

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2
BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
MŰSZAKI TUDOMÁNYOK – INFORMATIKAI TUDOMÁNYSZAK

FUTÁSI UTAK VISSZAVETÍTÉSE
FEJLETT KERESÉSI ÉS NYOMONKÖVETHETŐSÉGI TECHNIKÁKKAL

PHD TÉZISFÜZET

HEGEDÜS ÁBEL
OKL. MÉRNÖK-INFORMATIKUS

TÉMAVEZETŐ:
DR. VARRÓ DÁNIEL, DSc
EGYETEMI DOCENS

BUDAPEST, 2014

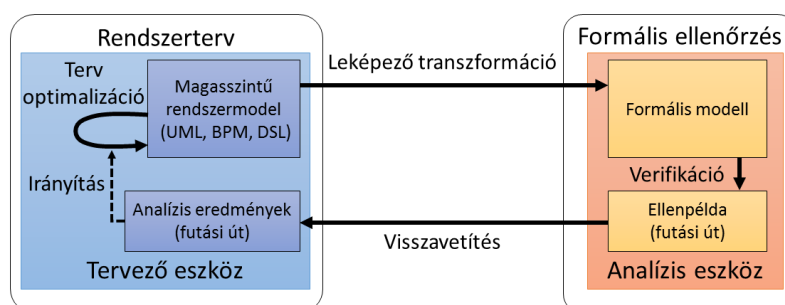
1. A kutatás előzményei

Az informatika fejlődésével együtt a szoftverrendszer összetettségének szintje is egyre növekszik. E rendszerek fejlesztéséhez sok szakértő összehangolt munkájára van szükség gyakran évekig tartó projektek keretében. A rendszerek fejlesztéséhez gyakran alkalmaznak jól megalapozott projekt menedzsment és szoftverfejlesztési módszertanokat, amelyek biztosítják, hogy minden fejlesztési fázist (pl. követelmény specifikáció, rendszertervezés, megvalósítás, integráció, tesztelés, dokumentáció, karbantartás) a megfelelő részletességgel, a szükséges bemenetekkel és kimenetekkel hajtsanak végre. A rendszer verifikációját nagyon drága lehet a fejlesztés késői fázisaira hagyni, hiszen a korai szakaszokban vétett hibák javításának a költsége (időben és erőforrásokban) hatalmas, mivel egy hiba azt követő fázisokra is hatással van. Ezért célszerű a funkcionális és nem-funkcionális követelmények ellenőrzését már a tervezés korai fázisában elvégezni, hogy a rendszerben előforduló tervezési hibákat megtaláljuk. Míg a funkcionális követelmények meghatározzák a rendszer és komponenseinek viselkedését, a nem-funkcionális követelmények a rendszer minőségére vonatkozó kitételeket adnak, pl. biztonság, skálázhatóság, karbantarthatóság vagy használhatóság.

E rendszerek fejlesztése során egyre elterjedtebbé válnak a modellek, mint a fejlesztés központi elemei [BG05], melyek felhasználhatóak a rendszer ellenőrzésére is. Modellekkel ábrázolhatjuk a rendszer szoftver vagy hardver architektúráját (pl. UML [Obj11c], SysML [Obj10] vagy AADL [SAE09]), a külső vagy belső viselkedést (pl. UML állapotterképek, BPMN [Obj11a], BPEL [OAS07]) vagy az egyes komponensek megbízhatóságát vagy teljesítményét (pl. MARTE [Obj11b]). Továbbá, egyes iparágakban egyre gyakoribb a szakterülethez tartozó modellezési nyelvek megjelenése, mint az AUTOSAR [AUT12] az autóiparban vagy az integrált moduláris avionika (IMA) [Pri92] a repülőgépiparban.

1.1. Viselkedési modellek formális analízise

A rendszer tervezési hibáinak korai felkutatása céljából a magasszintű szakterület-specifikus rendszermodellek formális modellekre képezhetők automatikus modelltranszformációk alkalmazásával a modell-alapú analízis során [Bon+01] (lásd 1. ábra). Ezek a formális modellek képezik azon analízis eszközök bemenetét, amelyekkel a rendszer követelmények verifikációja elvégezhető. Az analízis eredménye pedig lehet egy olyan futási utat leíró ellenpélda, amely nem kívánatos állapotba vezet.



1. ábra. Modell-alapú analízis [Bon+01]

A rendszermérnökök gyakran nem rendelkeznek a formális modellek létrehozásához és elemzéséhez szükséges képességekkel és tapasztalatokkal. A modell-alapú analízisben az elméleti, matematikai részleteket hatékonyan el lehet rejteni, így a mérnökök használhatják az általuk jól ismert magasszintű modelleket a rendszer tervezésére.

A *rejtett formális módszerek* célja, hogy automatikus modelltranszformációk által elfedje az absztrakt formális modelleket az azok használatában járatlan szakterületi szakértők elől, aki így képes analízis módszereket használni azok részletes ismerete nélkül [TSR03]. Ehhez elengedhetetlen a formális ellenőrzés eredményeinek *visszavetítése* a tervezőeszközbe, hogy a tervező az általa ismert eszköz *felhasználásával* végezhesse el a rendszermodell javítását vagy *optimalizációját*.

A viselkedésleíró modellezési nyelveknek, amelyekkel a tervezett rendszer viselkedésének részleteit lehet rögzíteni, különleges szerepe van, mert a dinamikus viselkedés helyességének garantálása különösen nehéz. A diszkrét eseményeken alapuló viselkedési modellekben a rendszert különböző *állapotok* (pillanatképek) mentén értékelik ki. A rendszer fejlődése *lépések* diszkrét sorozatán keresztül valósul meg, amely egy *futási utat* képez.

A magasszintű tervezési nyelvekhez hasonlóan az analízis során használt formális modellekből is sokféle létezik. A formális nyelveket sokszor adott tulajdonságú rendszerek modellezésére vagy kifejezetten egy adott ellenőrzés típusra alakították ki (pl. Petri hálók vagy címkézett tranzíciós rendszerek az elosztott rendszerek modellezésére vagy folyamat algebrák a kommunikációs protokollok verifikálására). A rendszer elvárt dinamikus viselkedésére vonatkozó tulajdonságok ellenőrzésére használt leggyakoribb formális analízis technikák a következők: (1) *statikus analízis*, amely szimbolikus végrehajtással értékeli ki a rendszert [Aye+08], (2) a *tételbizonyítás* egy kezdeti axiómakészletből kiindulva a modellen értelmezett levezetési szabályok használatával bizonyítja a tulajdonságokat [HS96], (3) a *modellellenőrzés* egy kezdeti állapotból indulva deríti fel a rendszer által elérhető összes állapotot és megvizsgálja, hogy a tulajdonság teljesül-e az összes lehetséges állapotban és futási úton [Cla97], végül (4) a *szimuláció* szintén egy kezdeti állapotból indul, de csak az elérhető állapotok egy részét járja be és azt ellenőrzi, hogy a szimuláció által érintett futási utakon teljesül-e a vizsgált tulajdonság [BCN10; Van08].

A rendszermodell optimalizációjához gyakran használnak keresés-alapú megközelítésekre a különböző rendszertulajdonságok optimálishoz közeli konfigurációjának megtalálásához. A *tervezési tér felderítés* (design-space exploration, DSE) egy olyan folyamat, amely képes „funkcionálisan megegyező” megvalósítási alternatívákat kiértékelni, melyek mind kielégítik a *tervezési kényszereket*. A cél a különféle minőségi metrikák (például költség vagy megbízhatóság) szempontjából legalkalmasabb tervezési választások (*megoldások*) azonosítása. A tervezési tér felderítés gyakran jelenik meg kihívásként olyan alkalmazásterületeken, mint a megbízható beágyazott rendszerek [Moh+02; RLF08; Mee+11] és informatikai rendszermenedzsment, ahol a modellvezérelt tervezési technikák már népszerűek. Továbbá, a moduláris szoftver és hardver architektúrával rendelkező rendszerekben (például az AUTOSAR [AUT12]) előfordulnak összetett, strukturális kényszerek és az elemek dinamikus létrehozása és törlése.

1.2. Modell-alapú ellenőrzés kihívásai.

A tervezési modellekből analízis modellek előállítására széles körben alkalmaznak automatikus transzformációkat, majd az analízis modelleken validációt, verifikációt, minőségi vagy mennyiségi analízist végeznek. Bár számos olyan megközelítés létezik, amely képes ellenőrizhető modellek generálására, ezen megközelítések gyakran nem adnak megoldást az analízis eredményének automatikus feldolgozására és ezért képtelenek az eredményeket az analízist végző felé intuitívan, a tervezési modell szintjén ábrázolni. Ez a visszafelé irányú transzformáció, amelyet *visszavetítésnek* is hívnak, nem-triviális és további kihívásként jelenik meg a legtöbb ellenőrzési technikában.

A tervezési és ellenőrzési modellek közötti összerendeléshez tartozó információk tárolása szorosan kapcsolódik a visszavetítés problémájához. A *nyomonkövethetőség* egy általános követelmény a szoftvertervezésben, különösen a kritikus beágyazott rendszerek esetén. A modell-alapú tervezés több részproblémájában is szükség van nyomonkövethetőségi információkra az

automatikus végrehajtáshoz vagy a felhasználói interakció segítéséhez. Ezen részproblémák közé tartoznak az összetett transzformációk, a rendszer viselkedésére vonatkozó követelmények leképezés az ellenőrzési modellekre és a visszavetítés is.

Futási utak visszavetítése. Az előrefelé irányuló, szakterületi modellekből formális modelleket előállító **leképező transzformáció** (lásd 1. ábra) során a bemeneti rendszermodellből származtatják ugyanannak a rendszernek a formális leírását analízis nyelvek felhasználásával. Mivel a szakterületi és formális modellek dinamikus szemantikája jelentősen eltérhet, ezért a transzformációnak gyakran komoly *szemantikus rést* kell áthidalni a tervezési modell és az analízis modell között.

Szigorúan az ellenőrzés nézőpontjából nézve, a rejtett formális analízis célja annak meghatározása, hogy a modell teljesíti-e a rendszerrel szemben támasztott követelményeket. Azonban a tervezői szempontból nem csak az a fontos, hogy az ellenőrzés információval szolgáljon arról, hogy a modell helyes-e vagy nem (igen/nem válasz). Szükség van azoknak a futási utaknak a megtalálására, amelyek tartalmazzák a lépések sorozatát, amik alapján erre a konklúzióra jutotunk. Ezért a modellellenőrzési és a szimulációs technikák eredményei általában egy futási utat szolgáltatnak, amely vagy megsért egy adott tulajdonságot (**ellenpélda**) vagy eleget tesz neki (pl. egy sikeresen befejezett szimulációs végrehajtás).

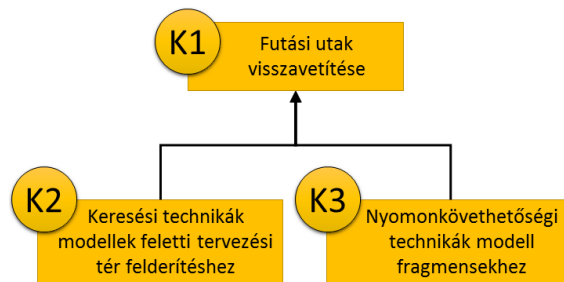
Az ellenőrző eszközök által szolgáltatott futási utak gyakran nagyon bonyolultak (akár több száz lépésből is állhatnak) és még az analízis nyelv és a vizsgált rendszer szakértői ismerete mellett is nehezen érthetőek. Ezért fontos, hogy az analízis eredményeit megjelenítsük egy olyan formalizmusban amelyet a tervező is ismer. A **visszavetítés** az analízis eredmények visszafelé irányú transzformációja a formális modellből a tervezői modellekbe. Egyes konkrét nyelvpárok esetén alkalmazták már többek közt tulajdonság modellekre [CW07], UML objektum modellekre [SAB09], üzenet szekvencia diagramokra [Kov+09], biztonsági és teljesítmény modellekre [Buc+05], webszolgáltatásokra [Fos+07] és beágyazott rendszerekre [CCS11], azonban általános vizsgálatára még nem került sor.

A futási utak formális modellekből a tervezési modellekbe való visszavetítéséhez szükség van a viselkedés rögzítéséhez a tervezési modell futási útjának származtatásával a formális modell futási útja alapján (lásd 1. ábra). A visszavetítés problémája számos kihívást tartogat [16], még akkor is ha rendelkezésre áll további információ, pl. a leképező transzformáció definíciója vagy a két modell elemei közötti nyomonkövethetőségi kapcsolatok (i.e. mely formális modell elem jelképezi a szakterületi modell egy adott részét). Ezeknek a kihívásoknak a többségét a szakterületi és formális modellek közötti szemantikai rés okozza. Továbbá minél „szelesebb” a szemantikai rés, annál nehezebb az visszavetítésben a kihívásokat legyőzni.

2. Kutatási kérdések és kihívások

A kutatásaimat az a gyakorlati kihívás motiválta, hogy modellellenőrzésből származó verifikációs eredményeket automatikusan vissza lehessen vetíteni magasszintű tervezési modellekbe.

Miközben a már létező módszereket kiértékeltem és saját, *futási út visszavetítési* (K1) megközelitésem fejlesztésével foglalkoztam, a 2. ábra ábrán látható további két, szorosan kapcsolódó kutatási kihívást is azonosítottam. A visszavetítési problémák megoldása során előfordul, hogy szükség van *keresési technikákra* (K2), amelyek modellekkel leírható alternatívák tervezési terén alkalmazhatóak. Továbbá a tervezési és formális modellek, mint *modell fregmensek közötti nyomonkövethetőség* (K3) kezeléséhez is szükség van hatékony technikákra.



2. ábra. Kutatási kihívások egymásra épülése

1. kihívás: Milyen módszerek adhatók a viselkedési modellek futási útjainak visszavetítésére?

A futási utak visszavetítésére alkalmas módszerek megkülönböztethetők az alapján, hogy a tervezési modellhez használt nyelvnek van-e dinamikus szemantikája.

Az olyan nyelvekhez, amelyeknek a dinamikus szemantikája nincs definiálva, a visszavetítési módszereknek tartalmaznia kell a nyelv lehetséges végrehajtási lépéseinek specifikációját, valamint egy részletes leképezésre van szükség a formális nyelv végrehajtási lépései és a specifikált lépések között. Ezért ezek a módszerek erősen testreszabottak a kiválasztott tervezési és formális nyelv párra és átültetésük egy másik nyelvpárra nehéz lehet. Egy fontos kihívás tehát annak definiálása, hogy egy általánosabb módszert hogyan lehet egy adott nyelvpárra alkalmazni.

Olyan viselkedésleíró modellezési nyelvek esetén, amelyeknek precíz dinamikus szemantikája van, a visszavetítési módszerek kihasználhatják ezt a futási utak számításához, azonban azt is biztosítaniuk kell, hogy az előállított futási út valóban azt a viselkedést ábrázolja, mint a bemenetként használt formális modellhez tartozó futási út. A rendelkezésre álló szemantika azt is jelenti, hogy a visszavetítéskor a lehetséges végrehajtási lépések is kiértékelhetők a futási út feldolgozása közben. Egy jelentős kihívás a hatékony keresés a lehetséges futási utak között a tervezési modellben és annak kiértékelése, hogy a formális modellnek megfelelő dinamikus viselkedést írja-e le.

2. kihívás: Hogyan javítható a tervezési tér felderítés fejlett keresési technikákkal?

A tervezési tér felderítés célja modellalternatívák előállítása és kiértékelése olyan esetekben, ahol ezeknek az alternatíváknak a száma nagy és a lehetséges megoldások (egy részének) szisztematikus és automatikus felsorolására van szükség. Egy viselkedési modellezési nyelv által engedélyezett műveletek például egy tervezési teret feszítenek ki, amely tartalmazza az összes lehetséges futási utat egy kezdeti modelltől, míg a felderítés célja lehet a nyelv összes jólformáltsági kényszerének teljesítése. A lehetséges alternatívák száma (i.e. a tervezési tér mérete) akár végtelen is lehet, azonban a megoldások száma is általában magas (i.e. a megoldási tér sűrű). Ezért előnyös lehet a megoldások felé irányítani a felderítést a módszer hatékonyságának növelése érdekében.

A létező tervezési tér felderítési módszerek gyakran alkalmaznak modellellenőrzést kimerítő állapotter felderítéssel, véges tartományú kényszerkielégítési problémákat oldanak meg vagy cél- és alkalmasságfüggvényeket használó heurisztikákra támaszkodnak. Azonban a modellalternatívák felderítéséhez szükség van olyan fejlett keresési technikákra, amelyek képesek kihasználni, hogy rendelkezésre állnak megengedett modellmanipulációs műveletek, modell-lekérdezések és modell-alapú analízis eszközök által adott sugások.

3. kihívás: Hogyan lehet fejlett nyomonkövethetőségi technikákkal támogatni a modellfregmensek összekötését?

A visszavetítésben, még a legegyszerűbb esetben is, legalább két különböző modell részt vesz, amelyek kapcsolatban vannak egymással, hiszen a formális célmodell egy előre irányú, forrás-cél transzformáció során jön létre a forrásmodellből. Fontos, hogy azonosítani lehessen a tervezési modell azon elemeit, amelyekből a formális modell adott elemeit létrejötték. Ezeket a kapcsolatok modellek közötti nyomonkövethetőségi összeköttetések tárolják és a visszavetítési módszerek lekérdezésekkel dolgozzák fel. Továbbá a komplex modellvezérelt alkalmazások fejlesztése során a tervezők gyakran nagy számú modelleket használnak, valamint modelltranszformációkat és visszavetítést is alkalmazhatnak.

Karbantarthatósági és skálázhatósági okokból a rendszermodelleket gyakran tárolják modellfregmensek összekötött hálózatában, ahol minden fregmens a rendszermodell egy (diszjunkt) részét tárolja. Más alkalmazások esetén teljes modelleket használnak, amelyeket külső nyomonkövethetőségi modellekkel egészítenek ki azért, hogy a követelmény modellek, tervezési modellek, analízis modellek és a forráskód között nyomonkövethetőségi kapcsolatokat külön tárolják. Mindkét esetben gyakori, hogy a modelleket több, különböző fejlesztési vagy verifikációs eszközben módosítják komplex eszközláncokban amelyeket akár eltérő tervezői csoportok is kezelhetnek. Egy fontos kihívás olyan nyomonkövethetőségi technikák biztosítása, amelyek képesek ezeket az eseteket támogatni.

3. Új tudományos eredmények

3.1. Futási utak modellezése, visszajátszása és visszavetítése

A futási utak rögzítik egy rendszer dinamikus viselkedését állapotok és állapotátmenetek sorozatában, amelyeket később fel lehet dolgozni a rendszer helyességének ellenőrzéséhez vagy teljesítményének analíziséhez. A viselkedési modellek használatának elterjedésével a tervezett rendszer működésének leírására, ezért új módszerekre is szükség van ezen rendszerek futási útjainak kezelésére modellvezérelt környezetben. Az 1. kihívás teljesítéséhez kapcsolódó új tudományos eredményeim a következőképp foglalhatók össze:

1. tézis. *Visszavetítési módszereket definiáltam végrehajtási szemantikával rendelkező és anélküli viselkedési modellek futási útjai között. Futási út modelleket és egy általános visszajátszó keretrendszert javasoltam. Továbbá ezeket a módszereket az üzleti folyamatok tervezésébe integráltam a rejtett formális verifikáció támogatásához.*

- 1. Futási utak modell-alapú ábrázolási módja és általános visszajátszása.** *Egy általános futási út modellt és visszajátszási technikát definiáltam [9, 8], amely szakterület-független modelltranszformációs szabályok segítségével hajtja végre a célmodell rögzített dinamikus viselkedését.*
- 2. Operációs szemantikával nem rendelkező viselkedési modellek futási útjainak visszavetítése.** *A viselkedési modellek visszavetítésére javasoltam módszert [16, 23, 9, 1], amely a modellek közötti nyomonkövethetőségi összerendelések segítségével azonosítja az összetartozó elemeket és változásvezérelt transzformációk segítségével származtatja a mérnöki modellek futási útjainak végrehajtási lépéseit.*

3. **Operációs szemantikával rendelkező viselkedési modellek futási útjainak visszavetítése.** Az operációs szemantikával rendelkező viselkedési modellek futási útjainak visszavetítésére javasoltam egy módszert [1]. Amely a (szemantikus) műveletek közötti nyomonkövethetőséget és irányított tervezési tér felderítést felhasználva értékeli ki a tervezési modell lehetséges futási útjait.
4. **Rejtett formális módszerek az üzleti folyamatok verifikációjához.** A leképező modelltranszformációk és visszavetítés integrációjával javasoltam módszert az üzleti folyamatok rejtett formális verifikációjához. A megközelítésben a Petri hálós vagy tranzíciós rendszereken végzett modellellenőrzés verifikációs eredményei a folyamat futási útjaiként ábrázolhatóak [9, 25, 24].

Az üzleti folyamatok modell-alapú verifikációjának tranzíciós rendszerekre való leképezéssel Gönczy László PhD munkájának része, az én kontribúcióm az automatikus visszavetítés támogatása. A visszavetítési módszerek felhasználják a változásvezérelt transzformációk fogalmát [Ber+12b], amelyek részletei Bergmann Gábor [Ber13] és Ráth István [Rát10] PhD munkájának része. Továbbá alkalmazzák a szakterület-specifikus kényszerkielégítési problémák módszereit, amelyek a modellek feletti tervezési tér felderítés alapjául szolgálnak [HV11], ezek Horváth Ákos [Hor13] PhD munkájának részei.

3.2. Irányított tervezési tér felderítés modellek felett

A tervezési tér felderítési módszerek alkalmazásakor a tervezők gyakran szolgáltatnak további adatokat (súgásokat) a rendszerről (pl. korábbi tapasztalatok vagy más vizsgálatok alapján) a szakterület-specifikus információk kihasználása érdekében. Ezzel csökkenthető a tervezési tér mérete vagy legalábbis a felderítés kezdhető a legígéretesebb útvonalakkal [Moh+02]. A tervezési folyamatot gyakran különböző tervezési, analízis és verifikációs eszközökkel egészítik ki, amelyek már a fejlesztés korai szakaszaiban képesek (matematikailag megalapozott) súgásokkal szolgálni a rendszerről. Ezek a súgások további rendszer tulajdonságokat fejezhetnek ki, amelyeket a DSE folyamatba beépítve segíthetik a lehetséges megoldások kiértékelését. A 2. kihívás teljesítéséhez kapcsolódó új tudományos eredményeim a következőképp foglalhatók össze:

2. tézis. Vágási és kiválasztási kritériumokkal irányított tervezési tér felderítési megközelítést definiáltam, amely a rendszer vizsgálatából származó súgások használatával az ígéretes keresési utakat deríti fel először (kiválasztási kritériumok) és azonosítja a kevésbé ígéretes alternatívákat (vágási kritériumok). Továbbá kidolgoztam egy algoritmust, amely a felderítés közben az engedélyezett műveletekhez tartozó függőségi gráfon kiértékeli a kiválasztási és vágási kritériumokat.

1. **Kiválasztási és vágási kritériumok tervezési tér felderítéshez** Azonosítottam a tervezési tér felderítés vezérléséhez használható kiválasztási és vágási kritériumokat [6,22], ahol a kiválasztási kritériumok szolgáltatják a következő végrehajtandó műveletet, míg a vágási kritériumok döntenek arról, ha egy állapotból nem érhető el megoldás.
2. **Függőségi gráf feletti kritérium kiértékelés.** Függőségi gráfot definiáltam a műveletek közötti függőségi kapcsolatok és a műveletek előfordulásának számát meghatározó

vektor kombinációjával. Algoritmust javasoltam, amely a kiválasztási és vágási kritériumok kiértékeléséhez használja sugásként ezt a függőségi gráfot [6,14,22].

3. **Irányított tervezési tér felderítés.** Módszert dolgoztam ki, amely a sugásokon kiértékelt kiválasztási és vágási kritériumok felhasználásával irányítja a tervezési tér felderítés stratégiáját [14,13,21] és kiértékeltem különböző felderítési stratégiák hatékonyságát.
4. **Javítások generálása szakterület-specifikus modellekhez.** Módszert javasoltam a javítási lehetőségek automatikus generálására szakterület-specifikus modellek jólformált-sági kényszerei által jelzett hibákhoz tervezési tér felderítés alkalmazásával [13]. A sugásokat ebben az esetben a hibák és a módosítási műveletek alkalmazhatóságának kiértékelése adja.
5. **Állapotkódolási technikák tervezési tér felderítéshez.** Definiáltam a felderítés által már bejárt állapotok azonosítására használható állapotkódolás kihívásait és állapotkódolási technikákat javasoltam, amelyek jelentősen csökkentik az állapottér méretét [2].

A DSE keretrendszer implementációja az inkrementális mintaillesztési technikákra [Rát+08; Ber+10] épít mind a VIATRA2, mind az EMF-INCQUERY alapú megvalósítás esetében. Ezen technikák Bergmann Gábor [Ber13] PhD munkájának része. Az előfordulási vektor számításához alkalmazott Petri háló alapú absztrakciós technika Varró-Gyapay Szilvia és Varró Dániel [VV06] munkája, míg annak kezdeti alkalmazását a tervezési tér felderítéshez Horváth Ákos végezte [HV11]. Az én kontribúcióm a függőségi gráf definíciója az analízis eredményének felhasználásával.

3.3. Laza összeköttetések a robosztus nyomonkövethetőséghez

A modellfregmenseket és több, komplex tervezőeszközt integráló alkalmazásokban a modellezési és nyomonkövethetőségi technológiák több hiányossága is tapasztalható [Kol+13; Ros+10]. Az egyszerű hivatkozásokkal leírt körkörös nyomonkövethetőségi kapcsolatok gyakran vezetnek sorosításbeli hibákhoz. Továbbá a modellfregmenseken végzett lokális változások inkonzisztens nyomonkövethetőségi kapcsolatokhoz vezethetnek egy fejlett, több erőforrást kezelő tranzakciómenedzsment vagy az összes kapcsolódó fregmens állandó memóriában tartása nélkül. Az inkonzisztens kapcsolatok eszköz-specifikus feloldási módszereket igényelnek, legrosszabb esetben akár a kapcsolatok kézi javítását szöveges szerkesztőkben (és nem a modellező eszközzel). Végül az összes olyan nyomonkövethetőségi kapcsolatot amelyet asszociációkkal rögzítünk külön tárolni kell minden alkalommal, akkor is ha kiszámíthatóak lennének létező azonosítók alapján. A 3. kihívás teljesítéséhez kapcsolódó új tudományos eredményeim a következőképp foglalhatók össze:

3. tézis. Definiáltam a laza összeköttetések fogalmát amelyek modellek közötti kapcsolatokat valósítanak meg modell-lekérdezések inkrementális kiértékelésén alapuló számított referenciákkal. Javasoltam egy módszert a modellfregmensek közötti robosztus nyomonkövethetőség megvalósítására a laza összeköttetések felhasználásával.

1. **Modellelemek lekérdezés-vezérelt laza összeköttetése.** Definiáltam a származtatott értékekkel (vagyis számított attribútumok és referenciák által) ábrázolt és inkrementáli-

san kiértékelte modell-lekérdezések által vezérelt laza összeköttetéseket, amelyek egyszerű kapcsolatokként, átlátszó módon viselkednek [11, 10].

2. **Robosztus nyomonkövethetőség modellfregmensek között.** A laza összeköttetések használó megközelítést javasoltam, amely modellfregmensek közötti nyomonkövethetőségi kapcsolatokat biztosít [10, 3], ahol az összeköttetések még jelentős módosítások esetén is megmaradnak vagy könnyen helyreállíthatóak. Továbbá egy integrált nyomonkövethetőségi keretrendszert definiáltam összetett szakterület-specifikus modellekhez fejlett modell-lekérdezések, laza összeköttetések és strukturális kényszerek folytonos validációnak alkalmazásával.
3. **Laza összeköttetések alkalmazhatóságának kiértékelése.** Megvalósítottam a laza összeköttetéseket EMF modellekhez az EMF-INCQUERY keretrendszer használatával és több esettanulmányon kiértékeltem a teljesítményét és alkalmazhatóságát [3].

4. Új tudományos eredmények alkalmazása

Ebben a fejezetben az értekezésben kialakított módszerek és technikák gyakorlati relevanciáját az eredmények alkalmazásainak felsorolásával mutatom be.

I. eszköz: VIATRA2 tervezési tér felderítési keretrendszer

A 2. tézis eredményeit a VIATRA2 tervezési tér felderítési keretrendszerének (VIATRA2 DSE) továbbfejlesztésére használtam fel, amely egy kiegészítésként érhető el a VIATRA2 keretrendszerhez. Ezek a továbbfejlesztések tartalmazzák azokat az új felderítési stratégiákat, amelyek növelik a bejárás hatékonyságát a rendszeranalízisből származó irányítást felhasználásával. Részbe továbbá a keresési fa kezelésben történt fejlesztések és az állapot kódolási eljárások. Jelenleg is folyik a VIATRA2 DSE keretrendszer átalakítása (lásd 2. tézis) EMF modellek használatához az EMF-INCQUERY rendszerre építve. Ezt a munkát Horváth Ákos kollégámmal, valamint Nagy András Szabolcs és Földényi Miklós MSc hallgatókkal együtt végezzük, akiknek munkájában konzulensként működtem közre.

A VIATRA2 DSE keretrendszert sikeresen alkalmaztam gyors javítások generálására szakterület-specifikus modellezési nyelvekben.

A keretrendszer elérhető a <http://incquery.net/publications/dse> címen.

II. eszköz: EMF-INCQUERY származtatott kapcsolatok

Az EMF-INCQUERY keretrendszer a VIATRA2 inkrementális lekérdezés kiértékelő technikáit alkalmazza EMF környezetben, amely az egyik legelterjedtebb modellezési környezet. Ez az inkrementális kiértékelés adja az alapját azoknak a kiegészítő lehetőségeknek, mint az automatikus validáció, adatkötés, lekérdezés alapú kapcsolatok és modelltranszformáció. Az EMF-INCQUERY keretrendszer fejlesztését Ráth István kollégám vezeti és inkrementális gráfmenta illesztője Bergmann Gábor PhD munkájára épül.

A lekérdezés-alapú kapcsolatokat, amelyek a 3. tézis definiált laza összeköttetések alapjául szolgálnak, az EMF-INCQUERY keretrendszerben valósítottam meg. A <http://incquery.net/incquery/new/examples/query-driven-soft-links> oldal további információkat tartalmaz a lekérdezés-alapú kapcsolatok megvalósításáról.

I. alkalmazás: BPEL folyamatok verifikációja rejtett formális módszerekkel

Az 1. tézis eredményeit egy teljeskörű verifikációs eszközben valósítottam meg, amellyel a BPEL szabvánnyal definiált üzleti folyamatok ellenőrizhetőek. Ezt az eszközt a SENSORIA EU FP6 projekt keretében fejlesztettem ki Gönczy László kollégám segítségével. Az eszközt integráltam az Eclipse keretrendszerbe, így az üzleti folyamatok tervezői végrehajthatják a BPEL folyamatok modellellenőrzését a verifikálandó követelmények kiválasztásával vagy megadásával. Az eszköz a háttérben futtatja a SAL modellellenőrző eszközt és beolvassa annak eredményeit, amely egy ellenpélda abban az esetben ha a követelményt megsérti a modell. Az ellenpéldát automatikusan feldolgozza az általam készített eszköz és lehetővé teszi a tervezőnek, hogy közvetlenül az üzleti folyamat szerkesztőben visszajátsza az animált végrehajtást.

A BPEL folyamatokat SAL rendszerbe leképező transzformációt és az ellenpéldából BPEL végrehajtásba visszeverítést a VIATRA2 keretrendszerben valósítottam meg. A verifikációs eszköz elérhető a csoport VIATRA2 oldalán a <http://viatra.inf.mit.bme.hu/publications/exectraces> címen.

II. alkalmazás: Modellvezérelt allokáció integrált moduláris repülőgép elektronikai rendszerekhez

A 3. tézis eredményeit egy, az Embraer repülőgépgyártó cég és kutatócsoportunk közös kutatási projektjében alkalmaztuk. A projekt célja egy olyan alkalmazás kifejlesztése, amellyel a tervezőmérnökök (i) komponens könyvtárak használatával állíthatnak össze hardver architektúrákat és (ii) allokálhatják a funkcionális architektúra modellben található funkciókat a hardver elemekre. Ezután egy automatikus transzformációval olyan integrált architektúra modellt származtatunk, amelyen környezeti szimulációval vizsgálhatók hardver hibák hatása a rendszer működésére. Ez az összetett alkalmazás több, bonyolult, szakterület-specifikus modell használatával készül, amelyek egymással összeköttetésben állnak. Továbbá az allokációs folyamathoz szükség van fejlett modell-lekérdezésekre, strukturális kényszerek jólformáltság ellenőrzésére és szigorú nyomkövethetőségre az elemek között.

5. Kapcsolódó publikációk

Publikációk száma: 26

Lektorált publikációk száma: 21

Független idézetek száma: 36

Külföldön megjelent, idegen nyelvű folyóiratcikkek

- [1] **Á. Hegedüs**, Á. Horváth, and D. Varró. “Back-annotation of execution sequences of behavioral models”. In: *Systems and Software* (2014). Under review (after major revision)
- [2] **Á. Hegedüs**, Á. Horváth, and D. Varró. “A Model-driven Framework for Guided Design Space Exploration”. In: *Automated Software Engineering* (2014). Submitted after minor revision
- [3] **Á. Hegedüs**, Á. Horváth, I. Ráth, R. R. Starr, and D. Varró. “Query-driven soft traceability links for models”. In: *Software and Systems Modelling* (2014). Under review (after major revision)
- [4] Z. Ujhelyi, **Á. Hegedüs**, G. Bergmann, Á. Horváth, I. Ráth, and D. Varró. “EMF-INCQUERY: An Integrated Development Environment for Live Model Queries”. In: *Science of Computer Programming* (2014). DOI: 10.1016/j.scico.2014.01.004
- [5] E. Jakumeit, S. Buchwald, D. Wagelaar, L. Dan, **Á. Hegedüs**, M. Herrmannsdörfer, T. Horn, E. Kalnina, C. Krause, K. Lano, M. Lepper, L. Rose, S. Wätzoldt, and S. Mazanek. “A Comparison of Transformation Tools Based on the Transformation Tool Contest”. In: *Science of Computer Programming* (2013). DOI: 10.1016/j.scico.2013.10.009
- [6] **Á. Hegedüs**, Á. Horváth, and D. Varró. “Towards Guided Trajectory Exploration of Graph Transformation Systems”. In: *ECEASST 40* (2011). Ed. by T. Margaria, J. Padberg, and G. Taentzer. URL: <http://journal.ub.tu-berlin.de/index.php/eceasst/article/view/583>
- [7] **Á. Hegedüs**, Z. Ujhelyi, I. Ráth, and Á. Horváth. “Visualization of Traceability Models with Domain-specific Layouting”. In: *ECEASST 32* (2010). Ed. by T. Margaria, J. Padberg, and G. Taentzer. URL: <http://journal.ub.tu-berlin.de/index.php/eceasst/article/view/510>

Magyarországon megjelent, idegen nyelvű folyóiratcikk

- [8] **Á. Hegedüs**, I. Ráth, and D. Varró. “Replaying Execution Trace Models for Dynamic Modeling Languages”. In: *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science* 56 (2012). DOI: 10.3311/PPee.7078

Könyvfejezet

- [9] L. Gönczy, **Á. Hegedüs**, and D. Varró. “Methodologies for model-driven development and deployment: an overview”. In: *Rigorous software engineering for service-oriented systems*. Ed. by M. Wirsing and M. Hözl. Vol. 6582. Springer-Verlag, 2011, pp. 541–560. DOI: 10.1007/978-3-642-20401-2_26

Nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent idegen nyelvű előadások

- [10] **Á. Hegedüs**, Á. Horváth, I. Ráth, and D. Varró. “Query-driven soft interconnection of EMF models”. In: *15th ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages & Systems*. Vol. 7590. LNCS. Acceptance rate: 23%. Innsbruck: Springer, 2012. doi: 10.1007/978-3-642-33666-9_10
- [11] I. Ráth, **Á. Hegedüs**, and D. Varró. “Derived Features for EMF by Integrating Advanced Model Queries”. In: *8th European Conference on Modelling Foundations and Applications*. Vol. 7349. LNCS. Acceptance rate: 31%. Kgs. Lyngby: Springer, 2012, pp. 102–117. doi: 10.1007/978-3-642-31491-9_10
- [12] G. Bergmann, **Á. Hegedüs**, Á. Horváth, Z. Ujhelyi, I. Ráth, and D. Varró. “Integrating Efficient Model Queries in State-of-the-art EMF Tools”. In: *50th International Conference on Objects, Models, Components, Patterns (TOOLS Europe)*. LNCS. Acceptance rate: 31%. Prague: Springer, 2012. doi: 10.1007/978-3-642-30561-0_1
- [13] **Á. Hegedüs**, Á. Horváth, I. Ráth, M. C. Branco, and D. Varró. “Quick fix generation for DSMLs”. In: *IEEE Symposium on Visual Languages and Human-Centric Computing, VL/HCC*. Acceptance rate: 33%. IEEE Computer Society, 2011. doi: 10.1109/VLHCC.2011.6070373
- [14] **Á. Hegedüs**, Á. Horváth, I. Ráth, and D. Varró. “A Model-driven Framework for Guided Design Space Exploration”. In: *26th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE)*. ACM Distinguished Paper Award, Acceptance rate: 15%. IEEE Computer Society, 2011, pp. 173–182. doi: 10.1109/ASE.2011.6100051
- [15] G. Bergmann, **Á. Hegedüs**, Á. Horváth, I. Ráth, Z. Ujhelyi, and D. Varró. “Implementing efficient model validation in EMF tools”. In: *26th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE)*. IEEE Computer Society, 2011, pp. 580–583. doi: 10.1109/ASE.2011.6100130
- [16] **Á. Hegedüs**, G. Bergmann, I. Ráth, and D. Varró. “Back-annotation of Simulation Traces with Change-Driven Model Transformations”. In: *8th International Conference on Software Engineering and Formal Methods (SEFM)*. Acceptance rate: 22%. 2010. doi: 10.1109/SEFM.2010.28

Nemzetközi workshop-kiadványba megjelent idegen nyelvű előadás

- [17] B. Izsó, **Á. Hegedüs**, G. Bergmann, Á. Horváth, and I. Ráth. “PN2SC Case Study: An EMF-IncQuery solution”. In: *TTC 2013: Sixth Transformation Tool Contest, Post-Proceedings*. Ed. by P. Van Gorp, L. M. Rose, and C. Krause. Vol. 135. EPTCS. Budapest, Hungary: Open Publishing Association, 2013, pp. 106–114. doi: 10.4204/EPTCS.135.14
- [18] **Á. Hegedüs**, Z. Ujhelyi, and G. Bergmann. “Solving the TTC 2011 Reengineering Case with VIATRA2”. In: *TTC 2011: Fifth Transformation Tool Contest, Post-Proceedings*. Ed. by P. V. Gorp, S. Mazanek, and L. Rose. Vol. 74. EPTCS. Zürich, Switzerland: Open Publishing Association, 2011, pp. 136–148. doi: 10.4204/EPTCS.74.13
- [19] **Á. Hegedüs**, Z. Ujhelyi, and G. Bergmann. “Saying Hello World with VIATRA2 - A Solution to the TTC 2011 Instructive Case”. In: *TTC 2011: Fifth Transformation Tool Contest, Post-Proceedings*. Ed. by P. V. Gorp, S. Mazanek, and L. Rose. Vol. 74. EPTCS. Zürich, Switzerland: Open Publishing Association, 2011, pp. 302–324. doi: 10.4204/EPTCS.74.25

- [20] **Á. Hegedüs**, Z. Ujhelyi, G. Bergmann, and Á. Horváth. “Ecore to Genmodel case study solution using the Viatra2 framework”. In: *Transformation Tool Contest (TTC '10)*. Ed. by P. V. Gorp, S. Mazanek, and A. Rensink. Malaga, Spain, July 2010

Magyar nyelvű konferencia-előadások

- [21] **Á. Hegedüs**. “A Model-driven Framework for Guided Design Space Exploration”. In: *Proceedings of the 19th PhD Minisymposium*. Budapest University of Technology, Economics, Department of Measurement, and Information Systems. Budapest, Jan. 2012
- [22] **Á. Hegedüs**. “Criteria Evaluation-driven State Space Exploration of Graph Transformation Systems”. In: *Proceedings of the 18th PhD Minisymposium*. Budapest University of Technology, Economics, Department of Measurement, and Information Systems. Budapest, 2011, pp. 42–45
- [23] **Á. Hegedüs**. “BPEL Verification: The Back-annotation Problem”. In: *Proceedings of the 17th PhD Minisymposium*. Budapest University of Technology, Economics, Department of Measurement, and Information Systems. 2010, pp. 30–31
- [24] **Á. Hegedüs**. “BPEL2.0 munkafolyamatok formális verifikációja”. In: *Tavaszi Szél Konferenciakiadvány*. 2009

Elektronikus publikációk, technical report

- [25] **Á. Hegedüs**, I. Ráth, and D. Varró. *From BPEL to SAL and Back: a Tool Demo on Back-Annotation with VIATRA2*. Tech. rep. SEFM'2010 "Posters and Tool Demo Session" Track. Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), 2010. URL: <http://puma.isti.cnr.it/linkdoc.php?idauth=1&idcol=1&icode=2010-ED-003&authority=cnr.isti&collection=cnr.isti&lanver=en>
- [26] **Á. Hegedüs**. *A model transformation-based approach for the Dependability analysis of UML-based system designs with maintenance*. Tech. rep. rcl090601. University of Florence, Dip. Sistemi Informatica, RCL group, June 2009. URL: <http://dcl.isti.cnr.it/Documentation/Papers/entry-techRep-rcl090601-229.html>

Köszönetnyilvánítás

Kutatásaimat nagy mértékben támogatta a magyar CERTIMOT (ERC_HU-09-01-2010-0003), az Európai Unió SENSORIA (IST-3-016004), SecureChange (ICT-FET231101), CECRIS (324334) és MONDO (ICT-611125) kutatási projektek, a TÁMOP (4.2.2.B-10/1-2010-0009, 4.2.2.C-11/1/KONV-2012-0001) projekt és egy közös projektünk az Embraerrel. Az eredmények publikációját a Schell László Alapítvány is támogatta.

Hivatkozások

- [AUT12] AUTOSAR Consortium. *The AUTOSAR Standard*. <http://www.autosar.org/>. 2012.
- [Aye+08] N. Ayewah, D. Hovemeyer, J. Morgenthaler, J. Penix, and W. Pugh. “Using Static Analysis to Find Bugs”. In: *Software, IEEE* 25.5 (2008), pp. 22–29. DOI: 10.1109/MS.2008.130.
- [BCN10] J. Banks, J. S. Carson, and B. L. Nelson. *Discrete-event system simulation*. 2010.
- [Ber+10] G. Bergmann, Á. Horváth, I. Ráth, and D. Varró. “Incremental Evaluation of Model Queries over EMF Models”. In: *Proc. of MODELS’10, ACM/IEEE 13th International Conference On Model Driven Engineering Languages And Systems*. 2010.
- [Ber+12b] G. Bergmann, I. Ráth, G. Varró, and D. Varró. “Change-driven Model Transformations: Change (in) the Rule to Rule the Change”. In: *Journal of Software and Systems Modeling* (2012).
- [Ber13] G. Bergmann. “Incremental Model Queries in Model-Driven Design”. PhD dissertation. Budapest University of Technology and Economics, 2013.
- [BG05] S. Beydeda and V. Gruhn. *Model-Driven Software Development*. Springer-Verlag New York, Inc., 2005.
- [Bon+01] A. Bondavalli, M. Dal Cin, D. Latella, I. Majzik, A. Pataricza, and G. Savoia. “Dependability analysis in the early phases of UML-based system design”. In: *Computer Systems Science and Engineering* 16.5 (2001), 265–275.
- [Buc+05] M. Buchholtz, S. Gilmore, V. Haenel, and C. Montangero. “End-to-end integrated security and performance analysis on the DEGAS choreographer platform”. In: *Proceedings of the 2005 international conference on Formal Methods*. LNCS. 2005, pp. 286–301. DOI: 10.1007/11526841_20.
- [Cla97] E. Clarke. “Model checking”. In: *Foundations of Software Technology and Theoretical Computer Science*. Vol. 1346. Lecture Notes in Computer Science. 10.1007/BFb0058022. 1997, pp. 54–56.
- [CW07] K. Czarnecki and A. Wasowski. “Feature Diagrams and Logics: There and Back Again”. In: *Proceedings of the 11th International Software Product Line Conference*. 2007, pp. 23–34. DOI: 10.1109/SPLC.2007.19.
- [CCS11] F. Ciccozzi, A. Cicchetti, and M. Sjodin. “Towards a Round-Trip Support for Model-Driven Engineering of Embedded Systems”. In: *Software Engineering and Advanced Applications (SEAA), 2011 37th EUROMICRO Conference on*. 2011, pp. 200–208. DOI: 10.1109/SEAA.2011.39.
- [Fos+07] H. Foster, S. Uchitel, J. Magee, and J. Kramer. “WS-Engineer: A Model-Based Approach to Engineering Web Service Compositions and Choreography”. In: *Test and Analysis of Web Services*. 2007, pp. 87–119.
- [Hor13] Á. Horváth. “Search-Based Techniques in Model-Driven Engineering”. PhD dissertation. Budapest University of Technology and Economics, 2013.
- [HS96] K. Havelund and N. Shankar. “Experiments in theorem proving and model checking for protocol verification”. In: *FME’96: Industrial Benefit and Advances in Formal Methods*. Vol. 1051. Lecture Notes in Computer Science. 1996, pp. 662–681. DOI: 10.1007/3-540-60973-3_113.

- [HV11] Á. Horváth and D. Varró. “Dynamic constraint satisfaction problems over models”. In: *Software and Systems Modeling* (2011). 10.1007/s10270-010-0185-5.
- [Kol+13] D. S. Kolovos, L. M. Rose, N. Matragkas, R. F. Paige, E. Guerra, J. S. Cuadrado, J. De Lara, I. Ráth, D. Varró, M. Tisi, and J. Cabot. “A Research Roadmap Towards Achieving Scalability in Model Driven Engineering”. In: *Proceedings of the Workshop on Scalability in Model Driven Engineering*. BigMDE '13. 2013, 2:1–2:10. DOI: 10.1145/2487766.2487768.
- [Kov+09] T. Kovše, B. Vlaovič, A. Vreže, and Z. Brezočnik. “Spin Trail to Message Sequence Chart Conversion Tool”. In: *Telecommunications, 2009. ConTEL 2009. 10th International Conference on*. 2009, pp. 125–129.
- [Mee+11] I. Meedeniya, B. Buhnova, A. Aleti, and L. Grunske. “Reliability-driven deployment optimization for embedded systems”. In: *Journal of Systems and Software* 84.5 (2011), pp. 835–846.
- [Moh+02] S. Mohanty, V. K. Prasanna, S. Neema, and J. Davis. “Rapid design space exploration of heterogeneous embedded systems using symbolic search and multi-granular simulation”. In: *SIGPLAN Not.* 37 (7 2002), pp. 18–27.
- [OAS07] OASIS. *Web Services Business Process Execution Language Version 2.0 (OASIS Standard)*. “<http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/wsbpel-v2.0.html>”. 2007.
- [Obj10] Object Management Group. *OMG System Modeling Language (SysML)*. <http://www.omg.org/spec/SysML/index.htm>. 2010.
- [Obj11a] Object Management Group. *Business Process Model And Notation (BPMN)*. <http://www.omg.org/spec/BPMN/index.htm>. 2011.
- [Obj11b] Object Management Group. *UML Profile For MARTE: Modeling And Analysis Of Real-Time Embedded Systems*. <http://www.omg.org/spec/MARTE/index.htm>. 2011.
- [Obj11c] Object Management Group. *Unified Modeling Language (UML)*. <http://www.omg.org/spec/UML/index.htm>. 2011.
- [Pri92] P. Prisaznuk. “Integrated modular avionics”. In: *Aerospace and Electronics Conference, 1992. NAECON 1992., Proceedings of the IEEE 1992 National*. 1992, 39–45 vol.1. DOI: 10.1109/NAECON.1992.220669.
- [Rát+08] I. Ráth, G. Bergmann, A. Ökrös, and D. Varró. “Live Model Transformations Driven by Incremental Pattern Matching”. In: *Theory and Practice of Model Transformations*. Vol. 5063/2008. LNCS. 2008, pp. 107–121. DOI: 10.1007/978-3-540-69927-9_8.
- [Rát10] I. Ráth. “Event-driven Model Transformations in Domain-Specific Modeling Languages”. PhD thesis. Budapest University of Technology, Economics, Department of Measurement, and Information Systems, 2010.
- [RLF08] B. Ristau, T. Limberg, and G. Fettweis. “A mapping framework for guided design space exploration of heterogeneous MP-SoCs”. In: *Design, Automation and Test in Europe, 2008. DATE '08*. 2008, pp. 780–783. DOI: 10.1109/DATE.2008.4484910.
- [Ros+10] L. Rose, D. Kolovos, N. Drivalos, J. Williams, R. Paige, F. Polack, and K. Fernandes. “Concordance: A Framework for Managing Model Integrity”. In: *Modelling Foundations and Applications*. Vol. 6138. LNCS. 10.1007/978-3-642-13595-8_20. 2010, pp. 245–260.

- [SAB09] S. M. A. Shah, K. Anastakis, and B. Bordbar. “From UML to Alloy and back again”. In: *MoDeVva '09: Proceedings of the 6th International Workshop on Model-Driven Engineering, Verification and Validation*. 2009, pp. 1–10.
- [SAE09] SAE International. *Architecture Analysis & Design Language (AADL)*. <http://standards.sae.org/as5506a/>. 2009.
- [TSR03] A. Tiwari, N. Shankar, and J. Rushby. “Invisible formal methods for embedded control systems”. In: *Proceedings of the IEEE 91.1 (2003)*. Ed. by S. Sastry, J. Sztipanovits, R. Bajcsy, and H. Gill, pp. 29–39.
- [Van08] H. Vangheluwe. “Foundations of Modelling and Simulation of Complex Systems”. In: *ECEASST 10 (2008)*.
- [VV06] S. Varró-Gyapay and D. Varró. “Optimization in Graph Transformation Systems Using Petri Net Based Techniques”. In: *ECEASST 2 (2006)*. Ed. by P. Baldan, H. Ehrig, J. Padberg, and G. Rozenberg. Proc. of PNGT '06.