадиновић рођен је у Смедеревској Паланци 28. октобра 1985. године. Основну школу “Херој Иван Мукер” и гимназију “Света Ђорђевић” је обе завршио са просечном оценом 5.00 и као носилац Вукових диплома. Проглашен је за ђака генерације гимназије. Учествовао је на великом броју такмичења из математике, српског и енглеског језика. Најважније награде које је освојио су два друга места из математике на републичким смотрема младих талената које су одржане у Кладову. Студије на смеру Рачунарство и информатика на Математичком факултету Универзитета у Београду уписао је школске 2004/05 године, а дипломирао је у јулу 2009. године са просечном оценом 9.53. Током студија је учествовао у раду студентског парламента, а био је активан и као члан студентске организације *AISEC*. У оквиру организације *IAESTE* је ишао на двомесечну стручну праксу у Лођ, Пољска, где је радио на развоју системских алатки за оперативни систем *QNH*. Као један од 200 најбољих студената, путовао је Европом у организацији Европског покрета у Србији. Био је стипендиста Републичке фондације за развој научног и уметничког подмлатка. Докторске академске студије на смеру Информатика уписао је у октобру 2009. године. Током студија је имао излагања на неколико конференција и радионица у земљи и иностранству. Од октобра 2009. био је запослен је као сарадник у настави, а од октобра 2011. до јануара 2016. године као асистент на Катедри за рачунарство и информатику Математичког факултета Универзитета у Београду. Током досадашњег рада на Математичком факултету држао је вежбе из 6 предмета. Од 2011. до 2016. године био је укључен у пројекат 174021 Министарства просвете и науке Републике Србије, а током тог периода био је и члан групе за аутоматско резонување Математичког факултета. Од јануара 2016. године запослен је као софтверски инжењер у компанији *Microsoft Development Center Serbia*.

2 Област рукописа

Рукопис „Решавање проблема CSP техникама свођења на проблем SAT“ кандидата Мирка Стојадиновића припада широј области аутоматског резонувања и спаја уже области решавања проблема задовољења ограничења (енгл. *constraint satisfaction problem, CSP*) и решавања

проблема исказне задовољивости (енгл. *satisfiability problem*, *SAT*). Ова област (као и рукопис) представља спој области вештачке интелигенције, алгоритмике и математичке логике. У тези се такође користе и технике машинског учења.

Аутоматско резонување је важна и широко распрострањена област којом се бави неколико хиљада истраживача у свету. Главне примене аутоматског резонувања су у верификацији софтвера, верификацији хардвера, аутоматском доказивању математичких теорема, решавању оптимизационих и комбинаторних проблема итд.

Проблеми задовољења ограничења (*CSP*) су математички проблеми у којима је потребно пронаћи неки објекат или скуп објеката који задовољавају унапред дата ограничења. Једноставни примери ових проблема су логичке загонетке, попут проблема 8 дама, проблема бојења мапа, генерисања укрштеница, судоку проблема и слично, док се реални примери ових проблема проналазе пре свега у задацима распоређивања, планирања, алокације ресурса и слично. *CSP* проблеми су обично веома тешки комбинаторни проблеми чије успешно решавање захтева комбиновање егзактних алгоритама претраге и хеуристика. Решавање *CSP* проблема проучава се и у областима вештачке интелигенције и операционих истраживања.

Проблем исказне задовољивости (*SAT*) је проблем испитивања задовољивости исказне формуле у конјунктивној нормалној форми. Проблем *SAT* представља један од централних проблема у области истраживања сложености израчунавања. То је један од првих проблема за које је доказано да је *NP*-комплетан и још није познато да ли постоји полиномијални алгоритам за његово решавање. И поред тога, данашњи *SAT* решавачи, захваљујући комбиновању напредних алгоритама претраге и специјално дизајнираних хеуристика, могу да реше инстанце проблема које имају десетине хиљада променљивих и неколико милиона клауза. Зато се многи практични проблеми из области вештачке интелигенције, дизајна логичких кола и аутоматског доказивања теорема успешно решавају свођењем на проблем *SAT*.

3 Структура рукописа и кратак приказ

Рукопис има 172 стране и користи 136 библиографских јединица. Сачињен је од следећих глава:

1. Увод
 - 1.1. Основни појмови
 - 1.2. Доприноси тезе
 - 1.3. Организација тезе
2. Решавање проблема *CSP* свођењем на проблем *SAT*
 - 2.1. Опис проблема
 - 2.2. Језици за моделовање проблема *CSP*
 - 2.3. Преглед општих метода решавања проблема *CSP*
 - 2.4. Преглед метода решавања проблема *CSP* свођењем на проблем *SAT*

- 2.5. Преглед нових кодирања *CSP* на *SAT*
- 2.6. Имплементација система *meSAT* и његова експериментална евалуација
- 2.7. Анализа кодирања
- 3. Коришћење портфолио система у решавању проблема *CSP*
 - 3.1. Технике машинског учења
 - 3.2. Преглед постојећих портфолија за решавање проблема *SAT* и *CSP*
 - 3.3. *CSP* портфолио *ArgoCSP-kNN*
 - 3.4. Коришћење портфолија у одабиру решавача
 - 3.5. Портфолио приступ заснован на кратком тренирању
- 4. Примене *CSP* решавача
 - 4.1. Проблем распоређивања контролора лета и његово решавање
 - 4.2. Генерисање и решавање великих судоку загонетки
- 5. Закључци и даљи рад
 - 5.1. Закључци
 - 5.2. Даљи рад

У наставку је кратко описан садржај свих глава.

1. Увод.

У овој глави уводи се програмска парадигма програмирање ограничења (енгл. *constraint programming, CP*), проблем задовољења ограничења (енгл. *constraint satisfaction problem, CSP*) и проблем оптимизације уз ограничења (енгл. *constraint optimization problem, COP*). Укратко се приказује историјат ових проблема и основни приступи њиховом решавању. Уводи се и проблем исказне задовољивости (енгл. *satisfiability problem, SAT*) и укратко се описују основни приступи за решавање проблема *CSP* свођењем на проблем *SAT*. Након тога, експлицитно су набројани и основни доприноси тезе и описана је њена даља организација.

2. Решавање проблема *CSP* свођењем на проблем *SAT*.

У овој глави даје се математичка дефиниција проблема *CSP* и формално се уводе разни типови ограничења (екстензионална, интензионална, глобална). Даје се неколико примера проблема *CSP* и даје се формална дефиниција коначних линеарних проблема *CSP* на које се кандидат фокусирао у тези. Даје се и математичка дефиниција проблема *COP*. Уводе се језици за моделирање проблема *CSP* и приказују најзначајнији представници (*MiniZinc, FlatZinc, XCSP, Sugar* језик). Након тога даје се кратак преглед општих метода за решавање проблема *CSP*. Описује се претрага са повратком (енгл. *backtracking*), алгоритми пропагирања ограничења (до постизања различитих нивоа конзистентности) и локална претрага. Даје се и приказ неких постојећих система за решавање проблема *CSP*. Описује се техника гранања и ограничавања (енгл. *branch and bound*) за решавање проблема *COP*.

Посебна пажња се посвећује техникама свођења проблема *CSP* на проблем *SAT*. Формално се дефинише проблем *SAT* и савремени алгоритми његовог решавања, који су засновани на процедури *DPLL*. Описује се неколико техника кодирања проблема *CSP* на проблем *SAT*. Приказује се кодирање Булових ограничења кардиналности (енгл. *Boolean cardinality constraints*) које се користи у оквиру многих кодирања. Након тога се детаљно описују директно кодирање (енгл. *direct encoding*), кодирање подршке (енгл. *support encoding*), кодирање уређења (енгл. *order encoding*) и логаритамско кодирање (енгл. *log encoding*). Описују се и проблеми задовољивости сродни проблему *SAT*: проблем задовољивости у теорији (*SMT*), проблем псеудо-Булове задовољивости (*PB*), проблем максималне задовољивости (*MaxSAT*), даје се опис решавача за ове проблеме и даје се опис неких свођења проблема *CSP* на њих.

Након општег прегледа постојећих проблема, решавача и техника, описује се допринос кандидата дат у виду описа неколико нових кодирања проблема *CSP* на проблем *SAT*. Након тога описује се систем *meSAT* који имплементира различите технике свођења *CSP* на *SAT* и описује се његова експериментална евалуација на веома широком корпусу формула. На крају главе, даје се тумачење добијених експерименталних резултата кроз анализу предности и мана различитих кодирања.

3. Коришћење портфолио система у решавању проблема *CSP*.

У овој глави уводи се појам алгоритамског портфолија чији је циљ да за дату инстанцу проблема који се решава одабере најефикаснији алгоритам између неколико расположивих. Описују се технике машинског учења (регресија и класификација) које се користе за изградњу портфолија. Укратко се описују линеарна регресија, метод *k*-најближих суседа (енгл. *k-nearest neighbors*, *k-NN*), метода подржавајућих вектора (енгл. *support vector machine*, *SVM*), метода случајних шума (енгл. *random forests*) и вештачке неуронске мреже (енгл. *artificial neural networks*). Након тога описује се неколико постојећих портфолио система за решавање проблема *SAT* (*SATZilla*, *ArgoSmArT*, *ISAC*, *EISAC*, *3S*, приступ Малицког и коаутора итд.) и за решавање проблема *CSP* (*CPHydra*, *SUNNY*, *Proteus*).

Поново након прегледа постојећих техника кандидат описује своје доприносе. Дефинише се *CSP* портфолио *ArgoCSP-kNN* заснован на методи *k*-најближих суседа и његова употреба у оквиру система *meSAT*. Врши се његова експериментална евалуација и поређење са другим *CSP* портфолијима. Посебан нагласак ставља се на могућност веома кратког времена тренинга овог портфолија, уз задржавање квалитета његових резултата.

4. Примене *CSP* решавача.

У овој глави приказују се две оригиналне примене *CSP* решавача. Прва је примена на решавање проблема распоређивања контролора летења и његово решавање. Даје се неколико различитих математичких модела овог проблема и врши се њихова експериментална евалуација. Посебно се врши анализа техника тражења оптималне вредности и комбиновање егзактних алгоритама *CSP* решавања са алгоритмом локалне претраге. Друга примена *CSP* решавача која је анализирана је примена на генерисање и решавање великих загонетки судоку.

5. Закључци и даљи рад.

У овој глави кандидат резимира основне закључке своје тезе и даје смернице за даљи рад.

4 Анализа рукописа и оригиналних доприноса

У склопу тезе, кандидат је дао одличан преглед области *CSP* решавања са посебним нагласком на технике решавања проблема *CSP* свођењем на проблем *SAT* као и технике унапређења *CSP* решавања аутоматским избором погодних алгоритама (тзв. портфолио приступ). Ово указује на способност кандидата да систематизује и прикаже знање из једне истраживачке области. Поред тога, рукопис доноси неколико оригиналних научних резултата:

Развијен је систем *meSAT* (енгл. *multiple encodings to SAT*), карактеристичан по томе што подржава различите технике кодирања проблема *CSP* приликом свођења на проблем *SAT*. Постоји више система који користе једно (или евентуално два) кодирања за свођење на *SAT*, што није довољно за практичну употребљивост на широком дијапазону проблема и стога је у пракси потребно испробати више различитих система у решавању неког проблема. Пожељно је имати јединствен систем који омогућава избор између већег броја кодирања и *meSAT* је први такав систем. Још један циљ развоја оваквог система је могућност непристрасне евалуације различитих техника свођења на *SAT*.

Развијена су хибридна кодирања која користе добре стране већ постојећих, основних кодирања. Систем *meSAT* на тај начин подржава 4 основна и 2 хибридна кодирања, а поред тога и свођење на 2 проблема блиска проблему *SAT*: проблем *SMT* (енгл. *Satisfiability Modulo Theories*) и проблем *PB* (енгл. *Pseudo-Boolean*).

Урађена је теоријска анализа различитих кодирања. Дат је и доказ коректности кодирања уређења који недостаје у литератури. Такође, на примеру неких конкретних проблема дато је објашњење перформанси које различита кодирања постижу у контексту механизма и алгоритама решавања добијеног проблема *SAT*.

Урађена је експериментална евалуација на великом корпусу инстанци и са значајним бројем решавача. Извршено је поређење различитих техника машинског учења у одабиру *CSP* решавача. Развијен је, имплементиран и тестиран портфолио приступ *ArgoCSP-kNN* заснован на алгоритму *k*-најближих суседа који је дао најбоље резултате међу коришћеним техникама машинског учења. *ArgoCSP-kNN* је упоредив са најбољим постојећим портфолио приступима и даје добре резултате како у избору кодирања развијених у оквиру система *meSAT*, тако и у избору решавача. Направљена је и процена утицаја дужине тренирања на квалитет одабира решавача, а приступ *ArgoCSP-kNN* са кратким временом тренирања (неколико сати или дана) је конкурентан постојећим приступима који користе значајно дуже тренирање (обично неколико месеци).

Решаван је један практичан проблем, Проблем распоређивања контролора лета (енгл. *Air Traffic Controller Shift Scheduling Problem, ATCoSSP*). Ручно распоређивање контролора лета у смене може представљати врло тежак задатак јер је потребно распоредити контролоре на одговарајуће позиције у току смена да би у сваком тренутку на свакој позицији био довољан број контролора. Свако од запослених има и жеље у вези са распоредом – потребно је

задовољити што је већи број жеља – па је ово врста оптимизационог проблема. Представљена су три модела проблема. Проблем је решаван помоћу великог броја метода и решавача, као и хибридикацијом свођења на SAT и локалне претраге да би се распоређивање извршило што ефикасније. Генерисане инстанце проблема *ATCoSSP* коришћене су на званичним такмичењима решавача. Размотрен је и проблем решавања и генерисања великих судоку загонетки (већих од 9×9). Постојеће свођење на SAT које до сада није детаљно тестирано је упоређено са другим методама за решавање великих загонетки. Увођењем врло једноставних правила препроцесирања брзина генерисања се додатно побољшава. Унапређен је постојећи алгоритам за генерисање великих судоку загонетки.

Из рада на овој тези проистекли су следећи радови (један у часопису *Constraints* категорије M22, на *SCI* листи, који је водећи часопис у области програмирања ограничења, један у домаћем часопису и један на водећој светској конференцији *Conference on Principles and Practice of Constraint Programming* за област програмирања ограничења).

1. Mirko Stojadinović, Filip Marić. *meSAT: Multiple Encodings of CSP to SAT*, *Constraints*, 19(4), 2014. ISSN: 1572-9354, doi: 10.1007/s10601-014-9165-7, impakt faktor: 1.257.
2. Mirko Stojadinović. *Generisanje i rešavanje velikih Sudoku zagonetki svođenjem na SAT problem*. *InfoM*, 14(54), 2015. ISSN: 1451-4397.
3. Mirko Stojadinović. *Air Traffic Controller Shift Scheduling by Reduction to CSP, SAT and SAT-related Problems*, The 20th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming, CP 2014. ISBN: 978-3-319-10428-7, doi: 10.1007/978-3-319-10428-7_63.

Рад *Instance-based selection of CSP solvers using Short Training* је прошао процес рецензије и представљен је на међународној радионици *Pragmatics of SAT 2014*. године (аутори Мирко Стојадиновић и Филип Марић).

Као чланови комисије пратили смо писање овог рукописа и током рада и након читања првих верзија дали смо аутору низ сугестија и захтева које је он обрадио и усвојио у завршној верзији рукописа.

5 Закључак

Значај ове тезе огледа се у унапређењу решавања *CSP* проблема техникама свођења на проблем *SAT*. Темелјна експериментална анализа коју је кандидат спровео на корпусу од неколико десетина јавно доступних проблема *CSP* показује да, пре свега захваљујући напретку у решавању проблема *SAT*, свођење проблема *CSP* на проблем *SAT* у великом броју проблема надмашује класичне приступе решавању *CSP* проблема. С обзиром на то да различитим проблемима погодују различите технике решавања, веома пожељно је имати систем који подржава различита кодирања и различите *SAT* решаваче и даје могућност аутоматског одабира најпогодније технике, што је и имплементирано у оквиру система *meSAT*. Применом систем *meSAT* на решавање два *CSP* проблема (од чега је проблем распоређивања контролора лета директно преузет из праксе) показано је да се резултати тезе могу директно применити на реалне проблеме.

Својим радом на рукопису „Решавање проблема CSP техникама свођења на проблем SAT“, на имплементацији система *meSAT* и на примени техника CSP решавања на решавање практичних проблема (пре свега на генерисању распореда контролора летења за аеродром у Вршцу) кандидат Мирко Стојадиновић је показао висок степен истраживачке зрелости и могућност како самосталног, тако и тимског рада на решавању како теоријских, тако и практичних проблема из области аутоматског резоновања.

Делови тезе досада су објављени у четири рада, од којих је један у часопису са SCI листе, један у домаћем часопису и два на специјализованим међународним конференцијама.

На основу свега наведеног, како су испуњени и сви формални услови, предлажемо да се рукопис:

“Решавање проблема CSP техникама свођења на проблем SAT”

Мирка Стојадиновића

прихвати као докторска дисертација из рачунарства и да се закаже његова јавна одбрана.

У Београду,

18. 8. 2016.

Комисија:

ванр. проф. Математичког факултета Универзитета у Београду,
др Филип Марић, ментор

ред. проф. Математичког факултета Универзитета у Београду,
др Предраг Јаничић

ванр. проф. Математичког факултета Универзитета у Београду,
др Ненад Митић

доцент Математичког факултета Универзитета у Београду,
др Младен Николић

ред. проф. Факултета организационих наука Универзитета у Београду,
др Мирко Вујошевић