

Raport științific

privind implementarea proiectului PN-II-ID-PCE-2011-3-0919 în perioada octombrie 2011 - septembrie 2016

Activitatea de cercetare nu se rezuma la publicarea de noi rezultate (in articole si carti). Desi raportul va insista pe prezentarea publicatiilor, noi nu am neglijat nici celelalte aspecte care apar si sunt necesare in activitatea de cercetare: invatarea unor noi subiecte si tehnici, identificarea unor subiecte pe care le putem aborda cu ceea ce știm deja, scrierea și rescrierea versiunilor de articole pana ele devin publicabile, participarea la actiunile unor comunitati stiintifice prin discutii si vizite de lucru, prezentarea si discutarea ideilor la diferite conferinte, recenzarea si discutarea articolelor altor cercetatori, implicarea in comitete de program pentru conferinte si echipe redactionale ale unor reviste. Toate acestea definesc un univers complex care faciliteaza aparitia unor noi idei si permit prezenta noastra in frontul cercetarii si a cunoasterii (speram in primele linii, acolo unde se nasc noi tendinte si abordari).

Varful aisbergului este reprezentat de articolele publicate si prezentate in cadrul acestui proiect. Diseminarea rezultatelor cercetărilor a fost o preocupare permanentă pentru noi. Rezultatele activităților de cercetare desfășurate în cadrul proiectului au fost diseminate atât în reviste cunoscute si cu o buna reputatie, cat si in cadrul unor manifestări științifice cu o buna vizibilitate (inclusiv conferinte cotate A si B conform ERA Rank).

Prezentăm lista publicațiilor apărute în perioada oct. 2011 – sep. 2016, după care menționăm pe scurt rezultatele din aceste publicații.

Lucrări în publicații ISI:

- [J1] A. Alexandru, G. Ciobanu. Nominal Event Structures. *Romanian Journal of Information Science and Technology*. vol. 15(2), 79-90, 2012.
- [J2] A. Alexandru, G. Ciobanu. Nominal Semantics of Mobility. *Romanian Journal of Information Science and Technology*. vol. 15(3), 171-214, 2012.
- [J3] A. Alexandru, G. Ciobanu. Nominal Groups and their Homomorphism Theorems, *Fundamenta Informaticae*, vol. 131(3-4), 279-298, 2014.
- [J4] A. Alexandru, G. Ciobanu. A Nominal Approach for Fusion Calculus. *Romanian Journal of Information Science and Technology*, vol. 17(3), 265-288, 2014.
- [J5] A. Alexandru, G. Ciobanu. Generalized Multisets: From ZF to FSM. *Computing and Informatics*, vol. 34(5), 1133-1150, 2015.
- [J6] A. Alexandru, G. Ciobanu. Abstract Interpretations in the Framework of Invariant Sets. *Fundamenta Informaticae*, vol. 144(1), 1-22, 2016.
- [J7] A. Alexandru, G. Ciobanu. Finitely Supported Subgroups of a Nominal Group. *Mathematical Reports*, vol. 18/68(2), 233-246, 2016.
- [J8] O. Agrigoroaiei, G. Ciobanu. Rewriting Systems Over Indexed Multisets. *The Computer Journal*, vol. 57(1), 165-179, 2014.

- [J9] B. Aman, G. Ciobanu. Solving a Weak NP-complete Problem in Polynomial Time by Using Mutual Mobile Membrane Systems. *Acta Informatica*, vol. 48(7-8), 409-415, 2011.
- [J10] B. Aman, G. Ciobanu. Properties of Enhanced Mobile Membranes Via Coloured Petri Nets. *Information Processing Letters*, vol. 112, 243-248, 2012.
- [J11] B. Aman, G. Ciobanu. Expressing Mobile Ambients in Temporal Logic of Actions, *Proceedings of the Romanian Academy - Series A: Mathematics, Physics, Technical Sciences, Information Science*, vol. 15(1), 95-104, 2014.
- [J12] B. Aman, G. Ciobanu. Verification of Membrane Systems With Delays via Petri Nets With Delays. *Theoretical Computer Science*, vol.598, 87-101, 2015.
- [J13] B. Aman, P. Battyanyi, G. Ciobanu, G. Vaszil. Simulating P Systems With Membrane Dissolution in a Chemical Calculus. *Natural Computing*, 1-12, 2016. doi:10.1007/s11047-016-9570-5.
- [J14] B. Aman, G. Ciobanu. Modelling and Verification of Weighted Spiking Neural Systems. *Theoretical Computer Science*, vol. 623, 92-102, 2016. doi: 10.1016/j.tcs.2015.11.005.
- [J15] B. Aman, G. Ciobanu. Efficiently Solving the Bin Packing Problem Through Bio-Inspired Mobility. *Acta Informatica*, 1-11, 2016. doi:10.1007/s00236-016-0264-3.
- [J16] G. Ciobanu. General Patterns of Interaction in Stochastic Fusion. *Natural Computing*, vol. 12(3), 429-439, 2013.
- [J17] G. Ciobanu, R Horne, V. Sassone. Minimal Type Inference for Linked Data Consumers. *Journal of Logical and Algebraic Methods in Programming*, vol. 84(4), 485-504, 2015.
- [J18] G. Ciobanu, M. Koutny. Modelling and Analysis of Biological Systems. *Theoretical Computer Science*, vol. 431, 2-3, 2012.
- [J19] G. Ciobanu, M. Koutny. PerTiMo: A Model of Spatial Migration with Safe Access Permissions. *The Computer Journal*, vol. 58(5), 1041-1060, 2015.
- [J20] G. Ciobanu, M. Koutny, L.J. Steggles. Strategy Based Semantics for Mobility With Time and Access Permissions. *Formal Aspects of Computing* vol. 27(3), 525-549, 2015.
- [J21] G. Ciobanu, S.N. Krishna. Enhanced Mobile Membranes: Computability Results. *Theory of Computing Systems*, vol. 48, 715-729, 2011.
- [J22] G. Ciobanu, C. Juravle. Flexible Software Architecture and Language for Mobile Agents. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, vol. 24, 559-571, 2012.
- [J23] G. Ciobanu, A. Rotaru. Verifying Vehicle Control Systems by Using Process Calculi. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, vol. 21(1), 41-49, 2016. doi: 10.1504/IJAHUC.2016.074388.
- [J24] G. Ciobanu, D. Sburlan. Scenario Based P Systems. *International Journal of Unconventional Computing*, vol. 9(5-6), 351-366, 2013.

[J25] G. Ciobanu, E.N. Todoran. Correct Metric Semantics for a Language Inspired by DNA Computing. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, vol. 28(11), 3042-3060, 2016.

[J26] G. Ciobanu, C. Vaideanu. Similarity Relations in Fuzzy Attribute-Oriented Concept Lattices. *Fuzzy Sets and Systems*, vol.275, 88-109, 2015.

Lucrări în reviste indexate în Web of Science:

[W1] A. Alexandru, G. Ciobanu. Nominal Fusion Calculus. *SYNASC 2012, IEEE Computer Society*, 376-384, 2012.

[W2] A. Alexandru, G. Ciobanu. Algebraic Properties of Generalized Multisets. *SYNASC 2013, IEEE Computer Society Press*, 369-377, 2013.

[W3] A. Alexandru, G. Ciobanu. Static Analysis in Finitely Supported Mathematics. *SYNASC 2015, IEEE Computer Society Press*, 312-319, 2015.

[W4] A. Alexandru, G. Ciobanu. Defining Finitely Supported Mathematics over Sets with Atoms. *SMSV 2015, CEUR-WS*, vol. 1356, 382-395, 2015.

[W5] O. Agrigoroaiei, G. Ciobanu. Quantitative Causality in Membrane Systems. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 7184, 62-72, 2012.

[W6] B. Aman, G. Ciobanu. Coordinating Parallel Mobile Ambients to Solve SAT Problem in Polynomial Number of Steps. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 7274, 122-136, 2012.

[W7] B. Aman, G. Ciobanu. Mobile Membranes with Objects on Surface as Colored Petri Nets. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 7762, 128-144, 2013.

[W8] B. Aman, G. Ciobanu. Mobile Membranes: Computability and Complexity. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8049, 59-75, 2013.

[W9] B. Aman, G. Ciobanu. Real-Time Migration Properties of rTiMo Verified in Uppaal. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8137, 31-45, 2013.

[W10] B. Aman, G. Ciobanu, S.N. Krishna. Solving the 4QBF Problem in Polynomial Time by Using the Biological-Inspired Mobility. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 7753, 432-443, 2013.

[W11] B. Aman, G. Ciobanu, M. Koutny. Behavioural Equivalences over Migrating Processes with Timers. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 7273, 52-66, 2012.

[W12] B. Aman, G. Ciobanu, G.M. Pinna. Timed Catalytic Petri Nets. *SYNASC 2012, IEEE Computer Society*, 319-326, 2012.

[W13] B. Aman, G. Ciobanu. Behavioural Types Inspired by Cellular Thresholds, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8368, 1-15, 2014.

[W14] B. Aman, G. Ciobanu. Behavioural Equivalences in Real-Time P Systems. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8340, 88-100, 2014.

[W15] B. Aman, G. Ciobanu. Timed Mobility and Timed Communication for Critical Systems. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9128, 146-161, 2015.

- [W16] B. Aman, G. Ciobanu. Verification of Bounded Real-Time Distributed Systems With Mobility. *CEUR-WS*, vol. 1431, 109-120, 2015.
- [W17] B. Aman, G. Ciobanu. BioMaxP: A Formal Approach for Cellular Ion Pumps. *Computer Science Journal of Moldova*, vol. 23(2), 2015.
- [W18] B. Aman, G. Ciobanu. Mobility Types For Cloud Computing. *Communications in Computer and Information Science*, vol. 514, 43-53, 2015.
- [W19] B. Aman, G. Ciobanu. Automated Verification of Stochastic Spiking Neural P Systems. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9504, 77-91, 2015.
- [W20] G. Ciobanu. TiMo. Timed Mobility in Distributed Systems. *SYNASC 2013, IEEE Computer Society*, 5-10, 2014.
- [W21] G. Ciobanu. Timeout Interaction and Migration in Distributed Systems. *CEUR-WS*, vol. 1431, 79-80, 2015.
- [W22] G. Ciobanu, T.S. Hoang, A. Stefanescu. From TiMo to Event-B: Event-Driven Timed Mobility, *ICECCS 2014, IEEE Computer Society*, 1-10, 2014.
- [W23] G. Ciobanu, R. Horne. A Provenance Tracking Model for Data Updates. *Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science*, vol. 91, 31-44, 2012.
- [W24] G. Ciobanu, R. Horne. Non-interleaving Operational Semantics for Geographically Replicated Databases, *SYNASC 2013, IEEE Computer Society*, 440-447, 2014.
- [W25] G. Ciobanu, R. Horne. Behavioural Analysis of Sessions Using the Calculus of Structures. *Ershov Memorial Conference 2015, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9609, 91-106, 2016.
- [W26] G. Ciobanu, R. Horne, V. Sassone. Local Type Checking for Linked Data Consumers. *Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science*, vol. 123, 19-33, 2013.
- [W27] G. Ciobanu, R. Horne, V. Sassone. Descriptive Types for Linked Data Resources. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8974, 1-25, 2015.
- [W28] G. Ciobanu, R. Horne, C. Vaideanu. Extracting Threshold Conceptual Structures from Web Documents. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8577, 130-144, 2014.
- [W29] G. Ciobanu, M. Koutny, J. Steggle. A Timed Mobility Semantics based on Rewriting Strategies. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 7504, 141-155, 2012.
- [W30] G. Ciobanu, G.M. Pinna. Catalytic Petri Nets are Turing Complete. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 7183, 192-203, 2012.
- [W31] G. Ciobanu, D. Rusu. A Formal Topology of Web Classification. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8577, 145-158, 2014.
- [W32] G. Ciobanu, A. Rotaru. PHASE: A Stochastic Formalism for Phase-Type Distributions. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8829, 91-106, 2014.
- [W33] G. Ciobanu, A. Rotaru. A Probabilistic Logic for pTiMo. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8049, 141-158, 2013.

- [W34] G. Ciobanu, M. Zheng. Verifying TiMo Systems in PAT. *ICECCS 2013, IEEE Computer Society*, 121-124, 2013.
- [W35] R. Horne, A. Tiu, B. Aman, G. Ciobanu. Private Names in Non-Commutative Logic. *CONCUR 2016, Leibniz International Proceedings in Informatics*, vol. 59, 31:1-31:16, 2016. doi: 10.4230/LIPIcs.CONCUR.2016.31.
- [W36] S.N. Krishna, B. Aman, G. Ciobanu. On the Computability Power of Membrane Systems with Controlled Mobility. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 7318, 627-636, 2012.
- [W37] R. Pagliarini, O. Agrigoroaiei, G. Ciobanu, V. Manca. An Analysis of Correlative and Static Causality in P Systems. *Lecture Notes in Computer Science*, vol.7762, 323-341, 2013.

Alte articole:

- [A1] B. Aman, G. Ciobanu. Behavioural Observations of Cell Movements With Timing Aspects. *Nano Communication Networks*, vol. 6(3), 96-102, 2015.
- [A2] R. Horne, A. Tiu, B. Aman, G. Ciobanu. *Private Names in Non-Commutative Logic*. CoRR abs/1602.06043, 2016.

Lucrări prezentate la conferințe internaționale:

- [P1] A. Alexandru, G. Ciobanu. Nominal Fusion Calculus. *14th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC 2012)*, Timisoara, Romania, 26-29 September 2012.
- [P2] A. Alexandru, G. Ciobanu. Countable Sets in Finitely Supported Mathematics. *Conference on Mathematical Foundations of Informatics (MFOI 2016)*, Vadul lui Voda, Republic of Moldova, 25-29 July 2016.
- [P3] A. Alexandru, G. Ciobanu. Finitely Supported Mathematics. *Conference on Complex Systems (CCS 2016)*, Beurs Van Berlage, Amsterdam, The Netherlands, 19-22 September 2016.
- [P4] B. Aman, G. Ciobanu. Mobile Membranes with Objects on Surface as Colored Petri Nets. *13th Conference on Membrane Computing (CMC 2012)*, Budapest, Hungary, 28-31 August 2012.
- [P5] B. Aman, G. Ciobanu. Behavioural Equivalences over Mobile Membranes with Delays. *13th Italian Conference on Theoretical Computer Science (ICTCS 2012)*, Villa Toeplitz, Varese, Italy, 19-21 Septmeber 2012.
- [P6] B. Aman, G. Ciobanu. Behavioural Equivalences in Real-Time P Systems. *14th International Conference on Membrane Computing 2013 (CMC 2013)*, Chișinău, Republic of Moldova, 20-23 August 2013.
- [P7] B. Aman, G. Ciobanu. Mobile Membranes: Computability and Complexity. *10th International Colloquium on Theoretical Aspects of Computing (ICTAC 2013)*, Shanghai, China, 4-6 September 2013.

- [P8] B. Aman, G. Ciobanu. Behavioural Types Inspired by Cellular Thresholds. *2nd International Workshop on Behavioural Types (Beat II 2013)*, Madrid, Spain, 23-24 September 2013.
- [P9] B. Aman, G. Ciobanu. Real-Time Migration Properties of rTiMo Verified in Uppaal. *11th International Conference on Software Engineering and Formal Methods (SEFM 2013)*, Madrid, Spain, 25-27 September 2013.
- [P10] B. Aman, G. Ciobanu, G.M. Pinna. Timed Catalytic Petri Nets. *14th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC 2012)*, Timisoara, Romania, 26-29 September 2012.
- [P11] B. Aman, G. Ciobanu. Life-Death Ratio Approach by a Multiset-Based Type System, *12th Brainstorming Week on Membrane Computing (BWMC 2014)*, Sevilla, Spain, 3-7 February 2014.
- [P12] B. Aman, G. Ciobanu. Mobility Types for Cloud Computing. *8th Congress of Romanian Mathematicians, (CMR 2015)*, Iasi, Romania, 26-30 June 2015.
- [P13] B. Aman, G. Ciobanu. Automated Verification of Stochastic Spiking Neural P Systems. *16th International Conference on Membrane Computing (CMC 2015)*, Valencia, Spain, 17-21 August 2015.
- [P14] B. Aman, G. Ciobanu. Type Inference for Ratio Control Multiset-Based Systems. *22nd International Conference on Types for Proofs and Programs (TYPES 2016)*, Novi Sad, Serbia, 23-26 May 2016.
- [P15] B. Aman, G. Ciobanu. Computational Power of Protein Networks. *17th International Conference on Membrane Computing (CMC 2016)*, Milano, Italy, 25-29 July 2016.
- [P16] G. Ciobanu. TiMo in Timișoara. *15th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC 2013)*, Timisoara, Romania, 23-26 September 2013.
- [P17] G. Ciobanu. Computational Power of Chemical Kinetics in Living Cells. *8th International Conference on Bio-inspired Information and Communications Technologies (BICT 2014)*, Boston, USA, 1-3 December 2014.
- [P18] G. Ciobanu. Probabilistic Logic for Timed Migration. *8th Congress of Romanian Mathematicians (CMR 2015)*, Iasi, Romania, 26-30 June 2015.
- [P19] G. Ciobanu, R. Horne, V. Sassone. Local Type Checking for Linked Data Consumers. *9th International Workshop on Automated Specification and Verification of Web Systems (WWW 2013)*, Florence, Italy, 6th of June, 2013.
- [P20] G. Ciobanu, A. Rotaru. A Probabilistic Logic for pTiMo. *10th International Colloquium on Theoretical Aspects of Computing (ICTAC 2013)*, Shanghai, China, 4-6 September 2013.
- [P21] G. Ciobanu, A. Rotaru. Phase-Type Approximations for Non-Markovian Systems: A Case Study. *4th Workshop on Formal Methods in the Development of Software, (WS-FMDS 2014)*, Grenoble, France, 1-2 September 2014.

[P22] G. Ciobanu, E.N. Todoran. Relating Two Metric Semantics for Parallel Rewriting of Multisets. *14th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC 2012)*, Timisoara, Romania, 26-29 September 2012.

[P23] G. Ciobanu, M. Zheng. Verifying TiMo systems in PAT. *18th International Conference on Engineering of Complex Computer Systems (ICECCS 2013)*, Singapore 17-19 July 2013.

[P24] R. Pagliarini, O. Agrigoroaiei, G. Ciobanu, V. Manca. An Analysis of Correlative and Quantitative Causality in P Systems. *13th Conference on Membrane Computing (CMC 2012)*, Budapest, Hungary, 28-31 August 2012.

Volume publicate:

[B1] A. Alexandru, G. Ciobanu. *Finitely Supported Mathematics: An introduction*, Springer, 185 pages, 2016, ISBN 978-3-319-42281-7. <http://www.springer.com/gp/book/9783319422817>.

[B2] B. Aman, G. Ciobanu. *Mobility in Process Calculi and Natural Computing*. Springer, XIII+208 pages, 2011. <http://www.springerlink.com/content/978-3-642-24867-2>.

Volume editate:

[E1] G. Ciobanu (Ed.). Membrane Computing and Biologically Inspired Process Calculi. *Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science*, vol. 100, 2012.

[E2] G. Ciobanu, M. Koutny (Eds.). Modelling and Analysis of Biological Systems. *Theoretical Computer Science*, vol. 431, 2012.

[E3] G. Ciobanu, D. Mery (Eds.). Proceedings of 11th International Colloquium on Theoretical Aspects of Computing – ICTAC2014, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8687, 2014.

Rapoarte tehnice:

[TR1] B. Aman, G. Ciobanu. Solving Weak NP-Complete Problems in Polynomial Time with Mutual Mobile Membranes. *FML-11-02*, 26p., 2011. <http://iit.iit.tuiasi.ro/TR/reports/fml1102.pdf>.

[TR2] G. Ciobanu, M. Koutny, J. Steggles. A Timed Mobility Semantics based on Rewriting Strategies. School of Computing Science, University of Newcastle upon Tyne, 2012. *School of Computing Science Technical Report Series 1341*. <http://www.ncl.ac.uk/computing/research/publication/186735>.

[TR3] G. Ciobanu, A. Rotaru. A Probabilistic Query Language for Migrating Processes with Timers. *FML-12-01*, 31p., Nov. 2012. <http://iit.iit.tuiasi.ro/TR/reports/fml1201.pdf>.

[TR4] G.Ciobanu, A. Rotaru. Stochastic Process Calculi for Human-Computer Interaction. *FML-13-01*, 30p., Feb. 2013. <http://iit.iit.tuiasi.ro/TR/reports/fml1301.pdf>.

[TR5] G. Ciobanu, A. Rotaru. Phase-Type Approximations for Non-Markovian Systems. *FML-14-01*, 35p., June. 2014. <http://iit.iit.tuiasi.ro/TR/reports/fml1401.pdf>

În [J1] am prezentat conceptul de structuri de evenimente („event structures”) în cadrul modelului permutativ Fraenkel-Mostowski din teoria mulțimilor. Prin folosirea unor tehnici specifice din logica nominală, am introdus și studiat structuri de evenimente nominale („nominal event structures”). Am discutat analogia dintre rezultatele obținute folosind axiomele Fraenkel-Mostowski ale teoriei mulțimilor și cele obținute folosind axiomele Zermelo-Fraenkel ale teoriei mulțimilor.

Prin folosirea unor tehnici nominale, am definit pentru pi-calcul o semantică nominală [J2]. Am analizat comportamentul operatorilor de legare „new” și „input” din pi-calcul, descriși folosind operatori din logica nominală, precum „abstracția nominală”. Lucrarea conține și comparații de expresivitate între semantica nominală și alte semantici cunoscute pentru pi-calcul. Am arătat că semantica nominală și semantica „late” ale pi-calculului au aceeași putere de expresie.

Am introdus și studiat grupurile nominale [J3], demonstrând câteva proprietăți algebrice ale lor, în particular proprietăți ale centrului unui grup nominal, proprietăți ale produsului coroană dintre două grupuri nominale, proprietăți ale subgrupurilor și subgrupurilor normale ale unui grup nominal. Lucrarea a fost centrată pe proprietățile homomorfismelor nominale (în particular, teoremele de izomorfism, corespondență și scufundare pentru grupuri nominale) și pe studierea legăturii între rezultatele obținute în teoriile Fraenkel-Mostowski și Zermelo-Fraenkel ale mulțimilor.

Am introdus o semantică nominală pentru versiunea monadică a calculului de fuziune (monadic fusion calculus sau update calculus) [J4]. Am prezentat un set de reguli de tranziție compacte în cadrul Fraenkel-Mostowski prin utilizarea unui cuantificator nominal specific introdus de Gabbay și Pitts. Mai precis, în semantica nominală a calculului de fuziune regulile de tranziție sunt exprimate folosind o mixare de operatori de legare în locul condițiilor laterale de freshness. Prin folosirea câtorva tehnici nominale, am demonstrat echivalența dintre noua semantică nominală și semantica originală a calculului de fuziune monadic.

Am studiat multiseturile generalizate (multiseturi care permit multiplicități negative) [J5] atât în cadrul Zermelo-Fraenkel cât și în Matematica Finit Suportată (FSM). Am extins noțiunea de multiset generalizat peste un alfabet finit, și l-am înlocuit cu noțiunea de multiset generalizat algebric finit suportat peste un alfabet posibil infinit. Am analizat corespondența dintre unele proprietățile ale multiseturilor generalizate obținute în FSM unde sunt permise doar obiecte finit suportate și cele obținute în cadrul clasic Zermelo-Fraenkel.

Am definit o teorie de interpretări abstracte în cadrul de lucru al mulțimilor invariante [J6] prin translatarea noțiunii de latică și conexiune Galois în acest spațiu de lucru, și prin prezentarea proprietăților în termeni de obiecte finit suportate. Am

introdus noțiunile de relație de corectitudine invariantă și funcție de reprezentare invariantă și am stabilit o relație între aceste noțiuni și conexiunile Galois invariante. De asemenea am prezentat tehnici specifice de aproximare a punctele fixe minimale pentru funcții de tranziție finit suportate.

De asemenea am definit, pentru un grup invariant, noțiunea de subgrup finit suportat [J7] și am prezentat câteva proprietăți algebrice ale acestor subgrupuri. Am demonstrat că familia tuturor subgrupurilor finit suportate dintr-un grup invariant formează o latice invariantă completă și un domeniu algebric invariant.

Am studiat multiseturi indexate în contextul sistemelor de rescriere pentru multiseturi, indecșii fiind utili pentru identificarea pasului de execuție în care o regulă a fost aplicată [J8]. Am arătat că evoluția unui sistem de rescriere pentru multiseturi este reflectată cu precizie în versiunea indexată, extinzând acest rezultat în contextul folosirii paralelismului maximal. Am studiat situațiile în care aplicarea regulilor indexate poate fi amânată, și am definit o relație de echivalență bazată pe aceste situații. De asemenea, am introdus noțiunile de cauză și șiruri cauzale și am arătat cum, folosind indecși, se poate descompune o evoluție în șiruri cauzale independente.

Sistemele membranare [Păun02, Păun10], numite și P sisteme, reprezintă un formalism pentru modelarea sistemelor dinamice concurente. P sistemele sunt un model de calcul inspirat din procesul de evoluție al celulelor, combinând evoluția contextuală cu rescrierea paralelă și distribuită de multiseturi pentru a obține puterea mașinilor Turing. În [J9] am prezentat, prin intermediul membranelor mobile mutuale, o soluție polinomială semi-uniformă pentru o problemă slab NP-completă: problema partiționării. Un P sistem efectuează un calcul prin evoluția de la o configurație inițială, aplicând reguli în mod maximal paralel și oprindu-se în momentul în care nici o regulă nu mai poate fi aplicată. Configurația în care se oprește conține rezultatul calculului efectuat. Sistemele cu membrane mobile reprezintă o variantă a P sistemelor cu membrane active în care evoluția membranelor este dată prin operații inspirate din biologie: endocitoză și exocitoză. Interacțiunile într-un astfel de sistem au loc în principal la nivelul structurii ierarhice a membranelor. În cazul membranelor mobile mutuale aceste operații au loc atunci când există o cooperare între membrane, reprezentată de existența unor obiecte împreună cu propriile componente în interiorul respectivelor membrane. Pentru anumite clase de membrane mobile există deja în literatură rezultate privind complexitatea (a se vedea [PaAl06]). Lucrarea [J9] contribuie la consolidarea teoriei complexității în cazul mobilității în sisteme membranare. Principalul rezultat al lucrării este demonstrația faptului că problema partiționării unei mulțimi în 2 submulțimi cu sume egale poate fi rezolvată folosind o familie semi-uniformă de sisteme cu membrane mobile mutuale, în timp liniar relativ la mărimea intrării. În raportul tehnic [TR1] am realizat o extindere a lucrării [J9], anume am prezentat soluții polinomiale semi-uniforme pentru o varietate de probleme NP-complete prin intermediul membranelor mobile mutuale. Pe lângă problema partiționării, am introdus în [TR1] soluții polinomiale și pentru problema rucsacului („knapsack problem”) și problema sumei de submulțimi („subset sum”); detalii privind aceste probleme se pot consulta în [GaJo79]. Pentru fiecare soluție construită am precizat concret corespondența între instanțierea problemei considerate și parametrii definatorii ai sistemelor membranare.

Am analizat proprietăți computaționale ale membranelor mobile extinse realizând o reprezentare a acestora în rețele Petri colorate [J10]. Reprezentarea reflectă structura paralelismului utilizat și în același timp este invariantă la proprietățile de mărginire, accesibilitate și corectitudine. Am prezentat un model biologic al mobilității unei bacterii cu ajutorul unui sistem membranar extins; am utilizat reprezentarea sa ca rețea Petri colorată pentru a obține o simulare în CPN Tools (<http://cs.au.dk/CPnets/>), un soft complex pentru editarea, simularea și analiza rețelelor Petri colorate.

Am prezentat o modelare formală și o implementare a ambienților mobili, un formalism folosit pentru descrierea mobilității în sistemele distribuite, în logica temporală a acțiunilor, o logică pentru specificarea și verificarea sistemelor concurente [J11].

Am studiat anumite proprietăți ale sistemelor membranare (P systems) folosind tehnici specifice și un program software dezvoltat pentru rețelele Petri colorate (coloured Petri nets) [J12]. Am caracterizat unele subclase ale sistemelor membranare în care diverse proprietăți calitative (accesibilitate, vivacitate) și proprietăți cantitative (mărginire) sunt decidabile. Am stabilit o corespondență formală între două sisteme de rescriere multiset (sistemele membranare cu temporizare și rețelele Petri cu temporizare), și am demonstrat o corespondență operațională între ele. Pentru ambele formalisme, rețelele Petri și sistemele membranare, am demonstrat că adăugând temporizări nu este crescută puterea de expresie; totuși, ambele formalisme devin mai flexibile în descrierea fenomenelor moleculare unde timpul reprezintă o resursă critică.

Am definit o traducere a sistemelor membranare, posibil cu reguli cu promotori/inhibitori, relații de prioritate și dizolvare de membrane, în formule ale calculului chimic astfel încât finalizare evoluției în membrane corespunde finalizării secvențelor de reducere ale formulelor și invers [J13]. Asta înseamnă că rezultate similare se pot obține legat de evoluția celor două tipuri de sisteme.

Am definit o traducere formală corectă între P sisteme neuronale cu vârfuri ("spikes") și sinapse cu greutate într-o clasă de automate cu timp sigur [J14]. Această relație permite verificarea câtorva proprietăți, atât cantitative cât și calitative, folosind tehnici și instrumente dezvoltate pentru automatele cu timp.

După ce anterior am considerat posibilitatea de a folosi mobilitatea de inspirație biologică pentru a rezolva o problemă slab NP-completă (problema partițiilor), în [J15] am definit o soluție semi-uniform polinomială pentru a problemă tare NP-completă (împărțirea în coșuri) folosind tehnici din calculul membranar. Soluția este posibilă prin folosirea membranelor mobile și a diviziunii membrane elementare.

Am definit o versiune stochastică a calculului de fuziune („fusion calculus”) [J16]. Natura stochastică este evidentă în sistemele de tranziții etichetate ce definesc semantica operațională, unde etichetele conțin și ratele corespunzătoare distribuțiilor exponențiale. Am extins hiperbisimilaritatea la calculul de fuziune stochastic și am demonstrat că hiperechivalența este o congruență.

Am oferit o introducere în Rețeaua de Date Conectate (Web of Linked Data) din perspectiva unui dezvoltator Web care ar dori să construiască o aplicație folosind Linked Data [J17]. Am identificat o slăbiciune în prezentarea stivei, și anume o lipsă

de limbaje script specifice domeniului pentru crearea de procese de fundal care să consume Linked Data. Pentru a corecta această slăbiciune, am creat un limbaj script cu un sistem de tipuri simplu dar adecvat. Am dovedit că sistemul nostru de tipuri este algoritmic și deci poate fi folosit pentru a deduce tipul minimal. Am demonstrat de asemenea rezultate de tip reducere subiect (subject reduction) și siguranța tipurilor (type safety), care justifică afirmația noastră că limbajul definit este tipat static și că nu lansează erori de bază de tip execuție. Am arătat cu cercetarea noastră respectă recomandările W3C despre Linked Data, și deci sintaxa noastră este accesibilă programatorilor Web.

Contribuțiile din volumul jurnalului "Theoretical Computer Science" (cotat ISI) [E2], ce conține variante extinse ale unor lucrări selecționate dintre cele prezentate la edițiile 2009-2011 ale workshopului MeCBIC (Membrane Computing and Biologically Inspired Process Calculi), sunt prezentate și clasificate în [J18]. Contribuțiile prezentate la ediția 2012 a workshopului MeCBIC sunt publicate în [E1].

Am introdus o algebra de procese (PerTiMo) în care procesele sunt capabile să migreze între diferite locații explicite și în care două procese pot comunica doar dacă sunt prezente la aceeași locație și, în plus, au drepturi de acces adecvate pentru a comunica folosind un canal comun [J19]. Drepturile de acces pot fi obținute sau pierdute prin migrarea de la o locație la alta. Am caracterizat toate situațiile posibile în care un proces are garanția de a avea acces sigur în toate mediile posibile. În acest mod, se pot construi și modela sisteme în care procesele nu sunt blocate (deadlocked) din cauza lipsei de schimbare dinamică a drepturilor de acces.

Am definit un nou model semantic pentru algebra de procese TiMo folosind logica de rescriere RL (Rewriting Logic) și strategii, cu scopul de a oferi o fundație pentru instrumentele software; în particular, strategiile sunt folosite pentru a captura pasul de evoluție local maximal paralel al unei specificații TiMo care anterior necesita folosirea de reguli bazate pe premise negative [J20]. Am extins acest model RL cu drepturi de acces pentru a dezvolta un nou model semantic pentru PerTiMo. Am dovedit formal că aceste modele semantice sunt solide și complete relativ la semantica operațională originală de la care am pornit. Am prezentat câteva exemple care ilustrează cum modelele RL create pentru TiMo și PerTiMo pot fi implementate în sistemul de rescriere bazat pe strategie Elan și am ilustrat o serie de proprietăți (comportamentale) care pot fi analizate folosind un asemenea instrument software

În lucrarea [J21] am studiat puterea de calcul a sistemelor de membrane mobile extinse. Această clasă de sisteme membranare a fost propusă pentru descrierea unor mecanisme biologice ale sistemului imunitar. Operațiile de mobilitate folosite sunt endocitoza, exocitoza, endocitoza forțată și exocitoza forțată. Puterea de calcul echivalentă cu a mașinilor Turing se obține cu sisteme de 12 membrane, pe când sistemele de 8 membrane sunt capabile să descrie clasa PsETOL, iar cele cu 3 membrane pot să descrie clasa PsMAT.

Pornind de la un formalism cu timpi de interacțiune și locații explicite, am prezentat o arhitectură soft flexibilă și un limbaj pentru sisteme de agenți mobili [J22]. Limbajul suportă specificația unui sistem distribuit (anume agenții și distribuția lor fizică) și permite o evoluție temporală a agenților în acest cadru distribuit.

Am studiat siguranța sistemelor de control ale mașinilor prin descrierea interacțiunilor dintre mașini într-un mod modular și compozițional [J23]. O asemenea descriere permite simplificarea procesului complex de verificare care implică controlul deciziilor legate de accelerare, frânare, schimbarea benzii de mers și distanța de frânare. Ne-am ocupat de problema ajustării vitezei mașinii pentru a putea menține o distanță optimă față de celelalte mașini de pe aceeași bandă. Componentele sistemului de control sunt reprezentate ca procese în algebra de procese Comunicative Secvențiale („Communicating Sequential Processes”), iar operatorul compozițional paralel este folosit pentru descrierea întregului sistem. Proprietățile de siguranță sunt verificate formal prin folosirea Concurrency Workbench din carul instrumentului New Century.

Am definit și studiat P sisteme bazate pe scenarii („Scenario Based P Systems”), un model de calcul inspirat din căile și rețelele metabolice [J24]. Pornind de la definiția unui P sistem clasic ce folosește obiecte și reguli de rescriere multiset, am definit expresii regulate capabile să surprindă dependențele cauzale dintre diferite execuții ale regulilor. Rezultatele prezentate demonstrează puterea de calcul a acestui model.

Am studiat un limbaj similar cu algebra de procese introdusă de Cardelli pentru calculul DNA [J25]. Pentru acest limbaj am definit o nouă semantică denotațională prin folosirea de spații metrice complete în care diferite funcții semantice sunt definite ca puncte fixe ale unor mapări corespunzătoare de nivel înalt. Am comparat această semantică denotațională cu o semantică operațională și am stabilit o relație formală între ele prin folosirea unui operator abstract și a argumentului de punct fix. În acest mod, am demonstrat corectitudinea semanticii denotaționale cu respect la semantica operațională.

Am definit noi tipuri de relații de similaritate între obiecte și atribute în lățice de concepte fuzzy orientate-atribut [J26]. Am studiat cum aceste similarități sunt conectate folosind definițiile și considerând teorema de reducere dintre lățicele de concepte fuzzy izotone și antitone. Am făcut o comparație între două relații care măsoară similaritatea conceptelor orientate fuzzy. Am folosit aceste relații în factorizarea lățicei de concepte fuzzy orientate-atribut pentru a-i reduce complexitatea.

Am definit o semantică nominală pentru calculul de fuziune [W1, P1]. Am reprezentat variabilele din calculul de fuziune sub formă de atomi în modelul axiomatic Fraenkel-Mostowski, iar operatorul „scope” sub forma unei abstracții nominale. Am obținut astfel reguli de tranziție compacte în care condițiile asociate regulilor sunt înlocuite de o mixare corespunzătoare a operatorilor de legare „forall” și „new”. Am demonstrat că relațiile de congruență nominal structurală și congruență structurală ale calculului de fuziune sunt echivalente. De asemenea, semantica nominală și semantica uzuală (Parrow-Victor) ale calculului de fuziune au aceeași putere expresivă.

În [W2] am studiat multiseturile generalizate (definite ca funcții de la un alfabet finit către mulțimea tuturor numerelor întregi) în teoria Zermelo-Fraenkel a mulțimilor și în Reverse Mathematics. Am demonstrat că mulțimea tuturor multiseturilor generalizate peste un alfabet finit este un grup abelian liber, finit generat și lățiceal

ordonat, deducând astfel din teoria grupurilor ordonate o serie de proprietăți ale multiseturilor generalizate. De asemenea am translatat câteva proprietăți ale multiseturilor generalizate în cadrul axiomatic Fraenkel-Mostowski.

Am definit o teorie a interpretărilor abstracte care este consistentă cu principiile de construcție a Matematicii Finit Suportate (Finitely Supported Mathematics - FSM) [W3]. Am translatat noțiunile de latici și conexiuni Galois în cadrul seturilor invariante, și am prezentat proprietățile lor în termeni de obiecte finit suportate. Am introdus noțiunile de relație invariantă corectă și funcție invariantă de reprezentare, am accentuat o echivalență între ele, și am stabilit o relație între aceste noțiuni și conexiunile Galois. Am definit tehnici de extensie și îngustare pentru aproximarea celor mai mici puncte fixe ale funcțiilor de tranziție finit suportate.

Am definit Matematica Finit Suportată (FSM) utilizând acțiuni specifice ale grupurilor de permutări ale unei mulțimi de atomi peste mulțimi Zermelo-Fraenkel [W4]. O asemenea matematică generalizează matematica clasică Zermelo-Fraenkel și reprezintă un cadru adecvat de a lucra cu structuri (infinite) în termeni de obiecte finit suportate. Am dezvoltat algoritmi generali de traducere a rezultatelor din matematica Zermelo-Fraenkel în cadrul FSM.

Fără a recurge la o traducere într-un alt formalism cum ar fi cel al structurilor de evenimente, am introdus noțiunile de cauzalitate specifică și generală peste multiseturi de obiecte și de reguli în cadrul sistemelor membranare tranziționale [W5]. Am definit cauzalitatea specifică ca fiind obținută la nivelul unei tranziții fixate prin impunerea de condiții de minimalitate, iar cea generală ca fiind obținută prin impunerea de condiții similare fără a necesita fixarea unei tranziții. Am demonstrat că putem obține cauzalitatea generală prin reunirea cauzelor specifice și apoi am introdus și o procedură inductivă pentru obținerea cauzalității generale fără a recurge la cea specifică, folosind o teoremă de caracterizare. În final am obținut o caracterizare relativ la cauzalitatea generală prin care putem decide dacă un multiset de obiecte poate fi obținut dintr-un alt multiset dat (decidabilitatea accesibilității parțiale).

Am utilizat tehnici provenind din domeniul sistemelor membranare în cadrul formalismului ambienților mobili pentru a rezolva probleme NP complete în număr polinomial de pași (cu costul creșterii dimensiunii spațiului de soluționare) [W6]. Formalismul utilizat este cel al ambienților mobili cu coordonare și paralelism. Am demonstrat că în acest formalism putem da o soluție semi-uniformă pentru problema satisfiabilității booleene (problema SAT) și am prezentat un exemplu concret pentru un caz cu trei clauze și trei variabile.

Am studiat membranele mobile cu obiecte pe suprafață și am folosit această clasă de membrane mobile pentru a modela degradarea lipoproteinei de joasă densitate [W7, P4]. Am construit o translație între acest formalism și rețelele Petri colorate și, utilizând un soft numit CPN Tools, am analizat o serie de proprietăți importante ale membranelor mobile: „reachability, boundedness, liveness, fairness”.

Membranele mobile reprezintă o variantă de P sisteme în care principalele reguli de evoluție sunt de inspirație biologică. Am studiat puterea de calcul a membranelor mobile, obținând un rezultat de calculabilitate optim: trei membrane sunt suficiente pentru a obține o putere de calcul echivalentă cu cea a mașinilor Turing [W8, P7]. În

cea ce privește complexitatea, am prezentat o soluție semi-uniform polinomială pentru o problemă tare NP-completă (problema SAT) prin utilizarea numai a operațiilor de endocitoză, exocitoză și diviziune elementară. De asemenea am demonstrat că folosind doar aceste operații putem prezenta o soluție semi-uniform polinomială pentru problema 4QBF [W10]. Astfel am reușit să arătăm că sistemele de membrane mobile pot fi folosite pentru a rezolva probleme care se află la nivelul patru al ierarhiei polinomiale.

Am extins familia de formalisme TiMo prin definirea unei versiuni cu timp real numită rTiMo [W9, P9]. Constrângerile de timp real sunt folosite pentru a controla migrarea și comunicarea într-un sistem distribuit cu timp real. Pentru a putea verifica unele proprietăți ale sistemelor complexe mobile descrise în rTiMo, am definit o relație între rețelele rTiMo și o clasă de automate temporale („timed safety automata”). Această conexiune permite verificarea unor proprietăți temporale ale proceselor cu timp real care migrează prin folosirea simulatorului Uppaal (<http://www.uppaal.org/>).

Am prezentat o abordare în care evoluția proceselor mobile exprimate în TiMo este caracterizată de ceasuri locale ce operează independent și de durata migrației proceselor între locații [W11]. Am definit și investigat diferite echivalențe comportamentale între procesele ce migrează în sisteme distribuite, în termeni de timpi locali.

Am considerat sisteme membranare catalitice și rețele Petri catalitice peste care am introdus o noțiune discretă de temporalitate care modelează timpul scurs între consumarea și apariția reactanților [W12, P10]. Am obținut două formalisme numite „tCatMS” și „tCatPN”. Am stabilit legături formale între aceste formalisme și am caracterizat anumite subclase în care diferite proprietăți sunt decidabile și pot fi analizate utilizând softul CPN Tools.

Având ca inspirație pompa de sodiu-potasiu, am introdus și studiat un sistem de tipuri cu praguri într-un formalism de rescriere multiset inspirat din biologie [W13,P8]. Un asemenea sistem de tipuri poate ajuta la evitarea erorilor în definiția unui model formal folosit pentru modelarea și verificarea unor procese biologice. Pentru acest sistem de tipuri am demonstrat corectitudinea evoluției. De asemenea am prezentat o procedură de determinare a tipului unui sistem [P9].

Am definit o extensie cu timp real a P sistemelor, un formalism de rescriere multiset, în care fiecare membrană și obiect are atașată o durată de viață, și am folosit aceste durate pentru a defini și studia diverse echivalențe comportamentale [W14,P6]. De asemenea am stabilit condiții suficiente și necesare pentru a garanta evoluția în timp a unui asemenea sistem.

Pentru a ilustra caracteristicile TiMo, am descris un sistem de control a cailor ferate [W15]. Am definit niște echivalențe comportamentale folosind multiseturi de acțiuni care se pot întâmpla într-un interval de timp (până la un timp limită). De asemenea, am definit bisimularea tare limitată în timp (strong time-bounded bisimulation) și bisimularea tare deschisă limitată în timp (strong open time-bounded bisimulation), și am demonstrat că ultima este o congruență. Folosind diferite bisimulări peste comportamentul sistemelor cu timp real, putem verifica care sunt mai apropiate de un comportament optim și sigur.

Am extins TiMo prin considerarea constrângerilor de timp ca intervale mărginite pentru a putea modela incertitudinea întârzierilor migrățiilor și comunicațiilor agenților plasați în locațiile unui sistem distribuit [W16]. Am definit semantica operațională și am ilustrat noul limbaj cu un exemplu detaliat pentru care am folosit sisteme software pentru a-i analiza proprietățile temporale.

Am studiat celulele vii ca structuri complexe de pompe de ioni care lucrează în paralel pentru a asigura funcționarea fiziologică optimă [W17]. Pentru a modela un asemenea sistem de pompe, am definit un formalism numit BioMaxP care permite lucrul cu multiseturi de ioni, o interpretare explicită a transportului (de la interior la exterior, și de la exterior la interior) în funcție de numărul de ioni existenți, și o execuție maximal paralelă a pompelor implicate.

Am propus un sistem de tipuri de mobilitate pentru descrierea și verificarea sistemelor distribuite în care procesele sunt rugate să migreze între locațiile unde interacțiunile locale importante sunt necesare [W18]. Am folosit o versiune simplificată a pi-calculului distribuit pentru a defini tipurile de mobilitate. Noutatea acestei abordări este că noi considerăm secvențele de migrare ca tipuri globale, și investigăm scenariile în care procesele trebuie să urmeze o asemenea secvență de migrări între câteva locații. Sistemul de tipuri garantează câteva proprietăți printre care și soliditatea (soundness).

Am translatat o versiune restrânsă a P sistemelor stochastice neuronale cu impulsuri și care folosesc o distribuție uniformă, într-o rețea de automate cu timp, demonstrând că o asemenea translatare conservă fidel comportamentul lor [W19]. Această relație permite verificarea câtorva proprietăți (atât calitative cât și cantitative) folosind extensia statistică a verificatorului de modele din programul software complex Uppaal.

Am prezentat TiMo, un formalism simplu și expresiv, care este o versiune simplificată a pi-calculului distribuit [W20]. TiMo se dorește a fi o punte între abordările teoretice existente ale algebrelor de procese și viitoarele limbaje realiste pentru sisteme mulți-agent. Am dezvoltat un cadru de lucru general pentru a discuta despre sistemele specificate în TiMo [W22]. Am folosit metoda de modelare Event-B ca o țintă pentru translatarea specificațiilor TiMo. Ulterior, am verificat proprietăți ale sistemelor folosind demonstratorul de teoreme și verificatorul de modele integrate în platforma Rodin din Event-B. Properitatea principală a codării noastre este că include un model generic pentru sintaxa și semantica TiMo, și un model concret ce corespunde specificațiilor TiMo. Remarcăm faptul că această lucrare a primit titlu de „Cea Mai Bună Lucrare” la conferința de rang A numită ICECCS 2014.

Am introdus și studiat o algebră de procese numită TiMo [W21]. O extensie probabilistică atribuie probabilități tranzițiilor care descriu comportamentul rețelelor TiMo prin rezolvarea nondeterminismului care apare în mișcarea și comunicarea proceselor, precum și în selecția locațiilor active [P14]. Am definit o nouă logică numită PLTM (Probabilistic Logic for Timed Mobility) care este capabilă să descrie anumite aspecte care nu sunt frecvent întâlnite în alte logici, cum ar fi capacitatea de a verifica proprietăți care fac referire explicită la anumite locații și procese, de impunere de constrângeri temporale peste ceasuri locale (marginii superioare finite

sau infinite, independent pentru fiecare locație), de definire a unor găzdi de acțiuni complexe peste multiseturi de acțiuni și proprietăți pentru comportamente tranzitorii și care duc spre stări de echilibru. Am prezentat un algoritm de verificare pentru PLTM, și i-am determinat complexitatea de timp. Deoarece PLTM operează la nivelul lanțurilor Markov cu timp discret, poate fi de asemenea aplicată și altor algebre de procese care implică locații, migrarea proceselor și comunicare.

Pentru sistemele centrate pe date, depistarea provenienței este în mod particular importantă când sistemul este deschis și descentralizat, cum ar fi „Web of Linked Data”. Am definit o algebră de procese în care este modelată actualizarea datelor („data updates”) [W23]. Semantica operațională consideră că datele și update-urile interacționează concurent. De asemenea, semantica operațională este utilă în depistarea provenienței datelor și a update-uri realizate. Pentru algebra de procese definită am creat un model corect și complet bazat pe idealuri de DAG-uri serial-paralel.

Modelele operaționale, spre exemplu sistemele tranziționale etichetate, au tendința să impună o semantică interleaving, pentru a serializa tranzacțiile [W24]. Pentru a evita această limitare, am definit un model operațional care permite o formă slabă a noțiunii de consistență pentru bazele de date distribuite geografic. Am redus timpii garantați de protocolul TrueTime din Spanner la dependențe cauzale care sunt specificare într-un calcul formal.

Folosind ca punct de plecare calculul structurilor am analizat comportamentul sesiunilor [W25]. Abordarea implică specificarea sesiunilor globale și locale inspirate de limbajul Scribble. Am adăugat formalismului un nou operator pentru sincronizarea părților unui protocol care trebuie tratate atomic. În primul rând, formalismul poate fi folosit pentru a determina dacă sesiunile locale pot fi compuse într-o manieră tipată sigură astfel încât sesiunile să se finalizeze cu bine. În al doilea rând, formalismul definește o relație de subtipare pentru sesiuni care permite ca dependențele cauzale să fie slăbite și păstrarea potențialului de terminare. Rezultatele de consistență și complexitate apar folosind teoria demonstrației („proof theory”).

Am oferit o introducere pentru „Web of Linked Data” din perspectiva unui dezvoltator Web care dorește să construiască o aplicație folosind „Linked Data” [W26, P19]. Prin folosirea unui sistem de tipuri simplu, am identificat o slăbiciune în dezvoltarea stivei reprezentată de lipsa unor limbaje de „scripting” specifice domeniului. Pentru a combate această problemă, am construit un limbaj de scripturi care are încorporat un sistem de tipuri. În arhitectura propusă, unele date sunt consumate din surse care nu se află sub controlul sistemului, iar alte date sunt stocate local. Constrângeri de tipuri mai puternice pot fi făcute asupra datelor locale însă nu și asupra datelor externe, rezultând un sistem de tipuri care combină tipuri statice cu cele dinamice.

Am introdus noțiunea de tipuri descriptive care atașat resurselor din Linked Data furnizează adnotări folositoare pentru a descrie resursele care pot fi folosite [W27]. În loc de a lansa erori în momentul compilării, un sistem de tipuri descriptive lansează avertizări în momentul execuției sub forma unui meniu de opțiuni care oferă sugestii programatorului. Am introdus un sistem de subtipuri, un sistem de tipuri

algoritmice și o semantică operațională care lucrează împreună pentru a caracteriza modul în care tipurile descriptive sunt folosite. Sistemul de tipuri permite inferența schemei RDF și alte moduri de inferență noi pentru Linked Data.

Am descris o abordare iterativă bazată pe analiza conceptelor formale pentru a rafina procesul de căutare al informațiilor [W28]. Am folosit o conexiune Galois pentru a introduce un nou tip de concept formal care ne permite să lucrăm cu praguri specifice pentru a căuta cuvinte în documentele Web. Am folosit tehnici pentru procesarea în paralel a seturilor mari de date, pentru a genera secvențe de latici Galois, mai eficiente în timp cu respect la construirea unei latici pentru un context larg.

Am oferit o semantică alternativă pentru TiMo folosind un formalism algebric, numit „logică de rescriere” (RL), care este capabil să modeleze comportamentul sistemelor dinamice [W29]. TiMo este un formalism ce permite controlul asupra modului în care se desfășoară comunicarea între procese la nivel local prin introducerea de constrângeri temporale. Am definit un model RL bazat pe strategii de descriere a unui pas computațional maximal paralel. Acest nou model semantic este consistent și complet. Am implementat acest model utilizând sistemul de rescriere ELAN și am oferit un exemplu despre cum o specificație TiMo este executată și despre cum un șir de proprietăți comportamentale sunt analizate.

Am introdus o nouă clasă de rețele Petri numită rețele Petri catalitice, în care strategia de activare a tranzițiilor necesită consumarea de simboluri speciale numite catalizatori, utilizând o strategie de paralelism minimal cu verificare locală [W30]. Am demonstrat o corespondență între această clasă și formalismul sistemelor membranare cu catalizatori, și am arătat că această corespondență implică și universalitatea computațională a rețelelor Petri catalitice ce au cel puțin doi catalizatori.

Am prezentat o abordare topologică pentru clasificarea web, având ca scop descrierea clasificărilor și a căutărilor pe web [W31]. O proprietate originală este dată de operatorii de claritate care pot detecta dacă un document nu face parte dintr-o specifică clasă de clasificare. Am arătat că există o bijecție între operatorii de claritate obișnuiți și topologiile obișnuite. Prin adăugarea unor proprietăți la un operator de claritate obișnuit, am reușit să-l asociem unei topologii Alexandrov obișnuită.

Am introdus o algebră de procese stohastică numită PHASE care folosește distribuții de tip fază, și am oferit o descriere în pași a modalității de translație a proceselor PHASE în modele care pot folosi modelul de verificare probabilistică PRISM [W32]. Am ilustrat abordarea noastră prin analizarea comportamentului unui sistem simplu ce implică atât tranziții markoviene cât și non-markoviene. De asemenea, am prezentat un studiu de caz ce folosește sisteme interactive non-markoviene, ca un mod de a ilustra avantajele folosirii aproximărilor de tip fază, în comparație cu aproximările tranzițiilor non-markoviene prin tranziții markoviene [P21,TR5].

Am extins familia de formalisme TiMo prin definirea unei versiuni numită pTiMo în care migrarea și interacțiunile depind de constrângeri temporale și au asociate probabilități [W33, P22]. Semantica lui pTiMo este dată în termeni de lanțuri Markov cu timp discret. Instrumentele cantitative existente nu suportă în mod explicit proprietăți care folosesc ceasuri locale, multiseturi de tranziții și originea tranziției.

Pentru a studia asemenea proprietăți, pentru pTiMO am introdus o nouă logică temporală probabilistă numită PTLM și am oferit un algoritm pentru verificarea proprietăților PLTM căruia i-am analizat complexitatea timp.

Am creat un instrument de simulare, numit TiMo@PAT, dezvoltat folosind Process Analysis Toolkit (PAT, disponibil la <http://www.comp.nus.edu.sg/~pat/>), o platformă extensibilă pentru crearea de verificatoare de modele („model checkers”) [W34, P23]. Am ilustrat apoi capacitatea lui TiMo@PAT de a analiza unele proprietăți ale sistemelor distribuite. O trecere în revistă a tuturor direcțiilor de cercetare legate de familia de algebre de procese TiMo a fost prezentată în [P13].

Am definit, folosind calculul structurilor, un formalism de ordin întâi (MAV1) care este expresiv dar și decidabil [W35,A2]. Pe lângă operatorii existenți de existență și universalitate formalismul încorporează o pereche duală de Morgan de operatori nominale numiți ‘new’ și ‘wen’ care sunt diferiți de operatori auto-duali Gabbay-Pitts și de operatorii nominali Miller-Tiu. Noutatea acestor operatori este că ei sunt polarizați în sensul că ‘new’ este distributiv peste operatorii pozitivi pe când ‘wen’ este distributiv peste operatorii negativi. Acest control suplimentar permite ca numele private să poată fi modelate ca predicate în MAV1. În acest fel avem avantajul că implicația liniară definește o pre-congruență peste procese care respectă cauzalitatea și bifurcarea. Tranzitivitatea este stabilită folosind o tehnică nouă pentru manipularea cuantificatorilor de nivel unu în demonstrația de eliminare prin tăiere („cut elimination proof”).

Lucrarea [W36] a fost acceptată pentru prezentare la Turing Centenary Conference în Cambridge în urma unei competiții cu peste 250 de lucrări trimise. Am analizat puterea computațională a sistemelor membranare cu mobilitate controlată. Aceste sisteme utilizează tipuri de reguli inspirate din procesele biologice de endocitoză și exocitoză, cu diferite variante relativ la obiectele care exercită control asupra mobilității generate de reguli. Am demonstrat că folosind doar variantele de reguli cu endocitoză și exocitoză forțată, un sistem cu patru membrane este Turing complet (cu alte cuvinte, este universal din punct de vedere computațional) pe când un sistem cu doar trei membrane nu este Turing complet. Am demonstrat că adăugarea de reguli ce permit diviziunea restricționată a membranelor nu este suficientă pentru a permite completitudinea Turing, în schimb adăugarea de inhibitori la un singur tip de reguli este suficientă. În plus am demonstrat că folosirea doar de reguli restricționate nu permite completitudine computațională.

Am prezentat două abordări numite „cauzalitate corelativă” și „cauzalitate cantitativă” pentru a studia relațiile „cauză-efect” în modele de reacție [W37, P24]. Am propus un cadru ce integrează cele două noțiuni de mai sus pentru a studia cauzalitatea prin intermediul sistemelor membranare. Acest cadru este bazat pe faptul că analiza statistică poate fi utilizată pentru a construi un model membranar ce poate fi folosit pentru a analiza relații de cauzalitate în termeni de multiseturi de obiecte și reguli în prezența non-determinismului și paralelismului. Am demonstrat că P sistemul definit prin intermediul analizei corelației oferă o corespondență între noțiunile de cauzalitate cantitativă și cauzalitate corelativă.

Am definit un formalism inspirat de biologia moleculară în care mobilitatea și timpul sunt explicit specificate [A1]. Pentru a putea studia comportamentul sistemelor

biologice complexe am definit câteva echivalențe observaționale peste membranele mobile cu timp. Aceste echivalențe corespund câtorva combinații a operațiilor de mobilitate care pot fi efectuate, aspectele de timp a obiectelor implicate în mobilitate și poziția lor explicită în membrane. Am demonstrat diferite relații între aceste echivalențe comportamentale și am folosit logica ambienților pentru a oferi o caracterizare logică pentru echivalența observațională localizată.

În [P2] am introdus noțiunea de mulțime numărabilă în cadrul FSM. Am demonstrat o serie de proprietăți algebrice ale mulțimilor numărabile și am stabilit o serie de rezultate de relaționare în FSM între „principiile de alegere numărabile” și „principiile de conservare a numărabilității la reuniune”.

În [P3] am făcut o prezentare a principiilor de construcție a FSM și a metodelor generale de demonstrare a faptului că o structură este finit suportată. Mai exact, am descris metoda constructivă de definire a suportului unei structuri algebrice, principiul de echivarianță în logica de ordin superior și principiul de S-suportare în logica de ordin superior. De asemenea, am studiat consistența unor principii de alegere în FSM.

Am studiat membranele mobile cu deplasări temporale, care reprezintă un formalism inspirat din biologie, capabil să modeleze sisteme ce utilizează timpi de evoluție, locații explicite și mobilitate [P5]. Am definit un număr de echivalențe comportamentale peste acest formalism și am demonstrat că unele echivalențe sunt mai fine decât altele în vreme ce alte echivalențe sunt incomparabile.

Am propus un sistem de tipuri de mobilitate pentru descrierea și verificarea sistemelor distribuite în care procesele sunt rugate să migreze între locațiile unde interacțiunile locale importante sunt necesare [P12]. Am folosit o versiune simplificată a π -calculului distribuit pentru a defini tipurile de mobilitate. Noutatea acestei abordări este că noi considerăm secvențele de migrare ca tipuri globale, și investigăm scenariile în care procesele trebuie să urmeze o asemenea secvență de migrări între câteva locații. Sistemul de tipuri garantează câteva proprietăți printre care și soliditatea (soundness).

Am translatat o versiune restrânsă a P sistemelor stochastice neuronale cu impulsuri și care folosesc o distribuție uniformă, într-o rețea de automate cu timp, demonstrând că o asemenea translatare conservă fidel comportamentul lor [P13]. Această relație permite verificarea câtorva proprietăți (atât calitative cât și cantitative) folosind extensia statistică a vericatorului de modele din programul software complex Uppaal.

Am definit un sistem ierarhic ce folosește un sistem de tipuri bazat pe multiseturi pentru a controla rapoartele dintre resurse [P14]. Folosind această semantică cu tipuri, fiecare regulă a sistemului poate fi aplicată doar dacă partea stângă a regulii este bine tipată. Inferența tipurilor este definită pentru deducerea tipului unui astfel de sistem și rezultate legate de corectitudine și completitudine sunt demonstrare.

Am demonstrat că un model abstract de interacțiune proteină-proteină [P15] inspirat din calculul membranelor are aceeași putere de calcul ca și o mașină Turing prin folosirea unui număr mic de proteine de lungime doi, unde lungimea reprezintă o noțiune abstractă de complexitate.

Am considerat sistemele membranare mobile în care mișcarea este dată de regulile inspirate de endocitoza și exocitoza celulelor [P16]. Am comparat puterea de calcul cu noțiunea clasică de calculabilitate Turing. Am demonstrat că aceste sisteme membranare mobile pot rezolva probleme grele în timp polinomial. De asemenea, am comparat aceste sisteme de rescriere multiset cu alte formalisme ca ambienții mobili și calculul brane.

Am definit, utilizând metodologia matematică a semanticilor metrice, o semantică denotațională și o semantică operațională pentru un limbaj concurent abstract în care compoziția paralelă este bazată pe paralelism maximal și execuțiile sunt descrise folosind reguli de rescriere a multiseturilor [P22]. Am comparat ulterior cele două semantici în termenii acestei combinații de concepte.

Am definit o matematică constructivă pentru științe experimentale, numită Matematica Finit Suportată (FSM) [B1], în care noțiunea de infinit este mai relaxată. Informal, în FSM suntem capabili să modelăm structurile infinite utilizând un număr finit de caracteristici. Mai precis, în FSM admitem existența structurilor infinite, dar pentru orice astfel de structură demonstrăm că doar o familie finită de elemente este „cu adevărat importantă” pentru a caracteriza respectiva structură, restul elementelor fiind „oarecum similare”. Altfel spus, asociem oricărui obiect o familie finită de elemente care îl caracterizează, numită „suport finit”. FSM are conexiuni puternice cu modelul permutativ Fraenkel-Mostowski (FM) al teoriei Zermelo-Fraenkel cu atomi (ZFA) a multimilor, cu teoria axiomatice Fraenkel-Mostowski a multimilor și cu teoria multimilor nominale și a mulțimilor nominale generalizate. Mai exact, FSM reprezintă o rescriere a algebrei clasice Zermelo-Fraenkel în termeni de structuri finit suportate, unde setul de atomi este infinit (nu neapărat numărabil ca în cazul teoriei mulțimilor nominale). Principiile de construcție a FSM au rădăcini istorice în definiția conceptului Tarskian de logicalitate și în maniera lui Felix Klein de clasificare a geometriilor folosind invarianți în raport cu grupuri de permutări. De asemenea, am prezentat o serie de similarități între FSM, mulțimile admisibile introduse de Barwise și mașinile Gandy.

În cartea [B2] am analizat și comparat descrieri formale ale mobilității în algebre de procese și în formalisme inspirate din biologie. Această monografie prezintă rezultate obținute în urma mai multor ani de cercetare. În carte se prezintă atât mobilitatea din sisteme de link-uri [Milner99], precum și cea din sisteme celulare. Mobilitatea în sisteme de link-uri este descrisă prin formalismul numit pi-calcul, formalism care reprezintă un model pentru sisteme concurente adaptate din algebra proceselor cu comunicare [Milner99]. Alte algebre de procese prezentate în carte reprezintă variante ale pi-calculului (cu ingrediente precum durata specifică de viață sau localizare a proceselor), cât și ale ambienții mobili [CaGo00] sau formalismul „brane” [Card04]. Acesta din urmă are ca inspirație procesele biologice de endocitoză, exocitoză și mitoză. Mobilitatea în sisteme celulare este prezentă cu ajutorul calculului membranar. Se prezintă diferite forme de mobilitate în sisteme membranare și se urmăresc legăturile cu alte formalisme cum ar fi rețelele Petri și formalismului „brane”. Am pus în evidență modul în care mobilitatea din algebrele de procese este corelată cu cea din sistemele membranare, prezentând o serie de construcții prin care un formalism descris algebric poate fi văzut ca un sistem membranar și reciproc.

De asemenea, volumul editat [E3] conține lucrările unei conferințe de rang B, numite ICTAC, la a cărei organizare am participat.

Diverse extinderi pentru TiMo sunt prezentate și în două rapoarte tehnice [TR2] și [TR3]. Raportul [TR4] prezintă studii de caz ce utilizează formalisme stochastice (algebre de procese) în modelarea cantitativă a interacțiunii om-calculator.

Bibliografie:

[Card04] L. Cardelli. Brane Calculi. Interactions of Biological Membranes. *Lecture Notes in Bioinformatics*, vol. 3082, 257-278, 2004.

[CaGo00] L. Cardelli, A. Gordon. Mobile Ambients. *Theoretical Computer Science*, vol. 240(1), 177-213, 2000.

[GaJo79] M. Garey, D. Johnson. *Computers and Intractability. A Guide to the Theory of NP-Completeness*. Freeman, New York, 1979.

[Milner99] R. Milner. *Communicating and Mobile Systems: The π -calculus*. Cambridge Univ. Press, 1999.

[PaAl06] L. Pan, A. Alhazov. Solving HPP and SAT by P systems with Active Membranes and Separation Rules. *Acta Informatica*, vol. 43, 131-145, 2006.

[Păun02] Gh. Păun. *Membrane Computing. An Introduction*. Springer, 2002.

[Păun10] Gh. Păun, G. Rozenberg, A. Salomaa (Eds.). *Handbook of Membrane Computing*. Oxford University Press, 2010.

Credem ca obiectivele proiectului au fost realizate cu succes, asigurând continuitatea cercetărilor anterioare proiectului si favorizand pasii urmatari pe care-i vom face. Speram ca experienta câștigata in cadrul proiectului va fi valorificata prin cercetări ulterioare în cadrul unor noi proiecte de cercetare.

Proiectul a constituit o șansă reală pentru interactiunea si colaborarea noastra cu comunitatea internationala de cercetători, pentru realizarea si valorificarea noilor idei, pentru accesul la frontul cercetarii si competitia reala care se desfasoara in universul cunoasterii. Motiv pentru care exprimam recunostinta noastra catre toti factorii care au făcut posibil acest proiect.

Director proiect,

CS I dr. Gabriel Ciobanu