



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
MÉRÉSTECHNIKA ÉS INFORMÁCIÓS RENDSZEREK TANSZÉK
HIBATŰRŐ RENDSZEREK KUTATÓCSOPORT

Megbízható rendszerek modell transzformáció alapú fejlesztése

DOKTORI DISSZERTÁCIÓ TÉZISEI

Balogh András
okleveles mérnök-informatikus

Témavezető: Dr. Pataricza András
Konzulens: Dr. Varró Dániel

Budapest 2009.

1. A kutatás előzményei és célkitűzései

Az utóbbi években a beágyazott rendszerek fejlesztésének területén a fő trend a funkcionalitás komplexitásának és spektrumának növekedése volt, miközben a termékek életciklusa jelentősen csökkent. Ezek a hatások szükségessé teszik új, *hatékony fejlesztési módszerek* alkalmazását, melyek lehetővé teszik a rendszerek *komplexitásának* kezelését, a *nem-funkcionális aspektusok* figyelembe vételét, növelik a rendszerfejlesztés *hatékonyságát*, és kompatibilisek a már kialakult szabványokkal, például a *rendszer tanúsításának* támogatásával biztonság-kritikus alkalmazásokban.

A rendszerfejlesztés területén domináns trend a *modellezés* használata, az alkalmazások, platformok, és rendszerek magas szintű (általában grafikus) specifikációja *modellezési nyelvek* segítségével, melyek intuitív de precíz reprezentációt tesznek lehetővé. Az UML (Unified Modeling Language) [Grom] a legelterjedtebb nyelv, bár a kiterjeszhetőség korlátozottsága és a formális szemantika hiánya miatt néhány területen nem terjedt el. Különböző terület-specifikus nyelvek is kialakultak, melyek egyes alkalmazási területek speciális igényeit elégítik ki. Az Object Management Group (OMG) [Gron] egységes modell-alapú fejlesztési módszert specifikált, melyet modell-vezérelt architektúra (Model-driven Architecture - MDA) néven publikáltak. Az MDA folyamat szétválasztja a funkcionális alkalmazás specifikáció, a platform tervezés, és az alkalmazás-platform integráció lépéseit. Utóbbi lépés az első két modell automatikus, atomi transzformációját jelenti.

Annak ellenére, hogy a modellezés kulcsfontosságú a beágyazott rendszerek fejlesztésében, az MDA megközelítés nem terjedt el széles körben, mivel a beágyazott platformok bonyolultsága és a különböző nem-funkcionális és minőségi kényszerek figyelembe vétele nem teszi lehetővé az alkalmazás-platform integráció automatikus végrehajtását. Ennek folyományaként sok esetben a modellezést nem integrálják szorosan a fejlesztési folyamatba, inkább csak dokumentációs és szimulációs célra használják, miközben a végső implementációt kézi kódolással, külön folyamat során készítik el.

Kutatásaim célkitűzése az MDA megközelítés adaptálása és kiegészítése volt, hogy támogassa a megbízható beágyazott rendszerek fejlesztését és lehetővé tegye a különböző nem-funkcionális paraméterek kezelését. Munkám során modell-alapú eszköz fejlesztéshez és módszerekhez kötődő kutatást is végeztem, a modell kezelési és transzformációs megol-

dások hatékonyságának és használhatóságának növelése érdekében. Az alábbi konkrét célkitűzéseket határoztam meg:

1. A rendszerfejlesztés *hatékonyságának növelése* interaktív és fél-automatikus módszerek és eszközök bevezetésével a fejlesztés különböző fázisaiban.
2. A rendszerfejlesztés *kognitív komplexitásának* csökkentése az alkalmazások architektúrális és viselkedési, valamint az implementációs platform aspektusok elkülönítésével (a modell-vezérelt architektúra elvei alapján)
3. A rendszertervek *minőségének javítása* különböző konzisztencia ellenőrzések, analízis és szintézis módszerek bevezetésével.
4. *Modell-vezérelt hardver-szoftver integrációs módszertan* kidolgozása, mely képes összetett célplatformok és különböző nem-funkcionális követelmények kezelésére (például: időzítések, megbízhatóság, költség).
5. *Fejlett nyelvi elemek* kidolgozása a modell transzformációk újrafelhasználhatóságának támogatására.
6. *Tervezési minták végrehajtható specifikációjának* támogatása, ami lehetővé teszi az általános megoldások és bevált módszerek integrációját terület-specifikus modellezési környezetekbe.
7. Különböző *metamodellező környezetek integrációjának* precíz, szemantikán alapuló támogatása.

2. Vizsgálati módszerek

A fenti célkitűzések alapvetően meghatározták a kutatás menetét és az egyes megoldandó részfeladatokat.

Modell-alapú fejlesztést támogató módszerek. Megvizsgáltam a jelenlegi metamodellezési és modell transzformációs megközelítéseket (különösen a VPM [VP03] metamodellező környezetet és a VIATRA2 [Var04] modell transzformációs eszközt). A VPM és VIATRA2 precíz, matematikai alapokon nyugszik, így alkalmasak a modellezés és transzformációk formális specifikálására. A disszertációban az egyes metamodellek és transzformációk ezen formalizmusok segítségével kerülnek specifikálásra.

Megvizsgáltam a beágyazott rendszerek fejlesztéséhez használt fő terület-specifikus nyelveket, és azt találtam, hogy legtöbb az ECore [Foua] metamodellező környezetben – a szabványos MOF (Meta Object Facility) [Groe] egy változata – került specifikálásra.

A MOF és ECore alapú nyelvek támogatására leképzést definiáltam ezen környezetek és a VPM között, valamint formális operációs szemantikát definiáltam gráf transzformációk [EEKR99] és absztrakt állapotgépek [BS03a] segítségével az ECore környezethez.

Azonosítottam különböző továbbfejlesztési lehetőségeket a VIATRA2 környezet transzformációs nyelvében (GT-ASM), és új nyelvi elemeket vezettem be, melyek támogatják az újrafelhasználást és a hatékony transzformáció fejlesztést, illetve ezen keresztül a transzformációk hatékonyabb tesztelését és végrehajtását. Az eredményeket az első tézis foglalja össze.

Kutatómunkámmal az alábbi fő célokat kívántam megvalósítani: a) kiterjeszteni a modell transzformációk használatát komplex környezetekre, b) növelni a transzformáció fejlesztés hatékonyságát és a transzformációs komponensek újrafelhasználhatóságát.

A modell-vezérelt architektúra kiterjesztése. Megvizsgáltam az MDA megközelítést és összehasonlítottam a beágyazott rendszerek területén jellemző fejlesztési módszertanokkal. Ezt a munkát a DECOS (Dependable Embedded Components and Systems) európai projekt keretében végeztem, és ennek eredményeként született meg az *iteratív, interaktív* alkalmazás-platform (vagy hardver-szoftver) integráció koncepciója.

Az iteratív, interaktív leképzés DECOS projektben megalapozott koncepcióját egy prototípus eszköz implementálásával validáltam, majd később más projektben továbbfejlesztésre, kiegészítésre is sor került.

Az új keretrendszer a nem-funkcionális jellemzők ábrázolására is alkalmas modellezési módszert igényelt, ezért alkalmazás-architektúra és platform modellező megoldást definiáltam, melyek integráltan tartalmazzák a nem-funkcionális jellemzők specifikációjának lehetőségét az UML MARTE (Modeling and Analysis of Real-time Embedded Systems) Profilra [Grok] alapozva. A javasolt modellezési formalizmusokat formális, VPM alapú metamodellként adtam meg, ezek a területen jellemző hasonló célú nyelvek közös, egyszerűsített változatának tekinthetők, ezáltal biztosítható a megvalósított módszerek hordozhatósága az egyes specializált nyelvekre is.

A komplex, interaktív leképzés MDA folyamatba történő beillesztése szükségessé tette egy *on-line, korai konzisztencia ellenőrző* módszer és keretrendszer létrehozását, mely lehetővé teszi a (potenciálisan nem teljes) rendszermodellek gyors kiértékelését és visszacsatolást ad a fejlesztő számára a potenciális tervezési hibákról. Megvizsgáltam a jelenlegi megoldásokat, majd egy nyílt, kiterjeszhető ellenőrző keretrendszert készítettem, mely integrálódik a hardver-szoftver integrációs keretrendszerbe. (2. tézis)

Modell-alapú analízis és szintézis. Az iteratív, interaktív hardver-szoftver integrációs megoldás több olyan lépést is tartalmaz, melyek összetett műveletek elvégzését igénylik (például a szoftver komponensek hardver erőforrásokra történő allokációja). A jelenleg használt megoldások legtöbbször manuális végrehajtást tesznek csak lehetővé, vagy heurisztikán alapuló algoritmusokat használnak a lépések végrehajtására.

Magas szintű rendelkezésre állás analízis algoritmust definiáltam, mely lehetővé teszi a rendszer rendelkezésre állásának predikcióját platformfüggetlen és platform-függő (allokált modell) szinten. A módszer egyrészt használható a rendelkezésre állási követelmények szerinti validálásra, másrészt a megbízhatóság-vezérelt allokáció alapjaként szolgál.

A hardver-szoftver allokáció az modell integráció egyik kulcslépése, melyet ma jellemzően kézzel végeznek (például korábbi projektek tapasztalatai, és bevált megoldásai alapján), ami az erőforrások alacsony kihasználásához vezethet. Az allokációt két szinten lehet optimalizálni: a) optimális platform architektúrát kell tervezni az alkalmazás jellemzői

szerint, b) adott platform esetén az allokációt magát kell optimalizálni. A platform architektúra szintézis támogatására egy költség és megbízhatóság alapú megoldást hoztam létre, mely lehetővé teszi a magas szintű platform modell létrehozását ami költség-optimális módon elégti ki a rendszerrel szemben támasztott rendelkezésre állási és teljesítmény követelményeket.

Biztonságkritikus rendszerekben gyakran használnak szinkron, úgynevezett idővezérelt rendszer architektúrát, melyben az allokáció, valamint a taszk és kommunikáció ütemezés statikusan, tervezési időben történik. A jelenlegi fejlesztési folyamatok elválasztják az allokáció és az ütemezés fázisait (gyakran a taszk és kommunikáció ütemezést is), mely szub-optimális megoldásokhoz vezethet teljesítmény és erőforrás kihasználtsági szempontból. Tapasztaltunk azt mutatta, hogy lehetséges az is, hogy az önmagában érvényes, de nem optimális allokáció később meghiúsíthatja az ütemezést. Mivel ezek a lépések összetettek, és nincs lehetőség közvetlen információ visszacsatolásra, a fejlesztőnek mélyen át kell látnia az egyes lépéseket, hogy megtalálja a hiba okát, és feloldhassa a problémákat.

Egylépéses, optimalizáláson alapuló megoldást dolgoztam ki idővezérelt rendszerek allokációjának és ütemezésének támogatására, mely áthidalja az előbb tárgyalt problémákat, és ahelyett, hogy egyszerűen egy érvényes megoldást adna a problémára, optimális allokációt és ütemezést számít ki a fejlesztő által megválasztott és súlyozott szempontok alapján.

3. Új tudományos eredmények

3.1. Modell-alapú eszköz infrastruktúra

A jelenlegi modell-transzformációs rendszerek vizsgálata során azt találtam, hogy bizonyos területeken lehetséges a transzformáció fejlesztés hatékonyságának növelése. Emellett, a különböző metamodellezési megközelítések integrálásával ki lehet alakítani egy közös, formális alapot a transzformációk és modell alapú eszközök migrációjához, teszteléséhez, és ellenőrzéséhez.

1. Tézis. *Új megoldásokat fejlesztettem a gráf-transzformációk különböző szintű komponálásához.*

A következő új elemeket dolgoztam ki:

1.1. *. Gráfminta és transzformációs szabály szintű módszereket dolgoztam ki a tradicionális gráf-transzformációs megközelítés kiegészítésével a komponálás támogatására és a transzformáció specifikációk komplexitásának csökkentésére. [2, 7, 8, 10]*

1.2. *. Megoldást adtam gráf-transzformációk transzformáció szintű kaskádosítására ezzel csökkentve a futási időt és lehetővé téve a transzformációk újrafelhasználását. [9]*

1.3. *. Formális, végrehajtható operációs szemantikát dolgoztam ki az ECore metamodellező keretrendszerhez. [2, 7, 9]*

Ez a tézis a disszertáció 3. fejezetén alapul.

Fontos hangsúlyozni, hogy annak ellenére, hogy a disszertáció témája a megbízható rendszerek fejlesztése, az ebben a tézisben leírt eredményeket közvetlenül lehet alkalmazni bármely modell-alapú fejlesztő környezetben.

3.2. Minőség-vezérelt modell-alapú fejlesztés

Megvizsgáltam a tradicionális MDA megközelítést és azt találtam, hogy az abban definiált egyszerű, atomi alkalmazás-platform integrációs megoldás nem alkalmazható olyan komplex célterületeken, mint a megbízható beágyazott rendszerek, mivel több hiányossága is van: a) nem támogatja a nem-funkcionális követelmények kezelését, b) nem támogatja a interaktív működést, és c) nem tartalmaz integrált konzisztencia ellenőrzést és verifikációs-validációs megoldásokat.

2. Tézis. *Új megoldásokat dolgoztam ki megbízható elosztott beágyazott rendszerek modell-alapú fejlesztéséhez.*

A következő új elemeket dolgoztam ki:

2.1. . *Terület specifikus alkalmazás architektúra, platform, és rendszer-modellezési stílust javasoltam, mely a jelenlegi szabványos modellezési megközelítésekkel összhangban áll, és szigorú komponens-orientált szemléletet követ, valamint támogatja a funkcionális és nem-funkcionális aspektusok ábrázolását is. [14, 19–21]*

2.2. . *Kiterjesztettem a tradicionális MDA megközelítést egy iteratív, interaktív hardver-szoftver integrációs keretrendszerrel, mely képes komplex rendszerarchitektúrák és modellek kezelésére. [3, 4, 13, 14, 19, 21]*

2.3. . *Statikus kényszer ellenőrző keretrendszert fejlesztettem ki, mely a hardver-szoftver integrációs keretrendszerbe épülve lehetővé teszi a tervezési hibák és potenciális problémák korai jelzését a rendszer tervezője felé. [3, 11, 17, 18, 21]*

Ez a tézis a disszertáció 5. fejezetén alapul.

3.3. Megbízhatóság-vezérelt szintézis

Az alkalmazás-platform integráció egyik kulcslépése a szoftver komponensek futtató egységekhez való allokációja. Olyan új modell szintű módszereket javaslok, melyek integrálhatóak a modell-alapú fejlesztési környezetbe, és matematikai optimalizáláson alapuló architektúra tervezési, allokációs és ütemezési támogatást nyújtanak.

3. Tézis. *Formális analízis és szintézis módszereket definiáltam valósidejű beágyazott rendszerek modell-alapú fejlesztéséhez.*

A következő módszerek kerültek kidolgozásra:

3.1. . *Magas szintű rendelkezésre állás analízis módszert javaslok, mely a fejlesztés korai szakaszában is lehetővé teszi a rendszer rendelkezésre állásának becslését. [4, 5]*

3.2. . *Költség alapú módszert dolgoztam ki elosztott rendszerek magas szintű architektúrájának szintéziséhez, mely biztosítja a költség optimum megtalálását az időzítési és rendelkezésre állási követelmények betartásával. [1, 6]*

3.3. . *Több aspektusú optimalizáláson alapuló megoldást dolgoztam ki idővezérelt beágyazott rendszerek allokációjának és ütemezésének szintéziséhez. [3, 15, 18]*

Ez a tézis a disszertáció 6. fejezetén alapul.

4. Az tudományos eredmények hasznosítása

A disszertációban leírt tudományos eredmények gyakorlati hasznosíthatóságának bemutatására több különböző eszközt készítettünk (a többes szám a kutatócsoportban tevékenykedő diplomatervező és doktorandusz hallgatókat, valamint az OptXware Kft-nél dolgozó munkatársaimat jelöli), melyek a beágyazott rendszerek modell-alapú fejlesztését támogatják.

A VIATRA2 modell transzformációs keretrendszer. A VIATRA2 jelenlegi változata minden, a disszertáció 3. fejezetében bemutatott gráf-transzformációs konstrukciót támogat. A keretrendszert sikeresen alkalmaztuk több ipari és akadémiai kutatási projektben.

Az ECore szemantika definíció egy új komponens alapját képezi (*Viatra-EMF*), mely lehetővé teszi az ECore/EMF és a VIATRA2 környezetek összekapcsolását. Az eszköz első változata elkészült és várhatóan több projektben is alkalmazni fogjuk, valamint a hivatalos, nyílt VIATRA2 programcsomag részévé fog válni.

Iteratív, interaktív hardver-szoftver integráció. Az interaktív, iteratív hardver-szoftver integrációs keretrendszer első változatát (a disszertáció 5. fejezetében leírt alapokra építve) a DECOS projekt [DEC] keretében valósítottuk meg. Erre épülve a keretrendszert a DIANA projektben [DIA] továbbfejlesztettük, és alkalmazását tervezzük az új INDEXYS projektben [Conc] is. Utóbbi projekt az előző alkalmazási területeknél (elosztott biztonságkritikus rendszerek) szélesebb spektrumot céloz, az egymagos rendszerektől az elosztott vezetékes és vezetékek nélküli hálózatokig.

Allokáció és ütemezés. A disszertáció 6. fejezetében bemutatott allokációs és ütemezési megoldást több projekt során hasznosítottuk. A DECOS projekt keretében két idővezérelt protokollon is vizsgáltuk az algoritmus működését, jelenleg pedig egy ipari projektben, AutoSAR [Alla] környezetben használjuk FlexRay [Con05] hálózatok ütemezésére.

Továbbfejlesztési lehetőségek. A jelenleg futó INDEXYS [Conc] európai uniós projekt keretében egy modell-alapú eszközkészletet fejlesztünk, mely felhasználja a disszertációban ismertetett eredményeket,

és a beágyazott rendszerek fejlesztéséhez újgenerációs eszközöket fog biztosítani. A különböző modellező, analízis, és szintézis eszközök közötti integrációt szorosabbá, ugyanakkor testre szabhatóvá kívánjuk tenni. A fejlesztési munka fontos része egy csapatmunka-támogató keretrendszer létrehozása, mely lehetővé teszi az egyes fejlesztési elemek (dokumentáció, modellek, forráskód, stb.) valós idejű megosztását és szimultán szerkesztését.

Folyamatban van az ütemezési módszer alkalmazása különböző kommunikációs protokollokra, figyelembe véve azok specifikumait. Bizonyos célterületeken hierarchikus a kommunikációs séma, a jövőben ezt is ki szeretnénk használni az ütemezés hatékonyságának növelésére. Az ütemező eszközök fejlesztésének másik előremutató területe a több hálózattól álló rendszerek globális ütemezése, szemben a jelenlegi egy hálózatot támogató megoldásokkal.

5. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

Könyvfejezet

- [1] András Balogh, László Gönczy, and András Pataricza. *Verification and Validation of Nonfunctional Aspects in Enterprise Modeling*, chapter 12, pages 257–298. Idea Group Publishing, 2006.

Folyóiratcikkek

- [2] András Balogh and Dániel Varró. The model transformation language of the VIATRA2 framework. *Science of Programming*, 68(3):187–207, October 2007.
- [3] Shariful Islam, Neeraj Suri, András Pataricza András Balogh, and György Csertán. An optimization based design for integrated dependable real-time embedded systems. *Design Automation for Embedded Systems*, 2009. In press.

Cikkek nemzetközi konferencia kiadványban

- [4] Michalis Anastasopoulos and András Balogh. Model-driven development of particle system families. In *Proc. of the 4th International Workshop on Model-Based Methodologies for Pervasive and Embedded Software. (MOMPES 2007)*, pages 102–114. IEEE Computer Society, 2007.
- [5] András Balogh and András Pataricza. Quality-of-service analysis of dependable application models. In *5th International Workshop on Critical Systems Development Using Modeling Languages (CSDUML 2006)*, pages 1–12, 2006.
- [6] András Balogh, András Pataricza, and Dániel Varró. Model-driven optimization of enterprise application and service deployment. In *Proc. Of the 2nd International Service Availability Symposium (ISAS 2005)*, pages 84–98, 2005.
- [7] András Balogh and Dániel Varró. Advanced model transformation language constructs in the VIATRA2 framework. In *ACM Symposium on Applied Computing*, pages 1280–1287, 2006.

- [8] András Balogh and Dániel Varró. Pattern composition in graph transformation rules. In *(First) European Workshop on Composition of Model Transformations*, pages 33–38, 2006.
- [9] András Balogh, Gergely Varró, Dániel Varró, and András Patariicza. Compiling model transformations to EJB3-specific transformer plugins. In *ACM Symposium on Applied Computing*, pages 1288–1295, 2006.
- [10] Wolfgang Herzner, András Balogh, and György Csertán. Design patterns for domain-specific application modeling. In *Proc. of the DECOS/ERCIM Workshop on EUROMICRO 2006.*, Dubrovnik, Croatia, August 2006.
- [11] Wolfgang Herzner, Bernhard Hubert, András Balogh, and György Csertán. The DECOS tool-chain: Model-based development of distributed embedded safety-critical real-time systems. In *Proc. of the DECOS/ERCIM Workshop on SAFECOMP 2006.*, Gdansk, Poland, September 2006.
- [12] Wolfgang Herzner, Marting Schlager, Thierry Le Sergent, Bernhard Huber, Md. Shariful Islam, Neeraj Suri, and András Balogh. From model-based design to deployment of integrated, embedded, real-time systems: The DECOS tool-chain. In *Informationstagung Mikroelektronik ME 2006 Workshop*, volume 43, ISBN: 3-85133-040-4, pages 204–213. Austrian Electrotechnical Association, 2006.
- [13] Wolfgang Herzner, Rupert Schlick, Bernhard Leiner Martin Schlager, András Balogh, György Csertán, Alain Le Guennec, Thierry Le Sergent, Neeraj Suri, Shariful Islam, and Bernhard Huber. Model-based development of distributed embedded real-time systems with the decos tool-chain. In *SAE 2007 AeroTech Congress Exhibition*, 2007.
- [14] Md. Shariful Islam, György Csertán, András Balogh, Wolfgang Herzner, Thierry Le Sergent, András Patariicza, and Neeraj Suri. A sw-hw integration process for the generation of platform specific models. In *Informationstagung Mikroelektronik ME 2006 Workshop*, volume 43, ISBN: 3-85133-040-4, pages 194–203. Austrian Electrotechnical Association, 2006.

- [15] András Pataricza, András Balogh, and Judit Rácz. Scheduling of embedded time-triggered systems. In *2nd Workshop on Engineering Fault-Tolerant Systems*, pages 44–49. ACM Digital Library, 2007.
- [16] András Pataricza, András Balogh, and István Ráth. Automated verification and validation of domain specific languages and their applications. In *Proc. of 4th World Congress on Software Quality*, Sept. 15-18 2008.

Cikkek helyi részvételű konferencia kiadványban

- [17] András Balogh. Verification of hardware-software integration processes. In *Proceedings of the 14th PhD Mini-Symposium*, pages 58–61, 2007.
- [18] András Balogh, András Pataricza, György Csertán, and Balázs Polgár. Model-based analysis and synthesis methods for dependable embedded systems. In *Regional Conference on Embedded and Ambient Systems RCEAS 2007*, pages 123–130. ISBN: 978-963-8431-98-1, November 2007.
- [19] András Balogh, András Pataricza, Gergely Pintér, Michalis Anastopoulos Áron Sisak, and Jaejon Lee. Model-driven specification, analysis, and realization of assisted living systems. In *Regional Conference on Embedded and Ambient Systems RCEAS 2007*, pages 123–130. ISBN: 978-963-8431-98-1, November 2007.

Előadások, technical reportok

- [20] András Balogh, György Csertán, Orsolya Dobán, István Majzik, András Pataricza, Dániel Varró, Szilvia Varró-Gyapay, Md. Shariful Islam, and Georg Weissenbacher. Design methodology and specification model. Technical report, Budapest University of Technology and Economics, 2005.
- [21] Eila Ovaska, András Balogh, Sergio Campos, A. Noguero, András Pataricza, Kari Tiensyrja, and J. Vicedo. Model and quality driven embedded systems engineering. Technical report, VTT Technical Research Centre of Finland, ISBN: 978-951-38-7336-3, 2009.

- [22] András Pataricza, Balázs Polgár, Szilvia Varró-Gyapay, András Balogh, and György Csertán. Formal checking of metamodels and models. Invited talk at DECOS/ERCIM workshop on SAFECOMP 2006, Gdansk, Poland, September 2006.

6. Hivatkozások

- [Alla] AUTOSAR Alliance. The official AUTOSAR site. <http://www.autosar.org/>.
- [BS03a] Egon Börger and Robert Stärk. *Abstract State Machines. A method for High-Level System Design and Analysis*. Springer-Verlag, 2003.
- [Conc] INDEXYS Consortium. Distributed, equipment independent environment for advanced avionic applications. <http://indexys.eu/>.
- [Con05] FlexRay Consortium. FlexRay communications system protocol specification version 2.1, 2005.
- [DEC] DECOS. Dependable components and systems. an eu framework 6 integrated project. <http://www.decos.at/>.
- [DIA] DIANA. Industrial exploitation of the genesys cross-domain architecture. <http://www.dianaproject.com/>.
- [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.
- [Foua] Eclipse Foundation. Eclipse Modeling Framework Homepage. <http://www.eclipse.org/emf>.
- [Groε] The Object Management Group. Meta object facility (mof) core specification version 2.0. <http://www.omg.org/docs/formal/06-01-01.pdf>.

- [Grok] The Object Management Group. Uml profile for modeling and analysis of real-time and embedded systems (marte). <http://www.omg.org/docs/ptc/08-06-08.pdf>.
- [Grom] The Object Management Group. Unified Modeling Language 2.0. <http://www.omg.org/technology/documents/formal/uml.htm>.
- [Gron] The Object Management Group. Website. <http://www.omg.org/>.
- [Var04] Dániel Varró. *Automated Model Transformations for the Analysis of IT Systems*. PhD thesis, Budapest University of Technology and Economics, Department of Measurement and Information Systems, May 2004.
- [VP03] Dániel Varró and András Pataricza. VPM: A visual, precise and multilevel metamodeling framework for describing mathematical domains and UML. *Journal of Software and Systems Modeling*, 2(3):187–210, October 2003.