

ABSTRACT

Maintaining the strong momentum of the scientific and technological advances from the past several decades proves to be especially difficult when computing is concerned. Its evolution of modern computing equipment has to pursue a twin track: some applications require *speed* above anything else, while others require the highest possible *reliability*. However, regardless the priority target, classic systems appear to have approached their limits, therefore fueling the need for new computing paradigms and architectures. Emerging technologies are set to explore the potential of biologically-inspired computing and quantum computing, which will hopefully lead to new avenues for progress in computing, both from a paradigmatic and an architectural standpoint; these emerging technology vectors were acknowledged in a recent ITRS (International Technology Roadmap on Semiconductors) report.

As the computing systems gain in architectural complexity, with an ever increasing number of processing units being integrated onto the same silicon die through technology scaling, the idea of drawing inspiration from biology unveils a range of potential benefits. On one hand, how to design and manage such complex computing systems in order to provide both performance and fault tolerance could find appropriate answers through studying the living systems. Their complexity is apparent both in their sheer numbers of parts (for instance, a human being is made of 10^{13} cells), and in their behaviors: living beings are endowed with *robustness* to damage (they are able to develop and operate correctly despite assaults from the environment or genetic mutation) and are highly *dynamic* (cells die and are replaced, they fit the environment through different phenotypes). Exploring the mechanisms that underlie these attributes of the living systems in computing is the major goal of the Embryonics project, a long-term research initiative that provides the framework for this thesis.

The research carried over the Embryonics project led to the development of a new, architecturally uniform, bio-inspired FPGA, called MuxTree, with built-in self-test and self-repair. While allowing universal computation and featuring a hierarchical strategy of achieving fault-tolerance, this architecture was ill-suited for the implementation of memory structures required by micro-programmed machines. The first main goal of this thesis was therefore to expand the MuxTree architecture in order to allow an efficient and flexible way of data storage, while preserving its bio-inspired self-repair strategy.

The main challenge of introducing a memory structure in the MuxTree design was integrating it and the required additional features with the already proven mechanisms of growth, differentiation, self-test and self-repair. The functional characteristics of each MuxTree programmable element are determined by the genetic information stored inside a special purpose configuration register. We chose to better exploit this resource by introducing a new operating mode, which we called the *memory mode*. The previous operation was preserved under the name of *logic mode*, while in *memory mode* the MuxTree element allows the implementation of memory structures of variable

dimensions, through chaining the configuration registers into what we called a *cyclic memory*. Access to genetic information is sequential (as is in living beings) and there is a choice between maximum data storage and no information routing (*long memory mode*), and minimum data storage with information routing capability (*short memory mode*). However, the addition of the new operating mode raises some issues:

- the original self-testing mechanism preserved from the MuxTree design, cannot just simply extend to obtain a self-testable memory structure;
- an original fault tolerance strategy has to be developed in order to expand the robustness of the Embryonics concepts over the memory structures.

The second goal of this thesis was to provide the newly introduced memory structures with a mechanism of self-test that could be integrated with the extant two-level self-repair strategy. The motivation lies in the different nature of what was to be protected: information recovery, required by the protection of data (when in memory mode), is ensuring a correct functionality (when in logic mode). Choosing the appropriate error recovery strategy in case of memory structures is argued by the occurrence of soft errors, which are subject to influence normal operation of applications targeted by the Embryonics project. A considerable challenge represented the integration of the self-testing mechanisms, for the logic and the memory modes, with the hierarchical strategy of self-repair.

After evaluating several strategies for error recovery in memory structures, we decided in favor of protecting each memory structure through a Hamming-type single error correcting code. A thorough analysis over the reliability of MuxTree machines is also provided, for the considered strategies. This is further extended through the assessment of the accuracy threshold, a parameter borrowed from another fault-rich computational environment represented by quantum computing, shown to also work well for the Embryonics project. In fact, the accuracy threshold parameter can be used in order to estimate the upper bound of the error frequency that would still allow a successful error recovery. Furthermore, a methodology of implementing concatenated coding in Embryonics for the purpose of further extending the robustness of computational processes is presented.

The initial goals of the thesis were met and the circuit was implemented in actual hardware, using the Embryonics demonstrator platform. Several memory configurations were tested in order to demonstrate both a correct functionality and the successful integration with legacy mechanisms.

REZUMAT

Menținerea puternicului avânt înregistrat în ultimele decenii, atât din punct de vedere științific, cât și din punct de vedere tehnologic, devine o sarcină în mod particular complicată în ceea ce privește echipamentele de calcul. În mod necesar, evoluția calculatorului modern trebuie să abordeze două direcții: în timp ce o categorie de aplicații necesită cu prioritate *viteza* maximă de calcul, altele revendică în primul rând caracteristici optime de *fiabilitate*. Indiferent de prioritate însă, sistemele clasice de calcul se prezintă ca fiind foarte aproape de limitele lor, alimentând în consecință necesitatea investigării unor noi paradigme și arhitecturi computaționale. În acest context, tehnologiile emergente țintesc explorarea potențialului calculului bioinspirat și a celui cuantic, direcții prin care este de presupus că se va ajunge la noi posibilități de progres în tehnica de calcul, atât din punct de vedere paradigmatic, cât și din punct de vedere arhitectural; vectorii reprezentând aceste tehnologii emergente sunt menționați în recentul raport ITRS (International Technology Roadmap on Semiconductors).

Pe măsură ce sistemele de calcul câștigă în complexitatea arhitecturală, un număr mereu crescând de unități de procesare putând fi integrate pe același substrat de siliciu prin scalare tehnologică, ideea de a beneficia în domeniul calculatoarelor de inspirație din domeniul biologiei dezvăluie o întreagă paletă de potențiale beneficii. Pe de o parte, modalitatea de a realiza și gestiona un design al unui sistem de calcul de o asemenea complexitate astfel încât să fie întrunite dezideratele de performanță și toleranță la defectare ar putea fi inspirată de studiul sistemelor vii. Complexitatea acestora transpare atât prin numărul masiv de componente (de exemplu, se estimează că o ființă umană conține aproximativ 10^{13} celule), cât și prin comportament: ființele vii sunt *robuste* (sunt capabile să se dezvolte și să opereze în mod corect în pofida acțiunii nefaste a mediului înconjurător sau a mutațiilor genetice) și sunt extrem de *dinamice* (celulele mor și sunt înlocuite de altele noi, prezintă o mare capacitate de adaptare la mediu prin diverse fenotipuri). Explorarea mecanismelor care determină toate aceste atribute ale ființelor vii reprezintă ținta majoră a proiectului Embryonics, proiect de cercetare de lungă durată care asigură platforma acestei teze.

Cercetările întreprinse asupra proiectului Embryonics au condus la dezvoltarea unui nou circuit programabil de tip FPGA, denumit MuxTree, având o arhitectură uniformă și înglobând facilități de auto-testare și auto-reparare. Deși permițând procese de calcul universal și implementând o strategie ierarhică în scopul obținerii unui grad superior de toleranță la defectare, această arhitectură este mai puțin adaptată implementării unor structuri de memorie, care sunt necesare pentru orice sistem de calcul microprogramat. De aceea, prima țintă majoră a acestei teze a fost extinderea arhitecturii MuxTree în scopul de a îngădui o stocare flexibilă și eficientă a datelor, concomitent cu păstrarea neafectată a strategiei ierarhice de autoreparare existente.

Principala provocare a introducerii unei structuri de memorie în designul MuxTree a fost integrarea acesteia, împreună cu mecanismele adiționale

necesare, în peisajul mecanismelor existente, cu funcționalitate anterior verificată, reprezentate de creștere și diferențiere celulară, auto-testare și auto-reparare. Caracteristicile funcționale ale elementului programabil MuxTree sunt determinate de înfomația genetică stocată în interiorul unui registru de uz special, numit de configurare. Am ales să exploatăm mai eficace această resursă prin introducerea unui nou mod de operare, denumit *modul memorie*. Modul anterior de funcționare a fost conservat sub denumirea de *modul logic*, în modul memorie fiind posibilă implementarea unor structuri de elemente MuxTree de dimensiuni variabile, prin asamblarea registrelor de configurare în ceea ce am numit *memorie ciclică*. Accesul la informația genetică este realizat în mod secvențial (într-un mod asemănător celui din ființele vii) iar flexibilitatea este asigurată prin posibilitatea de selecție între două modalități, modul lung de memorie (spațiu maxim de stocare, rutare limitată a informației) și modul scurt de memorie (spațiu redus de stocare, rutare normală a informației). Introducerea acestui nou mod de operare a fost însă însoțită de apariția unor probleme:

- mecanismul original de auto-testare, prezervat din precedentul design MuxTree, nu poate fi extins în mod direct pentru a obține o structură de memorie auto-testabilă;
- este necesară o strategie originală de obținere a toleranței la defecte pentru a extinde robustețea conceptelor Embryonics asupra structurilor de memorie.

Cea de-a doua țintă majoră a tezei o constituie adăugarea asupra noilor structuri de memorie a unui mecanism de auto-testare care să poată fi integrat în strategia existentă de auto-reparare pe două niveluri. Motivația este argumentată de natura diferită a ceea ce se dorește a se proteja: refacerea informației, necesită de structurile de memorie determină, în același timp și o corectă funcționalitate a structurilor operând în mod logic. Alegerea unei strategii corespunzătoare pentru revenirea din eroare, în ceea ce privește structurile de memorie, a fost determinată de caracteristicile erorilor de tip soft, susceptibile de a influența corectă funcționare a aplicațiilor-țintă ale proiectului Embryonics. O provocare considerabilă a fost constituită de integrarea mecanismelor de auto-testare, pentru modulele de memorie și logic, în strategia ierarhică de auto-reparare.

După evaluarea diferitelor strategii de revenire din eroare în ceea ce privește structurile de memorie, decizia luată a fost protejarea acestora prin intermediul unui cod Hamming, corector al erorii singulare. O analiză completă asupra caracteristicilor de fiabilitate ale arhitecturii MuxTree a fost prezentată pentru strategiile considerate. Aceasta este extinsă prin investigarea unui parametru numit prag de acuratețe a computației, transferat dintr-un alt mediu computațional cu o bogată susceptibilitate la erori, și anume calculul cuantic, care s-a dovedit a fi potrivit inclusiv proiectului Embryonics. De fapt, acest parametru poate fi utilizat în scopul cuantificării limitei superioare a frecvenței erorilor pentru a permite în continuare desfășurarea cu succes a proceselor de revenire din eroare. Mai mult, teza prezintă și o metodologie de implementare a codurilor concatenate în Embryonics, în scopul de a extinde robustețea proceselor computaționale la nivelul acestei platforme.

Țintele inițiale ale tezei au fost îndeplinite, iar noul design MuxTree a fost implementat în hardware, utilizând platforma demonstrativă existentă. Au fost realizate și testate câteva configurații de memorie pentru a demonstra atât corectă lor funcționare cât și integrarea de succes în paleta de mecanisme prezente în designul anterior.

ACKNOWLEDGEMENTS

The coming of a PhD thesis is granted by a mixture between two essential ingredients: the culmination of several years of study and the ever understanding uphold from family, teachers and friends. Since it would be impossible to individually thank all the people who deserve it, I feel compelled to make a final appeal to their goodwill. I will, however, acknowledge my gratitude to those who made this thesis possible and adorned these years with their unconditional support.

First, of course, my parents, who have always been willing to endure considerable deprivations to provide me with the best in life. My wife and my son, who beared calmly with my frequent periods of being totally immersed in research. They kept me surrounded constantly with all their love and caring; needless to say, without their efforts, it would have been impossible to stand where I am today.

My mentors, from two different countries, united by the same dedication for the academia, who contributed to my becoming both through their friendship and professional excellence:

Professor Mircea Vladutiu, the thesis director and a true connoisseur of seeding the spiritual urge that drives any research. It is he whom I owe the introduction to the joyful realms of computer hardware design.

From abroad, the extraordinary team of the Logic Systems Laboratory, led by Professor Daniel Mange, who fathered my access to the exquisite world of the Embryonics project during my research activity at the EPFL – the Swiss Federal Institute of Technology at Lausanne. Professor Gianluca Tempesti, who shared with me the ups and downs while walking along the MuxTree development path, both as my direct supervisor and, later, as my colleague. My integration in the “ontogenetic team” unveiled, apart from some of the more “secret” insights of the project, a more profound perspective over human relations, which made the research efforts in their company never a burden, but always a privilege.

The experts that stood the burden of reading and appraising the effort put into this thesis: Professor Mircea Petrescu from the “Politehnica” University of Bucharest and Member of the Romanian Academy, and Professor Sergiu Nedevschi, from the Technical University of Cluj-Napoca.

If this thesis builds on scientific results, it is because means of encouragement were found in critical moments. I would like to take this opportunity to thank the rector of our university, Professor Nicolae Robu, for the significant support he provided in order to attend key conferences.

Last, but not least, my colleague Mihai Udrescu, with whom I shared the office and catalyst of many fruitful exchanges of ideas. My appreciation also goes to our students, especially to Nicola Velciov. If tight deadlines could be met, it is also thanks to their contribution.

The research carried out throughout this thesis was supported in part by:

- the Swiss National Foundation under grant 21-54113.98;
- the Consorzio Ferrara Ricerche, Università di Ferrara, Ferrara, Italy;
- the Leenards Foundation, Lausanne, Switzerland;
- ACM SIGEVO Travel Grant, 2005;
- the Romanian Ministry of Education and Research through grant CNCSIS nr.643/2005.

During times when funding becomes more and more scarce for everything that does not seem to have an immediate industrial application, it is inciting to know that long-term research still remains possible.