

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

**KERESÉS ALAPÚ MÓDSZEREK  
A MODELLVEZÉRELT FEJLESZTÉSBN**

PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**HORVÁTH ÁKOS**  
OKL. MÉRNÖK–INFORMATIKUS

TÉMAVEZETŐ:  
**DR. VARRÓ DÁNIEL**  
EGYETEMI DOCENS

BUDAPEST, 2013. FEBRUÁR

## 1. A kutatás előzményei

### 1.1. Modellvezérelt fejlesztés

A modellezés a rendszerfejlesztés során régóta bevált eszköz a való világ és egyéb absztrakt fogalmak leírására, így az a mérnöki munka alapját képezi. A rendszerfejlesztők már jóval a modellvezérelt paradigma megjelenése előtt használtak olyan modelleket a fejlesztés során, mint az egyedkapcsolat diagramok, a gráf alapú leírások vagy absztrakt szintaxis fák. A modellvezérelt tervezés paradigmájának (MDE) [BCW12] jellegzetessége, hogy modelleket használ a rendszerfejlesztés teljes életciklusa alatt a követelményanalízistől kezdve, a rendszertervezésen és az implementáción át egészen a rendszer verifikációjáig és karbantartásáig.

A modellvezérelt tervezési paradigma célja, hogy a bevett mérnöki megoldások formális alapokra helyezésével növelje a szoftverfejlesztési folyamat hatékonyságát és termelékenységét. A modellvezérelt tervezés a fejlesztés legelejétől kezdve magas absztrakciós szintű modellekből indul ki és jól definiált lépéseken keresztül automatikusan származtatja a megvalósítandó rendszer egyes elemeit.

Az MDE szerint minden, a tervezésautomatizálás szempontjából releváns információt absztrakt modellekben tárolunk. E modellek segítségével automatizálható (i) a tervezés alatt álló rendszer *strukturált dokumentálása*, (ii) az implementáció megkezdése előtt, a rendszer szempontjából releváns tulajdonságok (pl., teljesítmény, robusztusság, biztonság, komplexitás) *modell alapú validációja*, és (iii) a célplatform egyes komponenseinek (pl., forráskód, konfigurációs táblák, tesztesetek, szöveges dokumentumok) *automatikus generálása*.

### 1.2. Tervezési tér felderítés

Egy MDE folyamat kezdetén a modellek jellemzően még nem eléggé specifikusak az automatikus kódgeneráláshoz, azok egy tervezési teret feszítenek ki. Ilyenkor a kifeszített térben megtalálható modellek között *keresünk egy olyan megoldást*, amely teljesíti a rendszerrel szemben támasztott követelményeket és kielégítő megoldást ad az összes minőségi metrikára.

A *tervezési tér felderítés* (Design Space Exploration, DSE) egy olyan több kritériumú keresés alapú tervezési folyamat, amely a rendszerterv követelményeit teljeskörűen kielégítő megoldási alternatívák közül egy „elég jó” változatot keres, amely kielégítő megoldást kínál a rendszerrel szemben támasztott *minőségi metrikákra*. Ilyen metrikák vonatkozhatnak a rendszer teljesítményére, energiafelhasználására, megbízhatóságára, stb. A DSE feladatok esetén *flexibilisnek* nevezik azokat a megoldásokat, melyek (az egyetlen metrikára történő optimalizációval szemben) az összes metrikát együttesen figyelembe véve adnak egy megfelelő alternatívát. Ez adja a DSE feladatok komplexitását olyan területeken, mint a biztonságkritikus beágyazott rendszerek vagy a rendszermenedzsment, ahol sok egymástól eltérő metrika alapján keressük az optimális, flexibilis megoldást. Az ilyen típusú problémákat egy modellvezérelt fejlesztési környezetben jellemzően kényszerkielégítési módszerekkel oldják meg [Nee01].

A legtöbb követelmény és minőségi jellemző – például az időzítés, áteresztőképesség, ár, memóriaméret, stb. – numerikus értéként jeleníthető meg. A kritikus rendszerek tervezésénél egyre szélesebb körben megjelenő moduláris architektúrákban azonban (mint az AUTOSAR [AUT] szabvány az autóiparban és az integrált moduláris avionika [RTCa] a repülőgépiparban) olyan strukturális kényszerek is előfordulnak, amelyek a rendszer összekötöttségére, gráf alapú reprezentációjára vonatkozóan adnak megkötéseket. Ezen strukturális kényszereket gráf jellegük miatt

azonban csak igen nehezen lehet numerikus értékek fölötti kényszerekként kifejezni. Ezen túlmenően, a rendszerkövetlemények folyamatos változása miatt, tovább bonyolódhat a tervezési tér felderítése, aminek következtében további kényszerek és minőségi metrikák jelenhetnek meg.

### 1.3. Modelltranszformáció

A modellvezérelt fejlesztési paradigmában kulcsfontosságú szerepet tölt be a modelltranszformáció, melynek feladata, hogy modellezési nyelveken belül és azok között automatikus leképezéseket biztosítson. Az utóbbi években több különböző megközelítés is napvilágot látott, melyek közül az egyik legszélesebb körben elterjedt és elfogadott megközelítés a deklaratív, szabályalapú gráftranszformációs [Roz97] paradigma lett.

#### Gráftranszformáció

A gráftranszformáció (GT) egy a gráfmodellek átalakításának leírására vonatkozó grafikus, deklaratív nyelv. A nyelv szabályokból áll, melynek összetevői (i) a bal oldalt leíró gráfmenta (LHS) és (ii) a jobb oldalt leíró gráfmenta (RHS). A modell átalakítása GT szabállyal úgy történik, hogy a szabály bal oldalának illeszkedését a modellben kicseréljük a jobb oldala által definiált modellrészletre. Ennek végrehajtása két lépésben történik. Első lépésként a teljesítmény szempontjából kritikus gráfmentaillesztési fázist hajtjuk végre, melynek során a bal oldal illeszkedéseit megkeresük a modellben. Ezt követően a frissítési fázisban a megtalált modellrészletet módosítjuk a jobb oldal és a bal oldal különbségéből adódó eltérések alapján.

A gráftranszformációs szabályokra épülő modelltranszformációs keretrendszereknek képeseknek kell lenniük a több százazres, esetenként akár több milliós nagyságrendű modellek kezelésére is; ez az MDE széles körben való elterjedésének egyik legnagyobb kihívása.

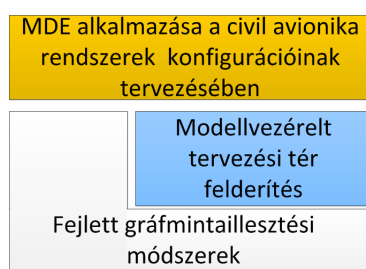
### 1.4. Avionikai rendszerek modellvezérelt tervezése

Ahogy a modellvezérelt fejlesztési paradigma egyre nagyobb figyelmet kap a különböző biztonságkritikus avionikai szoftverek fejlesztésében [CRH], úgy válik egyre fontosabbá az alapkonceptió adaptálása a civil avionikai szoftverek FAA és az EASA által kiadott DO-178B [RTCb] tanúsítványozási folyamatához. Ehhez az alábbi követelményeknek kell megfelelni: (i) szorosan együttműködő fejlesztési és verifikációs–validációs folyamatok megvalósítása, (ii) folytonos verifikáció a specifikálás korai fázisaitól kezdve a tervezésen át az implementációig és (iii) a teljeskörű nyomonkövethetőség biztosítása a fejlesztési folyamat elejétől a végéig. Fontos még megjegyezni, hogy a tanúsítványozási szabvány hamarosan megjelenő új DO-178C változata esetén már egy dedikált csoport foglalkozik a *modellvezérelt fejlesztési paradigma verifikációs* kérdéseinek vizsgálatával, amit az eddigi DO-178B-s tapasztalatokra építenek.

## 2. Kihívások

A kutatásaimat alapvetően a modellvezérelt fejlesztési paradigma biztonságkritikus, civil avionikai szoftverrendszerek fejlesztésével kapcsolatos gyakorlati kérdései vezérelték. Célom volt, hogy elkészítsek egy modellvezérelt alapokon nyugvó fejlesztőeszközt az integrált moduláris avionikához (IMA) tartozó, ARINC 653 szabványnak megfelelő konfigurációs leírók fejlesztéséhez.

Annak ellenére, hogy igen széleskörű kutatásokat végeztek a beágyazott rendszerek [KSLB03] modell alapú fejlesztésével kapcsolatban, kevesen foglalkoztak [KG08] specifikusan a konfigurációs leírók tervezésével. Ez indította el a *modellvezérelt tervezési tér felderítéssel kapcsolatos kutatásaimat*, mivel a civil avionikai rendszerek konfigurációs leíróinak tervezési folyamatának



1. ábra. A kihívások áttekintése

egyes részei jól megfogalmazhatóak komplex strukturális kényszereként a rendszert leíró modellek felett.

A civil avionikai rendszerek konfigurációinak automatikus származtatásakor a fejlett modellvezérelt módszerek alkalmazásának egyik feltétele a több százezres vagy akár milliós modellek hatékony kezelése. A 2005-ben megkezdett gráfminaillesztéssel foglalkozó kutatásaim idején a modelltranszformációs eszközök még csak pár tízezres vagy pár százezres modellméretig skálázódtak. Ezzel szemben, számos ipari probléma már akkor is minimum egy nagyságrenddel nagyobb volt. Ez a hiányosság gátolta használatukat a hagyományos modell-modell és modell-kód transzformációk esetén és olyan aktuális területeken, mint a modellvezérelt tervezési tér felderítés vagy a tervezési szabályok automatikus és azonnali validációja. Utóbbi alkalmazási területeken kiemelten fontos a modelllekérdezések azonnali és gyors kiértékelése a modell bármilyen változása esetén. Összefoglalva, a három kutatási terület egymásra hatását az 1. ábra mutatja.

### 1. Kihívás: Gráfminaillesztési módszerek skálázása ipari méretű feladatokhoz

Annak érdekében, hogy a gráftranszformációs eszközök ipari méretű modellek felett is elfogadható teljesítményt nyújtsanak, komplex és kifinomult gráfminaillesztő algoritmusokra van szükség. Ezen algoritmusok leggyakrabban vagy (i) lokális keresésen alapulnak (mint a FUJABA [NNZ00] vagy GrGen [JBK10] eszközökben) vagy (ii) inkrementális megközelítéseken [JT10, BOR<sup>+</sup>08], amelyek a részleges illeszkedéseket is tárolják és frissítik a modellváltozás esetén.

Megvizsgálva a fellelhető lokális keresésen és inkrementális megközelítéseken alapuló eszközöket [GBG<sup>+</sup>06, Ren04, VVS06], az alábbiakra lettem figyelmes: (i) a lokális keresésen alapuló megközelítések általában elfogadható teljesítményt nyújtanak alacsony memóriahasználat mellett a legkülönbözőbb alkalmazási területeken [27,21], (ii) amíg ezzel szemben az inkrementális módszerek, egyes, az én kutatásaim szempontjából fontos területeken, akár nagyságrendekkel nagyobb sebességre képesek, megnövekedett memóriefogyasztás esetén.

Azonban több felhasználási terület és ipari példa megmutatta [16], hogy a szükséges memória nem mindig áll rendelkezésre az inkrementális módszerek igényeinek kielégítésére. A memória kérdése még problematikusabb a tervezési tér felderítési feladatok esetén, ahol a bejárt állapototteret is a memóriában kell tárolni.

### 2. Kihívás: Strukturális kényszerkielégítési problémák megoldása adaptív tervezési tér felderítési feladatokban

Napjainkban a DSE feladatokat a modellvezérelt fejlesztési megközelítésekben [WSNW07] jellemzően speciális, véges értékészletű numerikus kényszerkielégítési problémaként definiálják és oldják meg. E megközelítés sok esetben nagyon hatékony módon működik, azonban a fejlett numerikus kényszerkielégítő rendszerek a hatékonyságuk növelése érdekében különböző megközelítésekkel élnek: (i) a változók értékészletét a priori meg kell adni, (ii) a változók számát is

ugyancsak előre kell rögzíteni és (iii) a legtöbb megközelítés nem ad támogatást a kényszerek *dinamikus* hozzáadására és elvételére [MS00]. E megkötések következménye, hogy a modellvezérelt fejlesztésre jellemező gráf alapú modelleket és a rájuk felírt strukturális kényszereket nem könnyű hatékonyan leképezni a véges értékészletű változókra.

Összefoglalva, a jelenleg fellelhető véges elemkészleten működő numerikus kényszerkielégítési rendszerek nem képesek hatékonyan kezelni a flexibilis és dinamikus strukturális kényszereket tartalmazó problémákat a gráfmodellek felett, amely rendszerek szükségesek lennének MDE környezetben a folytonosan változó adaptív DSE problémák kezeléséhez.

### 3. Kihívás: Civil avionikai szoftverrendszerek konfigurációjának szisztematikus tervezése

Mára az ARINC 653-as szabvány [ARI] vált az integrált moduláris avionikára épülő biztonságkritikus rendszerek fejlesztésének piacvezető megközelítésévé. Az IMA koncepció egyik nagy előnye a költségek redukálása a fejlesztési, verifikációs és integrációs feladatok egyszerűsítésével. Az ARINC 653-nak megfelelő IMA platformok esetén mind az implementációs, mind a telepítési információk jelentős részét XML konfigurációs leírókként adjuk meg. Általában ezeket a konfigurációs leírókat a rendszertervező mérnök határozza meg olyan eszközöket használva, melyek csak igen egyszerű támogatást nyújtanak (i) maguknak az XML leíróknak a manipulációjára és (ii) az ARINC 653-as sémának való megfelelésük vizsgálatára.

Az ARINC 653 alapú rendszerek komplexitásának ellenére [Wil07], a jelenleg fellelhető eszközök a fent felsoroltakon kívül csak igen alacsony szintű támogatást nyújtanak a tervezés megkönnyítéséhez. Jellemzően ezekből az eszközökből hiányzik (1) a fejlesztési folyamat specifikálásának a lehetősége, (2) a tervezési követelmények és kényszerek azonnali és automatikus ellenőrzése, (3) a tervezőmérnökök döntéseinek szisztematikus rögzítése és (4) a nyomonkövethetőség automatikus biztosítása a magas szintű követelményektől kezdve a generált konfigurációs állományokig. E hiányok együttes hatása, hogy a konfigurációs leírókban felmerülő esetleges tervezési hibákat csak igen költséges módon lehet felderíteni és kiszűrni.

## 3. A kutatás módszertana és új tudományos eredmények

### 3.1. Hatékony gráfmintaillesztési technikák

Áttekintve a fellelhető lokális keresésen alapuló eszközöket, megállapítottam, hogy a kutatások legnagyobb része az *elemi* mintaillesztési operációk [4] (pl. típus szerinti leszámolás, él megletének ellenőrzése) optimalizált sorrendezésére helyezik a hangsúlyt. Ezzel szemben a legtöbb megközelítés általában csak egyszerű heurisztikát alkalmazva sorrendezi a mintaillesztési műveleteket, mint például az attribútum kényszerek kiértékelése, az injektivitási kényszer vagy a negatív alkalmazási feltételek vizsgálata. Ezért kérdéses a keresési stratégia hatékonysága.

Az inkrementális megközelítéseket is megvizsgálva észrevettem, hogy a különböző modelltranszformációs feladatok [17] mind teljesítmény szempontból, mind pedig memóriafoglalásukat figyelembe véve csak különböző gráfmintaillesztési technikák kombinált használatával valósíthatók meg hatékonyan. A jelenleg fellelhető modelltranszformációs keretrendszerek közül azonban egyik sem támogatja a különböző mintaillesztési stratégiák hatékony integrációját.

Ezért egy, a legkülönbözőbb gráfmintaillesztési operációkat egységesen, súlyozott predikátumokként kezelő megközelítést [4,18] javasoltam, ahol e predikátumok sorrendezése adja a végrehajtó keresési tervet. A megközelítés egyik legnagyobb előnye, hogy a keresési terv optimalizációja tetszőleges operációk esetén is egységesen kezelhető, függetlenül attól, hogy az esetlegesen

bevezetett új operációk milyen súlyozást kapnak. Így a gráfmintaillesztés különböző fázisai (műveletek súlyozása, keresési terv generálása, keresési terv végrehajtása) teljesen elkülöníthetővé válnak, ami teret enged többféle gráfmintaillesztési megközelítés együttes alkalmazásának (pl., metamodell alapú vs. példány modellalapú keresési tervek [VVF05]). Ezen túlmenően a módszer megkönnyíti az új operációk bevezetését a keresési terveket előállító algoritmusok módosítása nélkül.

A fenti megközelítésre építve kidolgoztam egy hibrid gráfmintaillesztő eljárást [16,2], amelynek lényege, hogy a transzformáció készítője tervezési időben határozhatja meg az egyes rész- és teljes gráfmintákhoz használt mintaillesztési algoritmust. A hibrid megközelítésben egy részminták inkrementális illesztését is egy speciális művelet írja le. Ennek eredményeképpen a tervező képes finomhangolni a teljesítményt a rendelkezésre álló memória és számítási erőforrásokat figyelembe véve [2].

A megfelelő gráfmintaillesztési stratégia optimális kiválasztásának egyik elengedhetetlen feltétele mind a lokális és az inkrementális gráfmintaillesztési algoritmusok mélyreható ismerete, ami nem várható el a transzformáció készítőjétől. Ehhez nyújtanak segítséget az általunk kidolgozott ajánlások [2] és azok a modelltranszformációra, valamint gráfmintákra jellemző kritikus metrikák, amelyeknek szignifikáns hatása [17, 27, 24] lehet a gráfmintaillesztés teljesítményére és memóriaafogyasztására.

**1. tézis** Kidolgoztam egy általános célú keresési gráfot a különböző lokális keresésen alapuló mintaillesztési műveletek egységes kezelésére és optimalizálására. E keretrendszerre építve kidolgoztam egy hibrid gráfmintaillesztési algoritmust a lokális keresésen alapuló és inkrementális megközelítések együttes alkalmazására.

- 1. Általános célú keresési gráfok.** Definiáltam egy hipergráfokra épülő általános célú keresési gráfot olyan gráfmintaillesztési műveletek egységes reprezentációjához [4, 18], mint például az élek menti navigáció, a tartalmazási viszony ellenőrzése, típus vizsgálatok, a negatív alkalmazási feltételek ellenőrzése, az attribútum kényszerek kiértékelése és az injektivitás kényszerek ellenőrzése. A megközelítés alapja, hogy egységesen, egy speciális súlyozott predikátummal reprezentál minden gráfmintaillesztési műveletet.
- 2. Hibrid gráfmintaillesztés.** Kidolgoztam egy hibrid gráfmintaillesztési algoritmust [2, 16], amely képes egy összetett gráfmintán belül a különböző részmintákat lokális keresésen vagy inkrementális módszerekre alapuló gráfmintaillesztési algoritmusokkal illeszteni.
- 3. Metrikák azonosítása és kategorizálása gráfmintaillesztési stratégiák kiválasztásához.** Olyan metrikákat azonosítottam és kategorizáltam, melyeknek kiemelt hatása van a lokális keresésen alapuló, és az inkrementális gráfmintaillesztési megközelítések teljesítményre és ezáltal befolyásolják a mintaillesztési stratégia kiválasztását [2, 16, 17].

Több modelltranszformációs verseny feladatainak és benchmarkjainak megoldásával igazoltuk a megvalósított általános célú keresési tervre épülő lokális és a hibrid gráfmintaillesztési algoritmusok hatékonyságát [2, 27, 21, 24].

A lokális keresésen alapuló kutatásokat Varró Gergellyel közösen végeztük el, aki lefektette a keresési gráf alapú mintaillesztés alapjait a saját PhD értekezésében [Var08], és ezen túlmenően

az ő munkája volt az erre épülő rekurzív mintaillesztő algoritmus kidolgozása is [18]. A közös munkánkon belül én voltam felelős a hipergráf alapú keresési gráf koncepció általánosításáért és az összes algoritmus ezen megközelítésre való adaptálásáért. A hibrid megközelítés teljes egészében az én munkám.

A keresési stratégiák kiválasztásához szükséges metrikákat Bergmann Gábor és Ráth István kollegáimmal közösen dolgoztuk ki az én vezetésemmel, és ezt az eredményt egyikük sem használja fel saját értekezésében. Együtt dolgoztunk a modelltranszformációk optimalizációján is, hogy azok ipari méretű adatokon is jól skálázódjanak [8].

### 3.2. Kényszerkielégítési problémák gráfmodellek fölött

Megvizsgálva a fellelhető kényszerkielégítési és tervezési tér felderítő keretrendszereket, azt tapasztaltam, hogy jelenleg nincs olyan megközelítés, amely magas szinten támogatná mind (i) a probléma specifikus műveletek definícióját a hatékonyabb állapottér bejárásához, mind pedig a (ii) kényszerhalmaz dinamikus módosításának a lehetőségét oly módon, hogy ne kelljen a megoldást teljesen a kezdetektől újraszámolni. Ez a fajta specifikációs megközelítés jól illeszkedik azon tervezési tér felderítési feladatokhoz, amelyeket strukturális kényszerek és előre meghatározott manipulációs műveletek írnak le.

Kiterjesztettem a kényszerkielégítési problémák definícióját [1, 15] úgy, hogy gráfmintákat vettem be a strukturális (elsőrendű logikai) kényszerek definiálására és gráftranszformációs szabályokkal specifikáltam a lehetséges címkézési műveleteket. Ebben a megközelítésben egy modellt akkor fogadhatunk el megoldásként, ha az kielégíti az összes gráfminta által definiált kényszert. Az egyszerű változó címkézéssel szemben azonban, az állapotot reprezentáló modellt a dedikált gráftranszformációs szabályok módosítják, így érve el az állapotváltozásokat. A megközelitésem így a megszokott véges értékészletű numerikus kényszerkielégítési problémák analógiájában megfogalmazva képes (i) dinamikus hozzáadni és elvenni kényszereket a probléma definíciójából, (ii) megváltoztatni a változók értékészletét a megoldás keresése közben és (iii) egyszerűsíteni a strukturális kényszerek felírását.

**2. tézis** Kidolgoztam egy keretrendszert a dinamikus és flexibilis strukturális kényszerek által definiált kényszerkielégítési feladatok probléma-specifikus keresési műveletekkel történő megoldására.

- 1. Strukturális kényszerkielégítési probléma definiálása gráfmodellek fölött.** Kidolgoztam a gráf modellek fölött értelmezett statikus [15, 29], dinamikus és flexibilis [1] strukturális kényszerkielégítési problémák definícióját.
- 2. Strukturális kényszerkielégítési nyelv gráftranszformációs szabályok fölött.** Kidolgoztam egy gráftranszformációs szabályokra épülő nyelvet [1, 15] a strukturális kényszerkielégítési problémák specifikálására, ahol a kényszereket gráfminták írják le, míg a probléma specifikus műveleteket gráftranszformációs szabályok specifikálják.
- 3. Hatékony megközelítés strukturális kényszerkielégítési problémák megoldására.** Megvalósítottam egy keretrendszert a gráftranszformációs szabályok fölött definiált statikus, dinamikus és flexibilis kényszerkielégítési problémák hatékony, inkrementális gráfmintaillesztésre épülő megoldására [15].
- 4. Heurisztikával támogatott tervezési tér optimalizáció.** Kidolgoztam egy Petri-háló alapú absztrakcióra épülő optimalizációs eljárást a bejárt állapottér csökkentésére [1].

Összehasonlító mérésekkel igazoltuk a megvalósított módszer hatékonyságát és alkalmazhatóságát különböző nyílt forráskódú és ipari kényszerkielégítési keretrendszerekkel szemben [1]. A megvalósított strukturális kényszerkielégítő keretrendszert (VIATRA2 DSE) a tanszéken fejlesztett VIATRA2 [Via] modelltranszformációs eszköz komponenseként valósítottam meg. A megvalósított keretrendszer felhasználja a VIATRA2-ben létrehozott inkrementális gráfminitaillesztő modult, amely Bergmann Gábor PhD munkája.

A tézis folytatásaként Hegedüs Ábel PhD tanulmányai során a már meglévő állapotter bejárasi algoritmusok további optimalizálásán dolgozik, aminek keretében különböző speciális szabályválasztási kritériumokat fogalmazott meg [3, 12].

Végezetül a Petri-háló alapú absztrakció kidolgozása Varró-Gyapay Szilvia és Varró Dániel munkája. Az én munkám alátámasztja az absztrakció gyakorlati alkalmazhatóságát, mivel ezt felhasználva valósítottam meg a heurisztikával vezérelt keresési algoritmusaimat.

### 3.3. Gráftranszformáción alapuló technikák alkalmazása avionikai szoftverrendszerek tervezésére

Megvizsgálva az ARINC 653 konfigurációs leíróinak tervezését segítő eszközöket, megállapítottam, hogy jellemzően csak igen alacsony szintű támogatást nyújtnak a rendszer konfigurációs leíróinak validációjához, annak ellenére, hogy egyes ARINC 653-ra épülő megközelítések több mint 40000 különböző konfigurációs elemet tartalmaznak [Wil07]. Ezen túlmenően az eszközök jellemezően nem támogatják: (i) a magas absztrakciós szintű modelleken történő tervezést, (ii) a tervezési lépések szintjén történő modell validációt és (iii) a DO-178B szabványnak megfelelő nyomonkövethetőségi leírások származtatását.

A felsorolt hiányosságok kiküszöbölésére az Európai Unió által finanszírozott DIANA [DIA] kutatási program keretében megterveztem és megvalósítottam egy komplett modellvezérelt fejlesztési paradigmára épülő keretrendszert, ami képes az ARINC 653-as platformhoz konfigurációs leírók szisztematikus tervezésére [14]. A keretrendszer egy speciális, platform független architektúra leíró modellezési nyelvre épül (PIALD) [DECa], amely támogatja más, az iparban elterjedt architektúra leíró (pl., AADL) és rendszermodellező nyelvek (pl., Matlab Simulink) egyszerű integrációját. Emellett a keretrendszer az alacsony szintű ARINC 653 specifikus konfigurációs információkat egy saját készítésű platform-specifikus, integrált, rendszer leíró modellben (IAM) tárolja. Tekintettel arra, hogy ezt a leképezést a komplexitásából adódóan nem lehet teljesen automatizálni, az egész fejlesztési folyamatot egy interaktív modelltranszformációs folyamatra képeztem le. Maga a folyamat jól definiált, interfész szinten elkülönített tervezési lépésekből áll, amiket egy komplex transzformációs munkafolyamattá lehet szervezni a felhasználó (pl., repülőgépgyártó vagy beszállító) fejlesztési igényeit követve. Utolsó lépésként a keretrendszer képes mind szabványos ARINC 653, mind pedig VxWorks specifikus konfigurációs fájlokat automatikusan származtatni az IAM modellből.

Ennek a munkának a keretében a saját kutatásaim során az alábbi témákra koncentráltam: (i) egy MDE alapú fejlesztési folyamat kidolgozása specifikusan ARINC 653-as konfigurációs leírók tervezésére a DO-178B szabvánnyal konform módon, (ii) modell-alapú hibadetektáló és lokalizáló módszerek adaptálása és kidolgozása, és (iii) a tanúsítványozásnak megfelelő nyomonkövethetőség biztosítása a magas szintű modellekből kiindulva a származtatott konfigurációs leírókig az egész fejlesztési folyamaton keresztül.



**3. tézis** Kidolgoztam egy modellalapú technikák kombinációjára épülő módszert integrált moduláris avionikára épülő, biztonságkritikus szoftvermodulok konfigurációs leíróinak tervezéséhez.

- 1. Tervezési lépések kontraktusai modellvezérelt avionikai fejlesztési folyamatokban.** Követve a DO-297 [RTCa] szabvány által javasolt az avionikai szoftverkomponensek közötti precíz interfészekre alapú szigorú elkülönítést, egy kontraktus nyelvet [6, 14, 26] vezettem be az avionikai szoftvermodulok konfigurációs leíróinak modellalapú fejlesztéséhez.
- 2. Gráfminta alapú tervezési kontraktusok azonnali kiértékelése avionikai rendszerek fejlesztési folyamatában.** A DO-178B által meghatározott korai hibadetektálási ajánlásokat követve megvalósítottam egy inkrementális gráfmintaillesztésre épülő korai hibadetektáló megközelítést, amely támogatja a tervezési lépések kontraktusainak kiértékelését az avionikai rendszerek konfigurációs leíróinak modellvezérelt fejlesztési folyamatában [13, 14].
- 3. Teljeskörű nyomonkövethetőség biztosítása avionikai rendszerek konfigurációs leíróinak modellalapú fejlesztési folyamatában.** Kidolgoztam egy teljeskörű nyomonkövethetőséget megvalósító megoldást az avionikai szoftverek konfigurációs leíróinak fejlesztéséhez. A megközelítés biztosítja a nyomonkövethetőséget a magas szintű architektúráis modellekből kiindulva a leggenerált XML konfigurációs leírókig, megfelelően a DO-178B [26] szabványban előírt követelményeknek [23, 14].

A DIANA projekt keretében megvalósított keretrendszer szisztematikus, modellalapú tervezési paradigmájának alapjait széleskörű nemzetközi együttműködés keretében a DECOS projektben fektették le [DECb] a Hibatűrő Rendszerek Kutatócsoport vezető szerepével, és részben beépült Balogh András PhD munkájába [Bal]. Fontos megjegyezni azonban, hogy a DECOS projektben a célplatform az idővezérelt architektúrára épülő beágyazott rendszerek voltak, míg az én esetemben az ARINC 653-as platform és a DO-178B teljesen más tervezési és tanúsítványozási követelményeket állított.

A tervezési kontraktusok kiértékelését az EMF-INCQUERY [13] keretrendszerrel valósítottam meg, mely a VIATRA2 fejlesztői csapatának és az OptXWare Kft-nek a közös munkája. A keretrendszer implementációban nagy segítségemre volt Monostori Dénes, aki a diplomáját az én szakmai irányításom alatt készítette.

A DIANA projekt keretén belül végzett munkám jelentősége, hogy *adaptáltam az általános modellvezérelt fejlesztési technikákat a civil avionikai szabványokhoz*, megalkotva az ARINC 653-as konfigurációs leírók szisztematikus modellalapú tervezési folyamatát.

## 4. Új tudományos eredmények gyakorlati alkalmazásai

### 4.1. A VIATRA2 modelltranszformációs keretrendszer mintaillesztési moduljai

A VIATRA2 egy általános célú, nyílt forráskódú gráfranszformációs keretrendszer a Méréstechnikai és Információs Rendszerek Tanszék fejlesztésében, mely 2005 óta része az Eclipse [Ecl] alapítvány modellezési projektjének. Az 1. tézis elméleti eredményeire épül az aktuális VIATRA2 keretrendszer lokális gráfmintaillesztő modulja. Ugyancsak az általános célú keresési tervek

koncepciójára épül a VIATRA2 gráftranszformációs modulja is, amely képes a keresési tervből kiindulva a bal és jobb oldalnak megfelelő modellmanipulációs műveleteket származtatni. A hibrid gráfmintaillesztési algoritmus is része a keretrendszernek, amely lehetőséget nyújt a transzformáció tervezőjének, hogy meg tudja határozni az egyes gráfminták illesztéséhez használt algoritmusokat.

Magát a VIATRA2 keretrendszert több nemzetközi kutatási projektben is alkalmaztuk különböző eszköztintegrációs feladatok megoldására (DECOS FP6, DIANA FP6 és MOGENTES FP7 EU projektek), modell validációs célokra (HIDENETS FP6 EU projekt), illetve forráskód szintézisre (SENSORIA FP6 és E-Freight FP7 EU projektek).

#### **4.2. VIATRA2 tervezési tér felderítési keretrendszer**

A 2. tézis eredményeit közvetlenül felhasználtuk a VIATRA2 tervezési tér felderítési (VIATRA2 DSE) keretrendszer megvalósításához, amely elérhető VIATRA2 egy kiegészítéseként. Megvalósításunkat összehasonlítottuk több, korszerű kényszerkielégítési rendszerrel (KORAT, GROOVE és a SICStus Prolog CLP(FD) könyvtára) és azt tapasztaltuk, hogy a leggyorsabbnak bizonyult egyes flexibilis és dinamikus feladatok esetén.

A VIATRA2 DSE keretrendszert felhasználtuk a DIANA projekt keretében is az ARINC 653 konfigurációs leírók tervezése során, ahol is a biztonságkritikus szoftverkomponensek ARINC 653 modulokhoz való automatikus leképezését valósítottuk meg vele.

A keretrendszer elérhető a VIATRA2 tanszéki honlapjáról: <http://viatra.inf.mit.bme.hu>.

#### **4.3. Integrált moduláris avionikai rendszerek modellvezérelt fejlesztése**

A DIANA kutatási program keretében megvalósítottunk egy komplett modellalapú keretrendszert ARINC 653 szabványnak megfelelő konfigurációs leírók szisztematikus tervezéséhez. A projekten belül én voltam a felelős a rendszer által megvalósított több mint 25 lépésből álló leképezés teljes tervezésért és megvalósításáért.

A megvalósított keretrendszert több ipari partner is pozitívan értékelte – így az Embraer, a világ harmadik legnagyobb repülőgépgyártója, a Holland Légügyi Hivatal (NLR) és Portugália legnagyobb repüléstechnológiai fejlesztője, a GMV Avionics – és az általuk adott visszajelzések alapján javított változatot sikeresen mutattuk be több nemzetközi repülőipari konferencián, többek között a 2008-as Farnborough repüléstechnikai bemutatón [35] és a 29. IEEE/AIAA DASC konferencián [14]. A munka folytatásaként, hasonló területen egy új közös kutatási projektbe kezdtünk az Embraer céggel.

#### **4.4. EMF-INCQUERY**

A kutatócsoport legújabb eredménye az EMF-INCQUERY [13,20,9,7] keretrendszer, mely a VIATRA2 technológiával kapcsolatos kutatási eredmények széleskörű, az Eclipse Modeling Framework platformon történő alkalmazását teszi lehetővé. Ezáltal az ebben a disszertációban leírt eredmények – és általában a VIATRA2 technológia – számos nyílt és kereskedelmi termékhez egyszerűen integrálható lesz. A kontraktusok ellenőrzésén túlmenően, Hegedüs Ábellel és Szabó Tamással (MSc diák) megkezdtük a VIATRA2 DSE keretrendszer EMF-INCQUERY-re történő portolását. Az EMF-INCQUERY fejlesztését Ráth István kollégám vezeti és részben Bergmann Gábor PhD munkájára épül.

## 5. Kapcsolódó publikációk

Publikációk száma: 41

Lektorált publikációk száma: 27

Független idézetek száma: 51

### Külföldön megjelent, idegen nyelvű folyóiratcikkek (4)

- [1] Ákos Horváth and Dániel Varró. Dynamic constraint satisfaction problems over models. *International Journal on Software and Systems Modeling*, 11(3):385–408, July 2012. DOI: 10.1007/s10270-010-0185-5, IF = 1,23.
- [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.
- [3] Ábel Hegedüs, Ákos Horváth, and Dániel Varró. Towards guided trajectory exploration of graph transformation systems. *Electronic Communications of the EASST, Petri Nets and Graph Transformations 2010*, 40, August 2011.
- [4] Ákos Horváth, Gergely Varró, and Dániel Varró. Generic Search Plans for Matching Advanced Graph Patterns. *Graph Transformation and Visual Modeling Techniques in ECEASST*, 6:57–68, 2007.

### Magyarországon megjelent, idegen nyelvű folyóiratcikk (1)

- [5] Gergely Varró, Ákos Horváth and Dániel Varró. Automatic generation of transformer plugins by meta-transformations. *Journal of the Scientific Association for Infocommunications Hungary (Híradástechnika)*, (7):40–45, 2006.

### Könyvfejezet (1)

- [6] András Balogh, Gábor Bergmann, György Csertán, László Gönczy, Ákos Horváth, István Majzik, András Patarciza, Balázs Polgár, István Ráth, Dániel Varró, and Gergely Varró. Workflow-Driven Tool Integration Using Model Transformations. In Gregor Engels, Claus Lewerentz, Wilhelm Schaefer, Andy Schuerr, and Bernhard Westfechtel, editors, *Graph Transformations and Model-Driven Engineering*, volume 5765 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 224–248. Springer, 2010. 10.1007/978-3-642-17322-6\_11.

### Nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent idegen nyelvű előadások (12)

- [7] Ábel Hegedüs, Ákos Horváth, István Ráth, and Dániel Varró. Query-driven soft interconnection of EMF models. In *ACM/IEEE 15th International Conference on Model Driven Engineering Languages & Systems*, Innsbruck, Austria, pages 134–150. 2012. Springer. Acceptance rate: 23%.
- [8] Gábor Bergmann, Dóra Horváth, and Ákos Horváth. Applying incremental graph transformation to existing models in relational databases. In *Sixth International Conference on Graph Transformation*, Bremen, Germany, pages 371–385. eptember 2012. Springer.

- [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, Czech Republic, pages 1–8. May 2012. Springer. Acceptance rate: 31%
- [10] Zoltán Ujhelyi, Ákos Horváth, and Dániel Varró. Dynamic backward slicing of model transformations. In *International Conference on Software Testing and Validation, 2012*, Montreal, Canada, pages 1–10. April 2012. IEEE. Acceptance rate: 27%.
- [11] Ábel Hegedüs, Ákos Horváth, István Ráth, Moisés Castelo Branco, and Dániel Varró. Quick fix generation for DSMLs. In *IEEE Symposium on Visual Languages and Human-Centric Computing, VL/HCC 2011*, Pittsburgh, PA, USA, pages 17–24. September 2011. IEEE Computer Society. Acceptance rate: 33%.
- [12] Ábel Hegedüs, Ákos Horváth, István Ráth, and Dániel Varró. A model-driven framework for guided design space exploration. In *26th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE 2011)*, Lawrence, Kansas, USA, pages 173–189. November 2011. IEEE Computer Society. ACM Distinguished Paper Award, Acceptance rate: 15%.
- [13] Gábor Bergmann, Ákos Horváth, István Ráth, Dániel Varró, András Balogh, Zoltán Balogh, and András Ökrös. 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*, volume 6395 of *Lecture Notes in Computer Science*. pages 76–90. Springer, 2010. Acceptance rate: 21%.
- [14] Ákos Horváth, Dániel Varró, and Tobias Schoofs. Model-Driven Development of ARINC 653 Configuration Tables. In *29th IEEE & AIAA Digital Avionics System Conference (DASC)*, pages 6.E.3–1 – 6.E.3–15, Salt Lake City, US, October 2010. IEEE.
- [15] 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%.
- [16] Gábor Bergmann, Ákos Horváth, István Ráth, and Dániel Varró. Efficient Model Transformations by Combining Pattern Matching Strategies. In *Proceeding of the 2nd International Conference on Theory and Practice of Model Transformations*, volume 5563 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 20–34. Springer, 2009. Acceptance rate: 23%.
- [17] Gábor Bergmann, Ákos Horváth, István Ráth, and Dániel Varró. A Benchmark Evaluation of Incremental Pattern Matching in Graph Transformation. In Reiko Heckel and Gabriele Taentzer, editors, *Proc. of ICGT '08, 4th International Conference on Graph Transformation*, volume 5214 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2008. Acceptance rate: 40%.
- [18] Gergely Varró, Ákos Horváth, and Dániel Varró. Recursive Graph Pattern Matching With Magic Sets and Global Search Plans. In A. Schürr, M. Nagl, and A. Zündorf, editors, *Proc. 3rd Intl. Workshop on Applications of Graph Transformation with Industrial Relevance (AGTIVE '07)*, volume 5088 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2008. Acceptance rate: 27%.

**Nemzetközi workshop-kiadványba megjelent idegen nyelvű előadás (10)**

- [19] Gábor Bergmann, Ákos Horváth, István Ráth, and Dániel Varró. *Incremental Evaluation of Model Queries over EMF Models: A Tutorial on EMF-IncQuery*, volume 6698 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 389–390. 2011.
- [20] Gábor Bergmann, Ábel Hegedüs, Ákos Horváth, István Ráth, Zoltán Ujhelyi, and Dániel Varró. Implementing efficient model validation in EMF tools: Tool demonstration. In *26th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE 2011)*, Lawrence, Kansas, USA, November 2011. IEEE Computer Society.
- [21] 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, 2010.
- [22] 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), <http://models2010.ifl.uio.no/tutorials.shtml/Bergmann>.
- [23] Ábel Hegedüs, Zoltán Ujhelyi, István Ráth, and Ákos Horváth. Visualization of Traceability Models with Domain-specific Layouting. In *Proceedings of the Fourth International Workshop on Graph-Based Tools*, 2010.
- [24] Gábor Bergmann and Ákos Horváth. BPMN to BPEL case study solution in VIATRA2. In *5th International Workshop on Graph-Based Tools*, Zürich, Switzerland, July 2009.
- [25] Ákos Horváth. Towards a Two Layered Verification Approach for Compiled Graph Transformation. In Reiko Heckel and Gabriele Taentzer, editors, *Proc. of ICGT '08, 4th International Conference on Graph Transformation*, volume 5214 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2008.
- [26] László Gönczy, István Majzik, Ákos Horváth, Dániel Varró, András Balogh, Zoltán Micskei, and András Pataricza. Tool Support for Engineering Certifiable Software. In *Proc. SafeCert 2008, Int. Workshop on the Certification of Safety-Critical Software Controlled Systems*, Elsevier, pages 68–73, 2008.
- [27] Rubino Geiss, Gabriele Taentzer, Enrico Biermann, Dénes Bisztray, Bernd Bohnet, Iovka Boneva, Artur Boronat, Leif Geiger, Ákos Horváth, Ole Kniemeyer, Tom Mens, and Benjamin Ness. Generation of Sierpinski Triangles: A Case Study for Graph Transformation Tools. In A. Schürr, M. Nagl, and A. Zündorf, editors, *Proc. 3rd Intl. Workshop on Applications of Graph Transformation with Industrial Relevance (AGTIVE '07)*, volume 5088 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2008.
- [28] Ákos Horváth. Automatic Generation of Compiled Model Transformations. In *Proc. of Fifth Conference of PhD Students in Computer Science (CSCS)*, pages 54–55, Szeged, Hungary, Jun. 27-30 2006. Institute of Informatics of the University of Szeged.

**Magyar nyelvű konferencia-előadások (4)**

- [29] Ákos Horváth. Graph Transformation Based Constraint Solving. In *Proceedings of the 16th PhD Minisymposium*, pages 12–15. Department of Measurement and Information Systems, BUTE, 2009.

- [30] Ákos Horváth. Verification of Model Transformation. In *Proceedings of the 15th PhD Minisymposium*, pages 54–58. Department of Measurement and Information Systems, BUTE, 2008.
- [31] Ákos Horváth. Model Transformation Plugins on EMF Models. In *Proceedings of 14th PHD Mini-Symposium*, pages 110–111. Department of Measurement and Information Systems, BUTE, 2007.
- [32] Ákos Horváth. Modelltranszformációk implementációjainka automatikus, transzformáció alapú generálása. szerkesztette Bitay Endre, *XI. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka (FMTU)*, oldal 149–153, Kolozsvár, Románia, Március 18–19. 2006.

### **Elektronikus publikációk, technical report (9)**

- [33] Zoltán Ujhelyi, Ákos Horváth, and Dániel Varró. Generic static analysis of transformation programs. Technical Report TUB-TR-09-EE19, Budapest University of Technology and Economics, June 2009.
- [34] Zoltán Ujhelyi, Ákos Horváth, and Dániel Varró. Static type checking of model transformations by constraint satisfaction. Technical Report TUB-TR-09-EE20, Budapest University of Technology and Economics, June 2009.
- [35] Ákos Horváth, Dániel Varró, and Tobias Schoofs. Model Driven System Development in the Avionics Domain, July 2008. Tutorial track on the 3rd generation IMA Platform at the 46th Farnborough Air Show.
- [36] DIANA Consortium. DC 2.1: Specification of the Development Means for AIDA. Technical report, The DIANA Project, EU FP6, 2008. <http://diana.skysoft.pt>.
- [37] DIANA Consortium. DC 2.5: AIDA System Specification. Technical report, The DIANA Project, EU FP6, 2008. <http://diana.skysoft.pt>.
- [38] DIANA Consortium. DC 3.1: Report on the Definition of the AIDA Development Means. Technical report, The DIANA Project, EU FP6, 2010. <http://diana.skysoft.pt>.
- [39] DIANA Consortium. DC 4.2: Report on the Integration of the AIDA Simulations. Technical report, The DIANA Project, EU FP6, 2010. <http://diana.skysoft.pt>.
- [40] DIANA Consortium. DC 4.4: Report on the Synthesizes of the Project and Lessons Learnt. Technical report, The DIANA Project, EU FP6, 2010. <http://diana.skysoft.pt>.
- [41] DIANA Consortium. AIDA Platform ICD. Technical report, The DIANA Project, EU FP6, 2009. <http://diana.skysoft.pt>.

### **5.1. Köszönetnyilvánítás**

Kutatásaimat nagy mértékben támogatta a magyar CERTIMOT (ERC\_HU-09-01-2010-0003), az Európai Unió DIANA (AERO1-030985), SENSORIA (IST-3-016004) és SecureChange (ICT-FET-231101) kutatási projektek és egy közös projektünk az Embraerrel. Végzetül a munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚMFT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

## Hivatkozások

- [ARI] ARINC - Aeronautical Radio, Incorporated. A653 - Avionics Application Software Standard Interface.
- [AUT] AUTOSAR Consortium. *The AUTOSAR Standard*. <http://www.autosar.org/>.
- [Bal] András Balogh. Model Transformation-based Design of Dependable Systems. PhD Thesis, Budapest, Hungary.
- [BCW12] Marco Brambilla, Jordi Cabot, and Manuel Wimmer. *Model-Driven Software Engineering in Practice*. Synthesis Lectures on Software Engineering. Morgan & Claypool Publishers, 2012.
- [BKM02] Chandrasekhar Boyapati, Sarfraz Khurshid, and Darko Marinov. Korat: Automated testing based on java predicates. In *International Symposium on Software Testing and Analysis (ISSTA)*, pages 123–133. ACM Press, 2002.
- [BOR<sup>+</sup>08] Gábor Bergmann, András Ökrös, István Ráth, Dániel Varró, and Gergely Varró. Incremental pattern matching in the VIATRA transformation system. In *GRaMoT'08, 3rd International Workshop on Graph and Model Transformation*. 30th International Conference on Software Engineering, 2008.
- [CRH] Lawrence Clarck, Terry Ruthruff, and Bary Hogan. Development of Lockheed Martin's, F16 Modular Mission Computer Application Software using MDA . Technical report, Lockheed Martin.
- [DECa] DECOS - Dependable Embedded Components and Systems consortium . The DECOS Platform Independent Metamodel, public deliverable. Technical report.
- [DECb] DECOS project. (Dependable Embedded Components and Systems - EU FP6 Research Project. <http://decos.at>.
- [DIA] DIANA project. Distributed, equipment Independent environment for Advanced avionics Application - EU FP6 Research Project. <http://dianaproject.com>.
- [Ecl] The Eclipse project. [www.eclipse.org](http://www.eclipse.org).
- [GBG<sup>+</sup>06] Rubino Geiß, Gernot Veit Batz, Daniel Grund, Sebastian Hack, and Adam Szalkowski. Grgen: A fast SPO-based graph rewriting tool. In *Proc. of the 3rd International Conference on Graph Transformations (ICGT)*, pages 383–397. Springer, 2006.
- [Int] Intelligent Systems Laboratory, Swedish Institute of Computer Science. Sicstus User's manual (2009). <http://www.sics.se/sicstus/docs/latest4/pdf/sicstus.pdf>.
- [JBK10] Edgar Jakumeit, Sebastian Buchwald, and Moritz Kroll. Grgen.net. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer (STTT)*, 12(3):263–271, July 2010.
- [JT10] Frédéric Jouault and Massimo Tisi. Towards incremental execution of ATL transformations. In *Proceedings of the Third international conference on Theory and practice of model transformations*, ICMT'10, pages 123–137, Berlin, Heidelberg, 2010. Springer-Verlag.

- [KG08] Amogh Kavimandan and Aniruddha Gokhale. Automated middleware qos configuration techniques for distributed real-time and embedded systems. In *Proceedings of the 2008 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, RTAS '08*, pages 93–102, Washington, DC, USA, 2008. IEEE Computer Society.
- [KSLB03] Gabor Karsai, Janos Sztipanovits, Akos Ledeczki, and Ted Bapty. Model-integrated development of embedded software. In *Proceedings of the IEEE*, pages 145–164, January 2003.
- [MS00] Ian Miguel and Qiang Shen. Dynamic flexible constraint satisfaction. *Applied Intelligence*, 13(3), pages 231–245, 2000.
- [Nee01] Sandeep Neema. Analysis of matlab simulink and stateflow data model. March 2001.
- [NNZ00] U. Nickel, J. Niere, and A. Zündorf. Tool demonstration: The FUJABA environment. In *The 22nd International Conference on Software Engineering (ICSE)*, Limerick, Ireland, 2000. ACM Press.
- [Ren04] Arend Rensink. The GROOVE simulator: A tool for state space generation. In *Applications of Graph Transformations with Industrial Relevance (AGTIVE)*, pages 479–485, 2004.
- [Roz97] Grzegorz Rozenberg, editor. *Handbook of Graph Grammars and Computing by Graph Transformation, volume 1: Foundations*. World Scientific, 1997.
- [RTCa] RTCA - Radio Technical Commission for Aeronautic. Integrated Modular Avionics (IMA) Development Guidance and Certification Considerations (DO-297), August 2005.
- [RTCb] RTCA - Radio Technical Commission for Aeronautic. Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification (DO-178B), 1992.
- [Var08] Gergely Varró Varró. *Advanced Techniques for the Implementation of Model Transformation Systems*. PhD thesis, Budapest University of Technology and Economics, Department of Measurement and Information Systems, April 2008.
- [Via] Viatra. Visual Automated model TRANSformations - an official Eclipse GMT project. <http://wiki.eclipse.org/VIATRA2>.
- [VVF05] Gergely Varró, Dániel Varró, and Katalin Friedl. Adaptive Graph Pattern Matching for Model Transformations using Model-sensitive Search Plans. In Gabor Karsai and Gabriele Taentzer, editors, *Proc. of Int. Workshop on Graph and Model Transformation (GraMoT'05)*, volume 152 of *ENTCS*, pages 191–205, Tallinn, Estonia, September 2005. Elsevier.
- [VVS06] Gergely Varró, Dániel Varró, and Andy Schürr. Incremental Graph Pattern Matching: Data Structures and Initial Experiments. In *Proceedings of the Second International Workshop on Graph and Model Transformation*, Electronic Communications of EASST. European Association of Software Science and Techn, September 2006.
- [Wil07] Alex Wilson. The evolving ARINC 653 standard and its application to IMA, November 13th 2007. ARTIST2 meeting on Integrated Modular Avionics, Rome, Italy.
- [WSNW07] Jules White, Douglas Schmidt, Andrey Nechypurenko, and Egon Wuchner. Introduction to the generic eclipse modelling system. *Eclipse Magazine*, (6):11–18, 2007.