

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
MÉRÉSTECHNIKA ÉS INFORMÁCIÓS RENDSZEREK TANSZÉK

**INKREMENTÁLIS MODELL-LEKÉRDEZÉSEK
A MODELLVEZÉRELT TERVEZÉSBEN**

PHD TÉZISFÜZET

BERGMANN GÁBOR

OKL. MÉRNÖK-INFORMATIKUS

TÉMAVEZETŐ:

DR. VARRÓ DÁNIEL, DSc

DOCENS

BUDAPEST, 2013. JÚLIUS

1. Modellvezérelt tervezés

1.1. A modellvezérelt tervezés paradigmája

A *modellvezérelt tervezés* (Model-driven Engineering, MDE) egyre inkább előtérbe kerül a szoftver- és rendszertervezés bizonyos területein (elsősorban ahol a hibák emberi sérüléssel vagy különösen nagy anyagi kárral járhatnak), mivel csökkentett fejlesztési idő mellett emeli a termék minőségét (ld. [HWR13]). Az MDE szerint a mérnöki folyamat legnagyobb része különböző absztrakciós szintű *modellek* készítésével, analízisével és más modellekből való származtatásával zajlik. Ezen modellek különféle *modellezési nyelvek*hez igazodnak.

A modellezés a megvalósítandó rendszerrel szemben támasztott *követelmények* rögzítésével indulhat. A követelmények ismeretében a *rendszerterv* elkészítése magas szintű, absztrakt modellalkotással kezdődik, majd finomítási lépések sorozata után tervezői döntésekkel és megvalósítási elemekkel gazdagított modellek készülnek el. Ezeket közben folyamatosan ellenőrzéseknek lehet alávetni, hogy a hibákat minél hamarabb azonosítani lehessen.

Az Object Management Group által gondozott Model Driven Architecture (MDA [OMG01]) ajánlás egy az MDE alapú megközelítések közül, amelyet a következő sajátosságok jellemeznek. Mivel sok *fejlesztendő rendszerre* igaz, hogy a tervezés után különféle technológiák szerinti célplatformokon kell megvalósítani, ezért ilyen esetekben egy *platformfüggetlen modellt* (Platform-independent Model, PIM) készíthető, amely minden fontos alkalmazás-specifikus működési elvet és megvalósítási paramétert tartalmaz, de a technológiai részletek még nincsenek kifejtve benne. Ezek után a PIM technológiától függetlenül több különböző *platformspecifikus modellre* (Platform-specific Model, PSM) leképezhető, melyek alapján a szoftverkomponenseket ténylegesen megvalósító programmodulok már (részben automatikusan) előállíthatóak. [OMG01]

A modell fogalma elég tág, bizonyos szakterületeken differenciálegyenleteket vagy térbeli elrendezéseket is tartalmazhat. A szoftvertervezésben alkalmazott modellek azonban címkézett gráf jellegűek, és tipikusan ritka gráfok (tehát az élek száma körülbelül a csúcsok számával arányosan nő, nem négyzetesen). Egy-egy modellezési nyelv csomópontjainak és éleinek címkéit (pl. csomópont típusa és egyéb attribútumok), továbbá ezek összekapcsolódási lehetőségeit a *metamodel* adja meg. Fontos megjegyezni, hogy ez a gráf jelleg a modell elvont struktúráját jellemzi (tehát *absztrakt szintaxis*); a modell felhasználóbarát vizuális megjelenése (*konkrét szintaxis*) ettől függetlenül lehet diagram, szöveges, vagy bármilyen egyéb jellegű.

Léteznek általános célúnak szánt, kiterjeszthető formalizmusok modellek reprezentálására (pl. UML [OMG10b], SysML [OMG10a]), ám a gyakorlat egyre inkább a szakterületi igényekhez és a konkrét munkafolyamatokhoz igazított *szakterület-specifikus modellezési nyelvek* (Domain Specific Modeling Language, DSML) alkalmazását részesíti előnyben. Egy-egy DSML és a hozzá tartozó eszköztámogatás fejlesztése azonban költséges és nagy szakértelmet megkövetelő feladat; ezért léteznek ún. DSM technológiák, amelyek ezt a folyamatot könnyítik meg. De facto szabványnak tekinthető napjaink egyik vezető DSM technológiája, az Eclipse [ECLb] platformra épülő *Eclipse Modeling Framework* (EMF, [EMF]). Az EMF lehetővé teszi metamodellek definiálását (az *Ecore* formalizmus szerint), amelyből a modellező eszköz számos komponense automatikusan

generálható. Számos generatív és generikus technológia segíti az EMF alapú DSML eszköztámogatásának előállítását; nyelvtan definiálásával szöveges, grafikus elemkészlettel grafikus konkrét szintaxis definiálható, míg szöveges sablonokkal kódgenerátor illeszthető a modellezési nyelvhez.

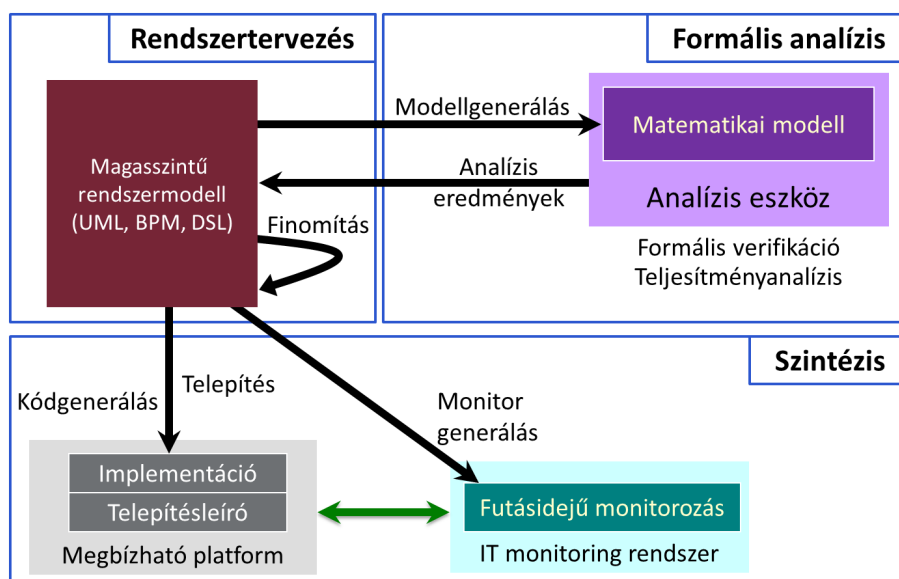
1.2. Modelltranszformáció és modell-lekérdezések

Az MDE során számos lépés részben vagy egészben automatizálható; ez a *modelltranszformáció* (Model Transformation, MT). Először a PSM modellekből az adott célplatformra történő *kódgenerálás* - pontosabban modell-szöveg transzformáció (Model to Text Transformation, M2T) - került széleskörű alkalmazásra. A programkód mellett telepítésleíró, dokumentáció, vagy tesztkészlet is szintetizálható. Emellett egyre nagyobb a jelentősége a modell-modell transzformációnak (Model to Model Transformation, M2M). Egy felhasználási példája az MDA által előírt PIM-PSM leképezések automatizált támogatása, amely platform-specifikus tudást épít bele a modellbe. További transzformációs fajta az egyazon rendszert különböző szakterületek szakértői számára másként, más formalizmussal mutató modellek közötti szinkronizáció. Végezetül egyfajta speciális modelltranszformációként is felfogható a *modellvalidáció* vagy hibaellenőrzés, ahol kényszerfeltételek sérülési helyeit állítjuk elő a modellből.

A modelltranszformációs program tetszőleges általános célú programozási nyelven és eszköztárral megvalósítható. Azonban léteznek MT-k fejlesztésére specializált platformok is. Alapvetően háromféle segítséget várhatunk egy MT rendszertől: (i) egyrészt a forrásmodell feldolgozásában, deklaratív lekérdezésében támogathatja a transzformáció fejlesztőjét, (ii) másrészt magának a célmodell elemeinek az előállítását egyszerűsítheti le, (iii) végül a transzformáció vezérlési szerkezetét is biztosíthatja, beleértve az állapot- és visszakövethetőségi információ kezelését.

Ezen szolgáltatások közül munkám fókuszja elsősorban a *deklaratív modell-lekérdezések* vizsgálata. Fontos szerep jut a lekérdezéseknek a kódgenerálás, analízis céljára vagy egyéb okból végzett M2M transzformáció, a viselkedésmodellek *szimulációja*, az *állapottér-bejárás*, a *jelentésgenerálás*, stb. során. Az egyik legfontosabb alkalmazás a DSM területéről a nyelvhez tartozó *jólformáltsági kényszerek* automatikus ellenőrzése. Például az AUTOSAR [AUT] szabvány több száz ilyen kényszert definiál. A DSM keretrendszerek lehetőséget biztosíthatnak arra, hogy általános célú programozási nyelv helyett egy kifejezetten a célra kialakított *lekérdezőnyelven* fogalmazzuk meg a lekérdezéseket, amelyeket *lekérdezőmotorok* értékelnek ki.

Egyéb felhasználások mellett a modelltranszformációk deklaratív, szabály alapú specifikációját is lehetővé teszi a *gráfújraírás* avagy *gráftranszformáció* (Graph Transformation, GT [EEKR99, BV06]) formalizmusa, amely a modell manipulációját gráftranszformációs szabályokkal írja le. A GT alapeleme a *gráfminta*, amely egy deklaratív lekérdezés: a gráfmodell bizonyos részeit azonosítja a struktúra és egyéb feltételek alapján. A két gráfmintával megadott *gráftranszformációs szabályok* azt a lépést írják le, mely során az LHS mintára illeszkedő gráfrészletet az RHS minta képével helyettesítjük. A fenti szempontok szerint a GT formalizmus tehát a forrásmodell feldolgozását és a célmodell manipulációját is deklaratívan támogatja; ezen felül a GT-vel specifikált modelltranszformáció bizonyos egyszerű esetekben nem igényel külön vezérlési szerkezetet. Az értekezésem témájához a gráfminta formalizmus és a deklaratív modell-lekérdezés kap-



1. ábra. Példa modelltranszformációkra az MDE során ([Pat06] alapján)

csolódik szorosan.

A szinkronizáció speciális részfeladata esetén a transzformációk még magasabb szintű specifikációját teszi lehetővé a *Triple Graph Grammar* (TGG, [KW07]) és a QVT [OMG08] formalizmus. Közülük a TGG a GT-n alapul, és a TGG szabály közvetlenül lefordítható GT szabályokká. Ezeken a nyelveken az egyszerűbb szinkronizációs leképezések rendkívül tömören specifikálhatóak, például egyetlen TGG szabály azonnal értelmezhető kétirányú, inkrementális (ld. alszakasz 1.3) szinkronizációként.

Az MT fent említett sokféle MDE-beli szerepét és alkalmazási területét az 1. ábra illusztrálja.

1.3. Inkrementális, élő és változásvezérelt modelltranszformáció

Egy valós mérnöki folyamatban a modellek általában nem statikusan léteznek, hanem változásokon esnek át; ennek megfelelően a modell analízisét újra ki kell értékelni, és a belőle származtatott egyéb modellekre is áterjedhet a változás. A dinamizmus oka lehet az eredeti követelmények megváltozása (akár évekkel az elkészült rendszer üzembe helyezése után), de rövidebb távon akár az agilis, iteratív módszertanok szerinti újabb és újabb változatok elkészülte, vagy egyszerűen a hibaellenőrzés által feltárt problémák elhárítása is. Tulajdonképpen a modell tényleges szerkesztése is apróbb, elemi módosítási lépések sorozatából áll; ez is felfogható egy modell folyamatos változásának, amely közben bizonyos hibaellenőrzéseknél célszerű volna menet közben is azonnali visszajelzést adni.

Ha a (nagy méretű) modellt minden apróbb változtatása után újra fel kell dolgozni, az komoly teljesítményproblémához vezethet. Ennél kedvezőbb az *inkrementális* kiértékelési mód [HLR06], amely figyelembe veszi a modell változó jellegét. Az inkrementális lekérdezések bizonyos felhasználási esetekben (pl. jólformáltsági kényszerek ellenőrzése) drasztikus teljesítménybeli előnyökkel járnak [11][ISR⁺13].

A *forrásinkrementalitás* a transzformációnak az a tulajdonsága, hogy a forrásmodell megváltozott részeit dolgozza csak fel újra. Az értekezésem egyik legfontosabb témája a változó modellekkel szembeni lekérdezések hatékony kiértékelése, tehát a forrásinkrementalitás biztosítása.

A *célinkrementalitás* ezzel szemben azt jelenti, hogy a korábbi célmodellnek csupán a szükséges részeit változtatja meg a transzformáció, nem kell feltétlenül egy teljesen új célmodellt létrehozni. Ez utóbbi tulajdonságnak nem csak a közvetlen teljesítményjavítás miatt előnyös, hanem a célmodell egyéb modellekkel való kapcsolatait, külső hivatkozásait se kell teljes egészében újra előállítani. Ha pedig a célmodell a forrásmodelltől eltérő származású információt (pl. platformspecifikus tervezői döntéseket a PIM-ből leképzett PSM-ben) is tartalmaz, akkor a célinkrementalitás hiánya információvesztéssel járna.

A hagyományos MT megközelítésben a forrás- és célmodell közötti szinkron a transzformáció újrafuttatásával állítható helyre (forrás- ill. célinkrementalitás esetén hatékonyan). Az *élő transzformáció* (Live Model Transformation [HLR06]) azonban folyamatosan aktív, és eseményekre (a forrásmodell változásaira) azonnal reagálva mindig szinkronban tartja vele a célmodellt. Ebben az esetben erősen célszerű forrás- és célinkrementalitást biztosítani.

Végezetül itt érdemes megemlíteni a *változásvezérelt transzformáció* [RVV09] fogalmát. A változásvezérelt transzformációnak már a specifikációja is a forrásmodell változásait dolgozza fel, és a célmodell változásait állítja elő. Ilyen értelemben jelen esetben nyilván elengedhetetlen a forrás- és célinkrementalitás megléte. Változásvezérelten specifikált transzformáció futtatható élő transzformációként is, ám korántsem ez az egyetlen alkalmazási helyzet. Változásvezérelt transzformációk olyan körülmények közt is alkalmazhatóak, amikor az M2M leképezés forrás- és célmodellje egyáltalán nem létezik egy helyen, és csupán a változási információik átadásával kommunikálnak egymással.

1.4. Példák alkalmazási területre

1.4.1. Biztonsági követelmények modellezése

Egy komplex rendszert tipikusan egynél több *érdekelte fél* (stakeholder) igényei szerint kell kialakítani. A *követelménymodellek* (pl. az UML [OMG10b] vagy SysML [OMG12b] szabványban, ill. a KAOS [LL04] szerint) abban segítenek, hogy a tervezők képet kapjanak a különféle érdekeltek igényeiről, *követelményeiről*.

A *biztonság* (security) olyan tervezési szempont, amely a rosszindulatú személyek által okozható károk elkerülésével foglalkozik, beleértve az információs vagyont érő károkat (adatbiztonság). Nem összekeverendő a *biztonságosság* (safety) fogalmával, amelynek a magyar szakirodalomban gyakran szintén „biztonság” a fordítása. A biztonságosság esetén elsősorban az emberi sérülés, másodsorban a fizikai berendezésekben esett nagy anyagi kár elkerülése a cél, és rosszindulatú szándéktól mentes okok éppolyan fontosak. Az értekezésem érinteni fogja a biztonsági modellezés néhány kérdését.

A *biztonság követelménymodellezés* [M⁺02, NNY10] olyan követelménymodelleket készít, amelyek az érdekeltek biztonsági igényeit is rögzítik. Ennek megfelelően például a Si* [MMZ07] modellezési nyelvben ábrázolható az érdekeltek közti bizalmi viszony, valamint a felelősség és az engedélyek továbbadása is. Kapcsolódó tématerület a *kockázatmodellezés* [LSS⁺11], amellyel a rendszert érő potenciális károk súlyosságát, az őket

lehetővé tévő sérülékenységeket, valamint az ezeket kihasználó támadók jellegét és felépítésük valószínűségét lehet felmérni.

Modell-lekérdezések és -transzformációk alkalmazásával lehetőség nyílik a biztonságikövetelmény-modellek konzisztenciaanalízisére, ill. a rendszertervezés későbbi fázisai számára automatizált megoldások biztosítására.

1.4.2. Autóipari beágyazott rendszerfejlesztés

Mivel a gépjárművek fedélzeti elektronikájával szemben magasak a biztonsági követelmények, a gépjárműiparban komoly haszna van az aprólékos, szigorú szoftver- és rendszerfejlesztési módszertanoknak, így a modellvezérelt technikák alkalmazásának is. A modellek megfelelő elemzése a tervezési hibák korai felderítését teszi lehetővé, ami a hatékonyságra erős pozitív hatással van. Mivel a különféle gyártók szoftver- és hardver-moduljai nagy változatosságot mutatnak, integrációjuk a tervezési modellek és a megvalósítás szintjén egyaránt kihívásokat tartogat.

Az AUTOSAR (Automotive Open System Architecture, [AUT]) egy nyílt és szabványosított autóipari szoftverarchitektúra, amelyet gépjárműgyártók, beszállítók és eszközfajlesztők közösen gondoznak. Az AUTOSAR társulás céljai közé tartozik az alapvető rendszerfunkciók megvalósítása és szabványosítása, miközben a nagymértékben testre szabható platform innovatív funkciók közti versenyre sarkall. A közös szabvány rendelkezése, hogy a különféle beszállítók funkcionális moduljainak integrációját támogassa, és lehetővé tegye az eltérő jármű- és platformvariánsok felé történő skálázódást; készen állva a közeljövő technológiáira, és a költséghatékonyság minőségbeli kompromisszumok nélküli javítására.

2. Kihívások és válaszok

2.1. Modell-lekérdezések felhasználási esetei

Ugyan a modelltranszformációk deklaratív specifikációját és végrehajtását jelentős önálló kutatási területnek tekinthetjük (ld. például International Conference on Model Transformations [ICM13] konferenciasorozatot), a hozzá szükséges deklaratív modell-lekérdezési alaptermészetnek is érdemes figyelmet szentelni. A modell-lekérdezések használati esetei közé tartoznak többek közt:

Deklaratív M2M és M2T transzformációk. A modelltranszformációk az MDE munkafolyamat termékei között hidakat képeznek, ld. 1. ábra. A transzformációk specifikációjára gyakran alkalmaznak szabály alapú deklaratív formalizmusokat. Ennek során lekérdezések határozzák meg, hogy a transzformáció egyes szabályai mikor és hol alkalmazhatóak; a lekérdezés kiértékelése pedig ebben az esetben a forrásmodell feldolgozását, és a szabály alapján a célmodellbe leképzendő részeinek azonosítását jelenti.

Viselkedésmodellek szimulációja szabályokkal definiált szemantika szerint.

A modellszimuláció rendszerállapotok reprezentálását jelenti, és állapotváltozások (tranzíciók, evolúciós útvonalak) alkalmazását új rendszerállapotok

elérésére, ahogy a viselkedésmo­dell előírja. Ilyen szimulációra épít számos dinamikus analízis technika, többek közt a modellellenőrzés [JRG12], tervezésiter-felderítés [HV10], vagy a tipikus viselkedés jellemzése a trajektóriák sztochasztikus szimulációjával [3]. Ezen technikákat egy tervezett rendszer verifikációjára, tulajdonságainak felmérésére lehet használni, és/vagy biztonságos és hatékony rendszerek tervezésére. Az állapotátmeneti szabályok előfeltételei ismét lényegében lekérdezések, amelyek a modell bármely állapotában azonosítják az alkalmazható állapotátmeneteket.

Modellek statikus analízise és jelentésgenerálás. Sokféle statikus analízist lehet egy modell-lekérdezés formalizmus segítségével deklaratívan megfogalmazni, például összesített statisztikák gyűjtését, elemek közti összefüggések feltárását, vagy éppen tervezési szabályok validálását a jólformáltsági kényszerek és modellezési konvenciók megsértéseinek megkeresésével. Lekérdezések segítségével ezen analízis technikák közvetlen visszacsatolást biztosíthatnak a mérnökök számára.

2.2. Kihívások

A mérnöki gyakorlatban a modellek gyakran változásoknak vannak kitéve, ami számos kihívással jár a mérnöki folyamattal és különösen a modelltranszformációkkal kapcsolatban, a változási kérések jóváhagyási folyamatának szervezeti kérdéseitől kezdve a változások modellek közti terjesztéséig vagy migrációjáig (ld. az 1.3. alszakaszt). A disszertáció egyetlen átfogó, magas szintű kihívásra koncentrálna: **változó modellek feletti modell-lekérdezések.**

Ezen kihívás megoldása különféle módokon támogathatja a mérnöki folyamatban, a modell-lekérdezések említett használati esetei mentén. A forrásinkrementalitás a lekérdezések teljesítményének gyökeres javulását válthat ki a M2M transzformáció, szimuláció és statikus analízis folyamán. Ez bizonyos esetekben a mennyiségi és minőségi változást is jelenthet. Például a statikus verifikáció eredményének azonnali visszacsatolása produktív interaktív folyamattá teheti a modellezést. Végezetül, a lekérdezőnyelvet változásvezérelt formalizmussá kiterjesztve a változásterjesztő transzformációk specifikációja és a modell-evolúció analízise egyszerűbbé válhat.

Ezen magas szintű kihívás természetes velejárói a következő aspektusok:

Nyelv.. Az első kihívás olyan lekérdezőnyelvet találni, amely:

- megfelelő kifejezőerejű, hogy leírhatóak legyenek modellelemek komplex viszonyai, mint a gazdag strukturális kapcsolatok, attribútum-feltételek, kvantorok, aggregáció és tranzitív elérhetőség;
- kellően tömör, hogy időpazarlás nélkül, egyszerűen lehessen komplex viszonyokat kifejezni;
- kompozicionális, hogy támogassa a top-down vagy bottom-up gondolkodásmódot és az újrafelhasználást;
- intuitívan érthető a modellszerkezettel való közvetlen kapcsolata révén;
- képes a modell verziói közti változásra is feltételeket szabni a modellverziók struktúráján túl, hogy támogassa a változásvezérelt transzformáció-specifikációt;

- deklaratív, hogy különféle kiértékelési stratégiákat támogasson.

Kiértékelési módszer. A második kihívás a deklaratív lekérdezőnyelvhöz olyan kiértékelési stratégiát találni, amely

- forrás-inkrementális;
- végrehajtási idő és memóriefoglalás szempontjából hatékony;
- képes a modern szimmetrikus multiprocesszorok párhuzamos számítási kapacitását felhasználni;
- megfelelően támogatja a lekérdezőnyelv elemeit.

Adaptáció technológiai platformhoz. A végső kihívás a nyelvi fogalmak és a kiértékelő motor megvalósítása ipari relevanciával bíró technológiai kontextusban, amely:

- elsősorban az Eclipse Modeling Framework (EMF);
- másodsorban relációs adatbázisok, különösen in-memory megvalósítással;
- miközben változásvezérelt transzformációk esetén a modell-evolúció minden alkalmazási helyzete előfordulhat.

2.3. A disszertáció tudományos eredményei

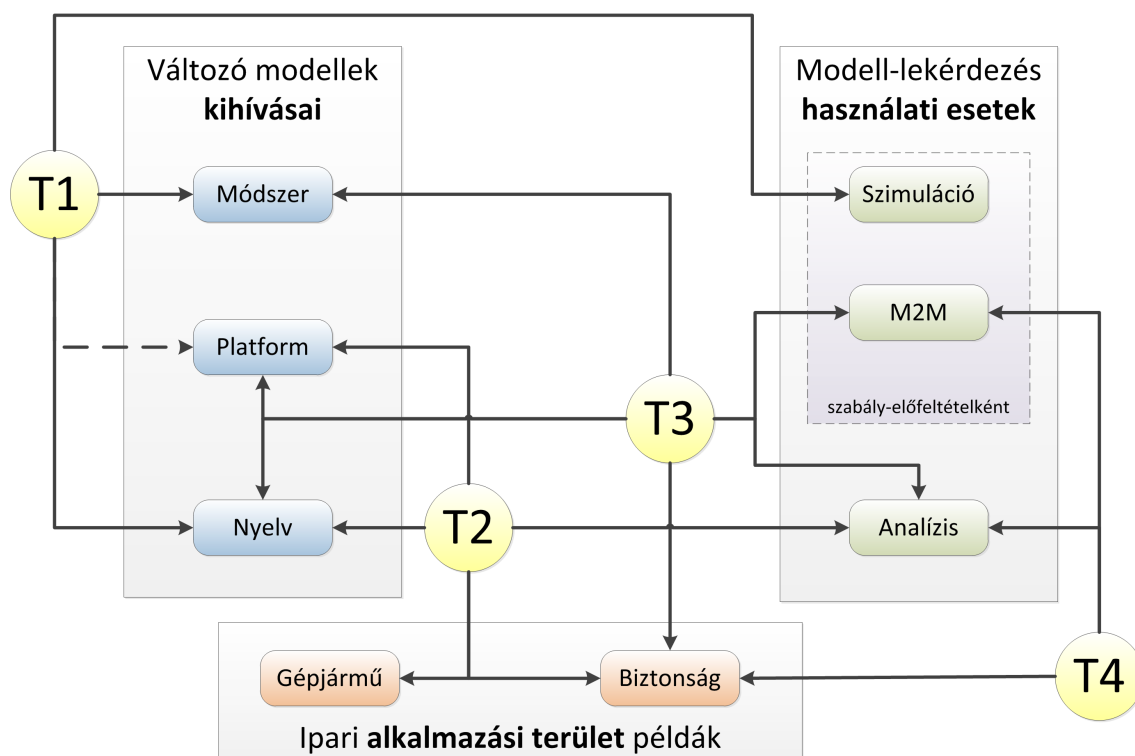
A modell-lekérdezések jelenlegi technológiai színvonalához képest a disszertációm a következő eredményeket tartalmazza:

- Javasolok egy inkrementális kiértékelési stratégiát gráfmintaként megadott modell-lekérdezésekhez, és demonstrálok a hatékonyságát. (1. tézis)
- Egy futásidejű fordítási réteggel és a lekérdezési szintaxis adaptálásával az ipari Eclipse Modeling Framework-höz integrálok ezt a stratégiát, és az így kapott megoldás teljesítményét kiértékelem. (2. tézis)
- A változásvezérelt transzformációk támogatására a változások alkalmazási helyzettől független, transzparens kifejezhetőségével kiterjesztem a lekérdező formalizmust, és az egyes alkalmazási helyzetekhez specifikus végrehajtási stratégiákat tervezek. (3. tézis)
- A fenti technikák alkalmazásával kétirányú modellszinkronizációt, változásanalízist és konzisztencia-ellenőrzést vezetek be a biztonsági követelménymodellezés szakterületén. (4. tézis)

Ezen téziseket az általuk megválaszolt kihívásokkal, valamint az eredményeket demonstráló alkalmazási területekkel és használati esetekkel tünteti fel a 2. ábra.

3. Új tudományos eredmények

Az alábbiakban összefoglalom a PhD értekezésem új tudományos eredményeit. Az alábbi eredmények mindegyike a 2.3. alszakaszban megfogalmazott tézisek egyikének fele meg.



2. ábra. Tézisek (T1-4), kihívások, használati esetek és alkalmazási területek

3.1. Hatékony, inkrementális gráfmintaillesztés alkalmazása modellvezérelt környezetben

Nagyméretű modellek transzformációja esetén kritikus tényező lehet a végrehajtás költsége. Az egyik lehetőség a futási idő javítására az inkrementális technikák alkalmazása. Modelltranszformációknál többnyire nem megoldott a forrásinkrementalitás, az inkrementális gráftranszformáció alapú megközelítések pedig kutatásaim kezdetén még igen korai fázisban [BGT91, VVS06] voltak.

Tézis 1 Szakértői rendszerekből ismert inkrementális algoritmusokat adaptáltam gráfmintaillesztés megvalósítására, nagyméretű és változó modellek fölött. A megközelítés hatékonyságát különféle alkalmazási területeken mérésekkel igazoltam.

- 1. Rete algoritmus adaptálása inkrementális gráfmintaillesztésre.** Bevezettem egy általános fogalmi rendszert az inkrementális mintaillesztés szemantikájának és algoritmikus komplexitásának leírására. Ebben a kontextusban formalizáltam a szabály alapú szakértői rendszerek területéről ismert Rete [For82] algoritmust. Megvalósítottam az algoritmust a modellalapú környezetben alkalmazott gráfminták feletti működéssel. [23]
- 2. Párhuzamos inkrementális mintaillesztés.** Párhuzamos végrehajtási módszereket javasoltam inkrementális mintaillesztéshez. Azonosítottam három mód-

szert inkrementális mintaillesztéssel dolgozó transzformációk párhuzamosítására: a mintaillesztés (pontosabban az inkrementális frissítés) és a manipuláció konkurrens végrehajtását, majd ezen két folyamat egymástól független többszűlűsítését. [26,4]

3. **Inkrementális gráfmintaillesztés kiegészítése tranzitív lezárással.** Javasoltam egy hatékony módszert a gráfélek és bináris gráfminták generikus tranzitív lezárással kiegészített gráfmenta-formalizmus inkrementális kiértékelésére. [8]
4. **Inkrementális gráfmintaillesztés adaptációja relációs adatbázisok felett.** Javasoltam egy inkrementális módszert, amely adatbázisba perzisztált modellek felett valósít meg gráfmintaillesztést, a már meglévő adatmanipulációs programokkal kompatibilis módon. Kidolgoztam egy leképezést, amely a TRE-AT [ML91] inkrementális algoritmusnak megfelelően működő eseményvezérelt SQL programot generál a gráfmenta definíciójából. [7]
5. **Az inkrementális gráfmintaillesztés kvantitatív analízise.** Modelltranszformációs benchmarkok megoldásával igazoltam az általam javasolt inkrementális gráfmintaillesztési stratégia hatékonyságát. Azonosítottam olyan körülményeket (pl. DSML szimuláció, élő M2M szinkronizáció), amikor a hagyományos keresés alapú megközelítésekkel szemben előnyös az alkalmazása [16,4,14,2].

Ráth István és Horváth Ákos kollégám több kutatása felhasználja a VIATRA2 keretrendszer inkrementális mintaillesztőjét. Ilyen kutatási irány például a szimuláció alapú analízis DSML-ekhez [RVV08], a modell alapú tervezési kényszerfeltételek kielégítése a megoldási tér bejárásával [HV09, HV10], vagy a sztochasztikus gráftranszformáció [3][THR10, KHTR10]. Én magam szenzorhálózatok méretezéséhez használtam fel [13].

Az inkrementális mintaillesztés kulcsgondolata témavezetőm Varró Dániel DSc értekezésének része. A kutatáshoz használt prototípus implementációt a VIATRA2 [VIA] modelltranszformációs eszköz mintaillesztő moduljaként készítettem el. A kutatásaim elindítását nagy mértékben segítette Varró Gergely konzulensi segítsége. A mérések kidolgozása, összeállítása Ráth Istvánnal és Horváth Ákossal közösen történt, a különböző mintaillesztési technikák ötvözése pedig Horváth Ákos PhD téziseinek része. A generikus tranzitív lezárt számítás megvalósítását és kísérleti kiértékelését Szabó Tamás MSc diákom végezte a szakmai felügyeletem alatt. A relációs adatbázis feletti kísérleteket, beleértve a prototípus implementáció elkészítését, Horváth Dóra MSc diákom végezte a szakmai felügyeletem alatt.

3.2. Inkrementális modell-lekérdezések ipari EMF modellek felett

Az MDE során gyakran van szükség modellek lekérdezésére, például hibaellenőrzés céljából, vagy forrásmodellként felhasználni egy modelltranszformációban. Céлом, hogy

ezeket a lekérdezéseket deklaratív, magas szintű nyelven is meg lehessen fogalmazni, valamint hogy hatékonyan ki lehessen értékelni őket.

Az iparban használt modellezési technológiákban a lekérdezések megfogalmazására több elterjedt nyelv is létezik (pl. OCL [OMG12a]), de ezekkel nem könnyű több objektum komplex összekötetési rendszerét reprezentálni, ami elengedhetetlen bonyolultabb jólformáltsági kényszerek kifejezéséhez. Ezen felül az ezekhez a nyelvekhez tartozó lekérdezés-kiértékelők többnyire nem inkrementálisak, és a kivételek túlnyomóan akadémiai eszközök. Így az ipari platformok, köztük az EMF, lekérdezési lehetőségeit lényegesen kiterjesztené egy olyan gráfminta alapú nyelv, amelyhez elérhető hatékony inkrementális kiértékelés.

Tézis 2 *javasoltam egy deklaratív, nagy kifejezőerejű lekérdezőnyelvet az ipari gyakorlatban elterjedt EMF modellek feletti lekérdezések specifikálására. Adaptáltam egy inkrementális algoritmust a lekérdezések hatékony végrehajtására. A megközelítés hatékonyságát mérésekkel igazoltam.*

- 1. Gráfminta alapú lekérdezőnyelv EMF modellek számára.** *Javasoltam egy gráfminta alapú nyelvet EMF modellek feletti modell-lekérdezésekre. A szintaxis a VIATRA2 modelltranszformációs rendszer gráfmintanyelvén [BV06] alapul, kiegészítve azt útvonal kifejezésekkel és egyéb új elemekkel, valamint hozzáigazítva az EMF modellreprezentáció sajátosságaihoz. [10]*
- 2. Inkrementális kiértékelés EMF lekérdezések számára.** *Integráltam a Rete algoritmust az EMF modellek kontextusába, és elkészítettem egy fordítást, amely az EMF értesítések alapján képes a Rete inkrementális frissítésre [11,9,28,29,24].*
- 3. EMF feletti lekérdezőrendszerek teljesítményelemzése.** *Autóipari eredetű modellvalidációs feladatok alapján igazoltam a javasolt lekérdezőnyelv kifejezőerejét és az inkrementális kiértékelés hatékonyságát. [11]*

Az eredményeimen alapuló EMF-INCQUERY technológia több nyilvános tutorialon is bemutatásra került [28,29], amelyek jelentős érdeklődést váltottak ki az akadémiai és ipari célközönségben. Ezen prezentációk Ráth István, Horváth Ákos, Hegedüs Ábel és egyéb kollégáimmal közös munkában készültek el.

A definiált lekérdezőnyelv a VTCL [BV06] nyelven alapul, valamint annak szerzőin kívül Ráth István és Ujhelyi Zoltán ötleteit is tartalmazza, és azóta további kutatás alapját adja (pl. [17]). A prototípus implementációt az EMF-INCQUERY [11] eszközebe építettem be, amely nem jöhetett volna létre ugyanezen közreműködők és Horváth Ákos nélkül. A két tutorialt a jelzett fejlesztőcsapat együtt dolgozta ki. Az autóipari esettanulmány és kísérlet ipari szerzőtársainkkal (Balogh András, Balogh Zoltán, Ökrös András) közös munka. A közös erőfeszítések eredményeként az EMF-INCQUERY immár az Eclipse Alapítvány [ECLB] Modeling projektjének hivatalos része.

3.3. Változásvezérelt transzformációk támogatása lekérdezésekkel

A folyamatosan változó modellek kezelését (beleértve az M2M vagy M2T transzformációkat) nagymértékben megkönnyíti, ha változásvezérelt reakciókat lehet specifikálni. Egyes modellezési technológiák (pl. VPM, EMF) értesítéseket biztosítanak az elemi modellváltozásokról, ez azonban önmagában nem elég komplexebb változások megfelelő detektálására. Ahhoz nem elég egy-egy elemi változásra alapozni a döntést, hanem sorban megváltoztatott elemek összességét és a környezetüket is figyelembe kell venni. Eredményeim a változásvezérelt transzformációk korábban bevezetett [RVV09] fogalmához biztosítanak ilyen megoldásokat.

További kihívást jelent, hogy több különböző alkalmazási helyzetben lehet szükség a változások detektálására. Az egyik ilyen helyzet az élő transzformáció (mint [15]), ahol egy állandóan készenlétben álló transzformáció a modellektől kapott változási értesítések alapján azonnal reagál. Egészen máshogy kell azonban a változásokat feldolgozni, ha élő transzformáció nem alkalmazható.

Tézis 3 *A gráfminták formalizmusának kiterjesztésével új nyelvet terveztem modellek strukturális változásainak magas szintű, környezetérzékeny detektálására. A modellről ill. a változásáról rendelkezésre álló információk köre alapján megkülönböztetett különféle alkalmazási helyzetekhez egy-egy algoritmust javasoltam a változási minták formális szemantikájának megfelelő kiértékelésre.*

1. **Változásvezérelt transzformációk kategorizálása.** *Taxonómiát javasoltam a változásvezérelt transzformációk alkalmazási helyzeteinek megkülönböztetésére, a modellekről és a változásokról rendelkezésre álló információk (pl. különbség, változás-értesítés, archív verzió) alapján. [1]*
2. **Nyelv változási minták definiálására.** *Kidolgoztam egy gráfminta alapú változásvezérelt transzformációs nyelvet, amellyel a modellt ért változások lekérdezése magas szinten, az alkalmazási helyzettől független formában fejezhető ki. [25,27,1]*
3. **Változási minták formális szemantikája.** *Formálisan definiáltam a változási minta illeszkedéshalmazát, egy modell változásának a kontextusában. [1]*
4. **Változásvezérelt transzformációk mintaillesztési algoritmusai** *Stratégiákat terveztem a változási minták formális szemantika szerinti kiértékelésére. Az azonosított alkalmazási helyzetekhez egy-egy stratégia tartozik, amely az adott alkalmazási helyzetben rendelkezésre álló tudás alapján hatékonyan állítja elő a változási minták illeszkedéshalmazát. [15,1]*

A kidolgozott eredményeket Hegedüs Ábel hasznosította a szimulációs eredmények visszavetítéséhez [12]. A munkám a Ráth István doktori tézisében ismertetett változásvezérelt transzformáció koncepciót [RVV09] terjeszti ki.

3.4. Lekérdezések és transzformációk a biztonsági követelmények modellezésében

A korszerű követelménymodellezésben előfordulhat, hogy a követelmények egynél több formalizmusban kerülnek rögzítésre. Ráadásul a biztonsági szakterületen alkalmazott munkafolyamatokban a követelménymodell összefüggésben áll más modellekkel. A biztonsági szakértők hosszú és költséges eljárással győződnek meg arról, hogy a követelményekben nincsenek biztonsági hiányosságok, és az így felhalmozott érvrendszert csak informális modellekben lehet rögzíteni. Az egyszerűbb biztonsági problémák automatikus detektálása nem támogatott, a követelménymodell megváltozása esetén pedig a szakértőknek - újabb költséges eljárással - az összes érvet felül kell vizsgálniuk. Nem volt ismert olyan eszköz, amely ezeknek a kihívásoknak megfelelné.

Tézis 4 *Modell-lekérdezések és változásvezérelt technikák együttes alkalmazásával integrált támogatást dolgoztam ki biztonsági követelmények analíziséhez.*

1. **Biztonsági követelményeket leíró modellek közötti kétirányú változásvezérelt szinkronizáció** *Változásvezérelt, élő transzformációk alkalmazását javasoltam a biztonsági követelmények analízis folyamatának támogatására. Kidolgoztam egy megvalósítási architektúrát, amelyben egy központi (SeCMER [MMP⁺ 11] formalizmus szerinti) követelménymodell kétirányú szinkronizációs viszonyban áll egy másfajta követelmény-formalizmussal (Si* [MMZ07]). [19]*
2. **Biztonsági kritériumok folyamatos ellenőrzése változó követelménymodellek felett.** *A biztonsági követelménymodellek automatizált analízisét javasoltam, egyszerűbb biztonsági kritériumok ellenőrzésére és az őket esetlegesen megsértő elemek azonosítására. Az ellenőrzendő kritériumok megfogalmazására gráfminta alapú lekérdezéseket alkalmaztam. Kidolgoztam egy megvalósítási architektúrát, amelyben inkrementálisan kiértékelt lekérdezések alapján folyamatosan karbantartott hibajelzések tájékoztatják a követelménymodellezőt. [19]*
3. **Biztonsági követelmények változásainak hatásanalízise informális érvrendszerek felett.** *Az informális érvelési modellekben használt elemi tényállítások és a követelménymodell elemei között visszakövethetőségi kapcsolatok nyilvántartását javasoltam. Kidolgoztam egy változásvezérelt transzformáción alapuló módszert, amely a követelménymodell változásai alapján azonosítja az érvelési modell potenciálisan érvénytelenné váló elemeit, szakértői felülvizsgálat céljából. [19]*

A munkát a SecureChange [EU 12] kutatási projekt követelménymodellezéssel foglalkozó munkacsoportjában végeztem, Fabio Massacci, Federica Paci, Thein Tun és Yijun Yu kollégáimmal és témavezetőmmel szoros együttműködésben. A fent közölt eredmények a saját újításaimat takarják. A javasolt új technikákat a SecureChange projekt SEC-MER biztonsági követelménymodellező eszközprototípusa alkalmazta.

4. Új tudományos eredmények alkalmazhatósága

Végezetül az értekezésben kifejtendő új elméleti eredmények gyakorlati alkalmazásait mutatom be.

4.1. A VIATRA2 modelltranszformációs keretrendszer inkrementális mintaillesztő modulja

A VIATRA2 egy általános célú gráftranszformációs keretrendszer, mely része az Eclipse [ECLb] alapítvány modellezési projektjének [ECLa] és közel tíz éves múltra tekint vissza Méréstechnikai és Információs Rendszerek Tanszéken. Az 1. tézis elméleti eredményeire épül az aktuális VIATRA2 keretrendszer inkrementális gráfmintaillesztő modulja.

Magát a VIATRA2 keretrendszert több nemzetközi kutatási projektben is alkalmaztuk különböző eszközintegrációs feladatokban (DECOS FP6, DIANA FP6 [6], MOGENTES FP7, SecureChange FP7 [EU 12] EU projektek), modell validációs célokra (HIDENETS FP6 EU projekt), forráskód szintézisre (SENSORIA FP6 [5], E-Freight FP7 EU projektek), valamint viselkedésmoделl-szimulációra (szenzorhálózatok vizsgálata [13] a francia-magyar TÉT projektben). A VIATRA2 rendszeresen szerepel a transzformációs rendszerek közötti versenyeken is [34,35], az inkrementális mintaillesztő modulra építve.

4.2. EMF-IncQuery

A VIATRA2 csoport újabb projektje az EMF-INCQUERY [11] keretrendszer, mely a VIATRA2 eszköz és a 2. tézis eredményeinek széleskörű, az Eclipse Modeling Framework platformon történő közvetlen alkalmazását teszi lehetővé. Az EMF-INCQUERY fő futási idejű komponense a 2. tézisben javasolt EMF feletti lekérdezőnyelvet és inkrementális mintaillesztő módszert valósítja meg.

Az EMF-INCQUERY által a disszertációban leírt eredmények számos nyílt és kereskedelmi termékhez egyszerűen integrálhatóak. Kutatócsoportunk, partnereink és külső felhasználók különféle projektben alkalmazták már az eszközt. Több nemzeti kutatási támogatásban (Jedlik, CertiMoT, TÁMOP) is felhasználásra került, valamint a SeCMER eszközprototípus (ld. 4.3. alszakasz) megvalósítására a SecureChange FP7 EU kutatási projektben. Jelenleg is alkalmazzák gépjárműipari és repülőgépipari felhasználók (a) folytonos modellvalidáció, (b) deklaratívan definiált diagramm-megjelenítő és (c) M2M transzformáció megvalósítására.

Már számos külső EMF-INCQUERY felhasználó van. A következő szervezetek biztosan bevezették az EMF-INCQUERY-t a fejlesztési gyakorlatukba, vagy legalább erre irányuló próbaprojektet végeztek:

- Thales Group
- Itemis AG
- Obeo

- ThyssenKrupp Presta Hungary Ltd
- Montages
- evopro Informatikai és Automatizálási Kft.
- CERN
- CEA
- INRIA
- TU München
- KU Leuven
- University of York
- University of Nantes
- Austria Institute of Technology
- TU Eindhoven
- Universität Innsbruck

Néhány példa tölem független EMF-INCQUERY alkalmazásokra:

- Nagyméretű forráskódmodellek inkrementális függőséganalízise (CERN)
- Változásminták detektálása a biztonsági architektúramodellezésben (KU Leuven)
- Származtatott attribútumok és referenciák deklaratív definíciója és inkrementális számítása (Itemis)
- MT tesztelés orákulumának meghajtása (University of Nantes)
- Különálló EMF modellek lekérdezés alapú „puha” összeköttetése (BME)

4.3. SeCMER eszközprototípus

A biztonságkritikus (security critical) rendszerek evolúciójával foglalkozó SecureChange FP7 EU projekt keretében kidolgozott SeCMER (SecureChange Methodology for Evolving Requirements) követelményanalízis módszertan demonstrátor eszköze [19] több ponton is a téziseimre támaszkodik. Ebben az eszközben kerültek megvalósításra a 4. tézisben javasolt szolgáltatások, az implementációjukhoz pedig nélkülözhetetlen segítséget nyújtott az EMF-INCQUERY eszköz (ld. 4.2. alszakasz).

A SecureChange projekt szabályai szerint a demonstrátor eszköz validációja ipari szakértők közreműködésével történt meg 2011. szeptemberében. A validációs eseményen egy légiirányítási esettanulmányon keresztül bemutattuk be a prototípust a jelenlévő légibiztonsági és légiforgalmi szakértőknek. Az összegyűjtött visszajelzések tanulságait beépítettük az eszközbe.

A projekt záróbírálata pozitívan értékelte a SeCMER prototípust.

5. Kapcsolódó publikációk

Összes publikációk száma: 36

Ebből lektorált: 26

Ismert független idézetek száma: több, mint 120

Külföldön megjelent, idegen nyelvű folyóiratcikk (4)

- [1] Gábor Bergmann, István Ráth, Gergely Varró, and Dániel Varró. Change-driven model transformations. Change (in) the rule to rule the change. *Software and Systems Modeling*, 11:431–461, 2012. Ismert független hivatkozások: 4. Impact factor: 1.061.
- [2] Ákos Horváth, Gábor Bergmann, István Ráth, and Dániel Varró. Experimental assessment of combining pattern matching strategies with VIATRA2. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, 12:211–230, 2010. Ismert független hivatkozások: 6.
- [3] Paolo Torrini, Reiko Heckel, István Ráth, and Gábor Bergmann. Stochastic graph transformation with regions. *Electronic Communications of the EASST, Proceedings of the Ninth International Workshop on Graph Transformation and Visual Modeling Techniques*, 29, 2010. Ismert független hivatkozások: 5.
- [4] Gábor Bergmann, István Ráth, and Dániel Varró. Parallelization of graph transformation based on incremental pattern matching. *Electronic Communications of the EASST, Proceedings of the Eighth International Workshop on Graph Transformation and Visual Modeling Techniques*, 18, 2009. Ismert független hivatkozások: 8.

Külföldön megjelent, idegen nyelvű könyvfejezet (2)

- [5] Gábor Bergmann, Artur Boronat, Reiko Heckel, Paolo Torrini, István Ráth, and Dániel Varró. *Rigorous Software Engineering for Service-Oriented Systems - Results of the SENSORIA project on Software Engineering for Service-Oriented Computing*, chapter Advances in model transformation by graph transformations: Specification, Analysis and Execution. Springer, 2010. Ismert független hivatkozások: 2.
- [6] András Balogh, Gábor Bergmann, György Csertán, László Gönczy, Ákos Horváth, István Majzik, András Pataricza, Balázs Polgár, István Ráth, Dániel Varró, and Gergely Varró. Workflow-driven tool integration using model transformations. In Gregor Engels, Claus Lewerentz, Wilhelm Schäfer, Andy Schürr, and Bernhard Westfechtel, editors, *Graph Transformations and Model-Driven Engineering*, volume 5765 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 224–248. Springer Berlin / Heidelberg, 2010. 10.1007/978-3-642-17322-6_11. Ismert független hivatkozások: 9.

Nemzetközi konferenciakiadványban megjelent idegen nyelvű cikk (10)

- [7] Gábor Bergmann, Dóra Horváth, and Ákos Horváth. Applying incremental graph transformation to existing models in relational databases. In *Sixth International Conference on Graph Transformation (ICGT 2012)*, Bremen, Germany, 09 2012.
- [8] Gábor Bergmann, István Ráth, Tamás Szabó, Paolo Torrini, and Dániel Varró. Incremental pattern matching for the efficient computation of transitive closure. In *Sixth International Conference on Graph Transformation (ICGT 2012)*, Bremen, Germany, 09 2012.
- [9] Gábor Bergmann, Ábel Hegedüs, Ákos Horváth, Zoltán Ujhelyi, István Ráth, and Dániel Varró. Integrating efficient model queries in state-of-the-art EMF tools. In *TOOLS Europe 2012*, Prague, 2012. Springer. Elfogadási arány: 31%. Ismert független hivatkozások: 1.
- [10] Gábor Bergmann, Zoltán Ujhelyi, István Ráth, and Dániel Varró. A graph query language for EMF models. In Jordi Cabot and Eelco Visser, editors, *Theory and Practice of Model Transformations, Fourth International Conference, ICMT 2011, Zurich, Switzerland, June 27-28, 2011. Proceedings*, volume 6707 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 167–182. Springer, 2011. Elfogadási arány: 27%. Ismert független hivatkozások: 1.
- [11] Gábor Bergmann, Ákos Horváth, István Ráth, Dániel Varró, András Balogh, Zoltán Balogh, and András Ökrös. Incremental evaluation of model queries over EMF models. In *Model Driven Engineering Languages and Systems, 13th International Conference, MODELS'10*. Springer, Springer, 10/2010 2010. Elfogadási arány: 21%. Ismert független hivatkozások: 9.
- [12] Ábel Hegedüs, Gábor Bergmann, István Ráth, and Dániel Varró. Back-annotation of simulation traces with change-driven model transformations. In *Proceedings of the Eighth International Conference on Software Engineering and Formal Methods*, pages 145–155, Pisa, 09/2010 2010. IEEE Computer Society, IEEE Computer Society. Elfogadási arány: 22%. Ismert független hivatkozások: 7.
- [13] Gábor Bergmann, Miklós Molnár, László Gönczy, and Bernard Cousin. Optimal period length for the CGS sensor network scheduling algorithm. In *International Conference on Networking and Services*, pages 192–199. IEEE Computer Society, IEEE Computer Society, 2010. Ismert független hivatkozások: 3.
- [14] Gábor Bergmann, Ákos Horváth, István Ráth, and Dániel Varró. Efficient model transformations by combining pattern matching strategies. In Richard F. Paige, editor, *Theory and Practice of Model Transformations, Second International Conference, ICMT 2009, Zurich, Switzerland, June 29-30, 2009. Proceedings*, volume 5563 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 20–34. Springer, Springer, 2009. Elfogadási arány: 22%. Ismert független hivatkozások: 3.

- [15] István Ráth, Gábor Bergmann, András Ökrös, and Dániel Varró. Live model transformations driven by incremental pattern matching. In Antonio Vallecillo, Jeff Gray, and Alfonso Pierantonio, editors, *Proc. First International Conference on the Theory and Practice of Model Transformations (ICMT 2008)*, volume 5063/2008 of *Lecture Notes in Computer Science*, page 107–121. Springer Berlin / Heidelberg, Springer Berlin / Heidelberg, 2008. Elfogadási arány: 31%. Ismert független hivatkozások: több, mint 25.
- [16] Gábor Bergmann, Ákos Horváth, István Ráth, and Dániel Varró. A benchmark evaluation of incremental pattern matching in graph transformation. In Hartmut Ehrig, Reiko Heckel, Grzegorz Rozenberg, and Gabriele Taentzer, editors, *Proc. 4th International Conference on Graph Transformations, ICGT 2008*, volume 5214 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 396–410. Springer, Springer, 2008. Elfogadási arány: 40%. Ismert független hivatkozások: több, mint 10.

Nemzetközi workshop-kiadványban megjelent idegen nyelvű cikk (7)

- [17] Benedek Izsó, Zoltán Szatmári, Gábor Bergmann, Ákos Horváth, István Ráth, and Dániel Varró. Ontology driven design of EMF metamodels and well-formedness constraints. In Mira Balaban, Jordi Cabot, Martin Gogolla, Claas Wilke, editors, *Proc. 12th Workshop on OCL and Textual Modeling*, pages 37–42. ACM New York, 2012. 10.1145/2428516.2428523.
- [18] Gábor Bergmann, Fabio Massacci, Federica Paci, Thein Than Tun, Dániel Varró, and Yijun Yu. A tool for managing evolving security requirements. In Selmin Nurcan, Wil Aalst, John Mylopoulos, Michael Rosemann, Michael J. Shaw, and Clemens Szyperski, editors, *IS Olympics: Information Systems in a Diverse World*, volume 107 of *Lecture Notes in Business Information Processing*, pages 110–125. Springer Berlin Heidelberg, 2012. 10.1007/978-3-642-29749-6_8.
- [19] Gábor Bergmann, Fabio Massacci, Federica Paci, Thein Tun, Dániel Varró, and Yijun Yu. A tool for managing evolving security requirements. In Selmin Nurcan, editor, *CAiSE'11 Forum at the 23rd International Conference on Advanced Information Systems Engineering*, volume 734, pages 49–56, London, UK, 06/2011 2011. CEUR-WS, CEUR-WS. urn:nbn:de:0074-734-7.
- [20] Gábor Bergmann, Fabio Massacci, Federica Paci, Thein Tun, Dániel Varró, and Yijun Yu. SeCMER: A tool to gain control of security requirements evolution. In Witold Abramowicz, Ignacio Llorente, Mike SurrIDGE, Andrea Zisman, and Julien Vayssière, editors, *Towards a Service-Based Internet*, volume 6994 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 321–322. Springer Berlin / Heidelberg, 2011. 10.1007/978-3-642-24755-2_35.
- [21] Ábel Hegedüs, Zoltán Ujhelyi, and Gábor Bergmann. Saying Hello World with VIATRA2 - A Solution to the TTC 2011 Instructive Case. In Pieter Van Gorp, Steffen Mazanek, and Louis Rose, editors, *TTC 2011: Fifth Transformation Tool Contest*,

Zürich, Switzerland, June 29-30 2011, *Post-Proceedings*, volume 74, pages 302–324, Zürich, Switzerland, 11/2011 2011. Open Publishing Association, Open Publishing Association.

- [22] Ábel Hegedüs, Zoltán Ujhelyi, and Gábor Bergmann. Solving the TTC 2011 reengineering case with VIATRA2. In Pieter Van Gorp, Steffen Mazanek, and Louis Rose, editors, *TTC 2011: Fifth Transformation Tool Contest, Zürich, Switzerland, June 29-30 2011, Post-Proceedings*, volume 74, pages 136–148, Zürich, Switzerland, 11/2011 2011. Open Publishing Association, Open Publishing Association.
- [23] Gábor Bergmann, András Ökrös, István Ráth, Dániel Varró, and Gergely Varró. Incremental pattern matching in the VIATRA model transformation system. In G. Karsai and Gabriele Taentzer, editors, *Proc. Graph and Model Transformations (GRAMOT 2008)*. ACM, 2008. Ismert független hivatkozások: több, mint 25.

Hazai konferenciakiadványban megjelent idegen nyelvű cikk (3)

- [24] Gábor Bergmann. Graph triggers and incrementally evaluated queries over EMF models. In *Proceedings of the 18th PhD Minisymposium*, pages 38–41, Budapest, 02/2011 2011. Budapest University of Technology and Economics, Department of Measurement and Information Systems, Budapest University of Technology and Economics, Department of Measurement and Information Systems.
- [25] Gábor Bergmann. Contextual graph triggers. In *Proceedings of the 17th PhD Minisymposium*, page 22–25. Budapest University of Technology and Economics, Department of Measurement and Information Systems, Budapest University of Technology and Economics, Department of Measurement and Information Systems, 2010.
- [26] Gábor Bergmann. Parallelization of incremental pattern matching in graph transformation. In *Proceedings of the 16th PhD Minisymposium*, page 10–11. Budapest University of Technology and Economics, Department of Measurement and Information Systems, Budapest University of Technology and Economics, Department of Measurement and Information Systems, 2009.

Magyar nyelvű konferenciakiadványban megjelent cikk (1)

- [27] Bergmann Gábor. Új formalizmus eseményvezérelt gráftranszformációhoz. In *XV. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka*. Erdélyi Múzeum-Egyesület, Erdélyi Múzeum-Egyesület, 2010.

Tutorial (3)

- [28] Gábor Bergmann, Ákos Horváth, István Ráth, and Dániel Varró. Incremental Pattern Matching over EMF: a Tutorial on EMF-INCQuery, October 2010. Tutorials track of the ACM/IEEE 13th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS).

- [29] Gábor Bergmann, Ákos Horváth, István Ráth, and Dániel Varró. Incremental evaluation of model queries over EMF models: a tutorial on EMF-INCQuery, June 2011. Tutorials track of the Seventh European Conference on Modelling Foundations and Applications (ECMFA 2011).
- [30] Gábor Bergmann, Ábel Hegedüs, Ákos Horváth, István Ráth, Zoltán Ujhelyi, and Dániel Varró. Implementing efficient model validation in EMF tools. In *26th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE 2011)*, Lawrence, Kansas, USA, 11/2011 2011. IEEE Computer Society, IEEE Computer Society. Ismert független hivatkozások: 2.

EU kutatási projekt tanulmány (3)

- [31] Gábor Bergmann, Elisa Chiarani, Edith Felix, Stefanie Francois, Benjamin Fontan, Charles Haley, Fabio Massacci, Zoltán Micskei, John Mylopolous, Bashar Nuseibeh, Federica Paci, Thein Tun, Yijun Yu, and Dániel Varró. *SecureChange Deliverable D3.2 Methodology for Evolutionary Requirements*, 2011. http://www.securechange.eu/sites/default/files/deliverables/D3.2-%20Methodology%20for%20Evolutionary%20Requirements_v3.pdf.
- [32] Michela Angeli, Gábor Bergmann, Fabio Massacci, Bashar Nuseibeh, Federica Paci, Bjornar Solhaug, Thein Tun, Yijun Yu, and Dániel Varró. *SecureChange Deliverable D3.3 Algorithms for Incremental Requirements Models Evaluation and Transformation*, 2012. <http://www.securechange.eu/sites/default/files/deliverables/D3.3b%20Algorithms%20for%20Incremental%20Requirements%20Models%20Evaluation%20and%20Transformation.pdf>.
- [33] Michela Angeli, Karmel Bekoutou, Gábor Bergmann, Elisa Chiarani, Olivier Delande, Edith Felix, Fabio Massacci, Bashar Nuseibeh, Federica Paci, Thein Tun, Dániel Varró, Koen Yskout and Yijun Yu. *SecureChange Deliverable D3.4 Proof of Concept Case Tool*, 2012. <http://www.securechange.eu/sites/default/files/deliverables/D3.4%20Proof-of-Concept%20CASE%20Tool%20%28Y3%29.pdf>.

Jelentés (2)

- [34] Ábel Hegedüs, Zoltán Ujhelyi, Gábor Bergmann, and Ákos Horváth. Ecore to Genmodel case study solution using the VIATRA2 framework. In Pieter Van Gorp, Steffen Mazanek, and Arend Rensink, editors, *Transformation Tool Contest (TTC '10)*, Malaga, Spain, 07/2010 2010.
- [35] Gábor Bergmann and Ákos Horváth. BPMN to BPEL case study solution in VIATRA2. In *5th International Workshop on Graph-Based Tools*, Zürich, Switzerland, 07/2009 2009. Springer, Springer.

Master's thesis (1)

- [36] Gábor Bergmann. Incremental graph pattern matching and applications. Master's thesis, Budapest University of Technology and Economics, May 2008.

Köszönetnyilvánítás

Elsősorban Dr. Varró Dánielnek szeretném megköszönni a folyamatos témavezetői iránymutatását, értékes javaslatait, és érdekes, megoldásra váró kihívásait.

Sosem jutottam volna el idáig a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hibatűrő Rendszerek Kutatócsoportján dolgozó munkatársaim nélkül. Köszönettel tartozom Prof. Dr. Pataricza Andrásnak és Dr. Majzik Istvánnak, hogy csoportvezetőként pénzügyi és egyéb támogatást nyújtottak a kutatásomhoz. Dr. Ráth István, Horváth Ákos, Hegedüs Ábel, Ujhelyi Zoltán, Izsó Benedek, valamint korábbi munkatársaim közül Ökrös András, Dr. Varró Gergely és mások is köszönetet érdemelnek, mivel kiváló csapatjátékosok, szerzőtársak, fejlesztőtársak, szakmai példaképek, és gyakran ötleteim tesztközönsége voltak. Páratlan lehetőség volt, hogy építhettem a munkájukra, és nagyon kielégítő érzés, amikor az én eredményeim is az ő hasznukra válnak.

Mivel a doktoranduszi és doktorjelölti lét sok munkát és erőfeszítést igényelt, gyakran igen szoros határidőkkel, nagy adósságot halmoztam fel családommal és barátnőmmel szemben, akikre nem mindig tudtam elég időt szánni. Meg kell köszönnöm a türelmüket és a támogatásukat.

A kutatás az Európai Unió és Magyarország támogatásával a TÁMOP 4.2.4.A/1-11-1-2012-0001 azonosító számú „Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése országos program” című kiemelt projekt keretei között valósult meg. Kutatásaimat nagy mértékben finanszírozta Magyarország TÁMOP 4.2.1. B-09/1/KMR-2010-0002 támogatása, a CERT-IMOT (ERC-HU-09) magyar kutatási projekt, a magyar-francia kormányközi TÉT Kooperációs Program "Methods and algorithms to enhance the dependability of services in sensor networks" (F-Egide-PHC-19476SH, FR 6/2008) projektje, továbbá az Európai Unió SENSORIA (IST-3-016004) FP6-os és SecureChange (ICT-FET-231101) FP7-es kutatási programja. Az eredmények publikációját a Schnell László Alapítvány is támogatta.

Az anyagi támogatáson túl ezen projektek némelyike lehetőséget adott, hogy kiváló nemzetközi kollégákkal folytassak gyümölcsöző együttműködést, akik közül többen immár társszerzőim. Nekik is hálával tartozom.

Hivatkozások

- [AUT] AUTOSAR Consortium. *The AUTOSAR Standard*. <http://www.autosar.org/>.
- [BGT91] Horst Bunke, Thomas Glauser, and T.-H. Tran. An efficient implementation of graph grammars based on the RETE matching algorithm. In Hartmut Ehrig, Hans-Jörg Kreowski, and Grzegorz Rozenberg, editors, *Graph Grammars and Their Application to Computer Science*, volume 532 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 174–189. Springer, 1991.
- [BV06] András Balogh and Dániel Varró. Advanced Model Transformation Language Constructs in the VIATRA2 Framework. In *ACM Symposium on Applied Computing – Model Transformation Track (SAC 2006)*, 2006. In press.
- [ECLa] Generative Modeling Technologies. <http://www.eclipse.org/gmt/>.
- [ECLb] The Eclipse Foundation. *The Eclipse Project*. <http://www.eclipse.org>.
- [EEKR99] Hartmut Ehrig, Gregor Engels, Hans-Jörg Kreowski, and Grzegorz Rozenberg, editors. *Handbook on Graph Grammars and Computing by Graph Transformation*, volume 2: Applications, Languages and Tools. World Scientific, 1999.
- [EMF] The Eclipse Foundation. *Eclipse Modeling Framework*. <http://www.eclipse.org/emf/>.
- [EU 12] EU FP7 research project ICT-FET-231101. *SecureChange: Security Engineering for Lifelong Evolvable Systems*, 2009-2012. <http://www.securechange.eu>.
- [For82] Charles L. Forgy. Rete: A fast algorithm for the many pattern/many object pattern match problem. *Artificial Intelligence*, 19(1):17–37, September 1982.
- [HLR06] David Hearnden, Michael Lawley, and Kerry Raymond. Incremental model transformation for the evolution of model-driven systems. In Oscar Nierstrasz, Jon Whittle, David Harel, and Gianna Reggio, editors, *Proc. of the 9th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems*, volume 4199 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 321–335, Genova, Italy, October 2006. Springer.
- [HV09] Ákos Horváth and Dániel Varró. CSP(M): Constraint Satisfaction Problem over Models. In Andy Schürr and Bran Selic, editors, *Model Driven Engineering Languages and Systems, 12th International Conference, MODELS 2009, Denver, CO, USA, October 4-9, 2009. Proceedings*, volume 5795 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 107–121. Springer, 2009. Acceptance rate: 18%.

- [HV10] Ákos Horváth and Dániel Varró. Dynamic constraint satisfaction problems over models. *International Journal on Software and Systems Modeling*, December 2010. Officially appeared online, DOI: 10.1007/s10270-010-0185-5, IF = 1,533.
- [HWR13] John Hutchinson, Jon Whittle, and Mark Rouncefield. Model-driven engineering practices in industry: Social, organizational and managerial factors that lead to success or failure. *Science of Computer Programming*, (0):–, 2013.
- [ICM13] *International Conference on Model Transformation (ICMT)*. <http://www.model-transformation.org/>, 2008-2013.
- [ISR⁺13] Benedek Izsó, Zoltán Szatmári, István Ráth, Ákos Horváth, Gábor Bergmann, Balázs Polgár, Gergely Varró, and Dániel Varró. *Efficient Instance-level Ontology Validation by Incremental Model Query Techniques*, 2013. <http://incquery.net/publications/trainbenchmark>.
- [JRG12] Arash Jalali, Arend Rensink, and Amir Hossein Ghamarian. Incremental pattern matching for regular expressions. *ECEASST*, 47, 2012.
- [KHTR10] Ajab Khan, Reiko Heckel, Paolo Torrini, and István Ráth. Model-based stochastic simulation of P2P VoIP using graph transformation. In *Proceedings of the 17th International Conference on Analytical and Stochastic Modeling Techniques and Applications*, 2010.
- [KW07] Ekkart Kindler and Robert Wagner. Triple Graph Grammars: Concepts, Extensions, Implementations, and Application Scenarios . Technical Report TR-RI-07-428, 2007.
- [LL04] Axel Lamsweerde and Emmanuel Letier. From object orientation to goal orientation: A paradigm shift for requirements engineering. In Martin Wirsing, Alexander Knapp, and Simonetta Balsamo, editors, *Radical Innovations of Software and Systems Engineering in the Future*, volume 2941 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 325–340. Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- [LSS⁺11] Mass Soldal Lund, Bjørnar Solhaug, Ketil Stølen, Mass Soldal Lund, Bjørnar Solhaug, and Ketil Stølen. The CORAS risk modelling language. In *Model-Driven Risk Analysis*, pages 47–72. Springer Berlin Heidelberg, 2011. 10.1007/978-3-642-12323-8_4.
- [M⁺02] Haralambos Mouratidis et al. A natural extension of Tropos methodology for modelling security. In *Agent Oriented Methodologies Workshop. Object Oriented Programming, Systems, Languages (OOPSLA), Seattle-USA*. ACM, 2002.
- [ML91] D. P. Miranker and B. J. Lofaso. The organization and performance of a TREAT-based production system compiler. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 3(1):3–10, 1991.

- [MMP⁺11] Fabio Massacci, John Mylopoulos, Federica Paci, Thein Than Tun, and Yijun Yu. An extended ontology for security requirements. In *CAiSE Workshops*, pages 622–636, 2011.
- [MMZ07] Fabio Massacci, John Mylopoulos, and Nicola Zannone. Computer-aided support for secure tropos. *Automated Software Engg.*, 14:341–364, September 2007.
- [NNY10] Armstrong Nhlabatsi, Bashar Nuseibeh, and Yijun Yu. Security requirements engineering for evolving software systems: a survey. *International Journal of Secure Software Engineering (IJSSE)*, 1(1):54–73, 2010.
- [OMG01] Object Management Group. *Model Driven Architecture – A Technical Perspective*, September 2001. <http://www.omg.org/mda/>.
- [OMG08] Object Management Group. *Query/View/Transformation (QVT), V1.0*, 2008. <http://www.omg.org/spec/QVT/1.0>.
- [OMG10a] Object Management Group. *OMG SysML, v1.2*, June 2010. <http://www.omg.org/cgi-bin/doc?formal/10-06-02>.
- [OMG10b] Object Management Group. *UML Version 2.3*, May 2010. <http://www.omg.org/spec/UML/2.3/>.
- [OMG12a] Object Management Group. *Object Constraint Language Specification (Version 2.3.1)*, 2012. <http://www.omg.org/spec/OCL/2.3.1/>.
- [OMG12b] Object Management Group. *OMG SysML, v1.3*, June 2012. <http://www.omg.org/spec/SysML/1.3/>.
- [Pat06] András Pataricza. *Model-based Dependability Analysis*. Hungarian Academy of Sciences, Budapest, 2006. DSc thesis.
- [RVV08] István Ráth, Dávid Vágó, and Dániel Varró. Design-time Simulation of Domain-specific Models By Incremental Pattern Matching. In *2008 IEEE Symposium on Visual Languages and Human-Centric Computing (VL/HCC)*, 2008.
- [RVV09] István Ráth, Gergely Varró, and Dániel Varró. Change-driven model transformations. In *Proc. of MODELS’09, ACM/IEEE 12th International Conference On Model Driven Engineering Languages And Systems*, volume 5795/2009 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 342–356, 2009.
- [THR10] Paolo Torrini, Reiko Heckel, and István Ráth. Stochastic simulation of graph transformation systems. In *Proc. of FASE2010, Fundamental Approaches to Software Engineering*, 2010.
- [VIA] *VIATRA2 Framework*. An Eclipse GMT Subproject (<http://www.eclipse.org/gmt/>).

- [VVS06] Gergely Varró, Dániel Varró, and Andy Schürr. Incremental Graph Pattern Matching: Data Structures and Initial Experiments. In Gabor Karsai and Gabi Taentzer, editors, *Graph and Model Transformation (GraMoT 2006)*, volume 4 of *Electronic Communications of the EASST*. EASST, 2006.