

# MULTI-CELLULAR RECONFIGURABLE CIRCUITS: EVOLUTION, MORPHOGENESIS AND LEARNING

THÈSE N° 3198 (2005)

PRÉSENTÉE À LA FACULTÉ SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

Institut d'ingénierie des systèmes

SECTION DE MICROTECHNIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

**Daniel ROGGEN**

ingénieur en microtechnique diplômé EPF  
de nationalité suisse et originaire de Morat (FR)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. D. Floreano, directeur de thèse

Prof. E. Sanchez, rapporteur

Prof. A. Tyrrell, rapporteur

Prof. X. Yao, rapporteur

Lausanne, EPFL  
2005

---

# Abstract

---

Bio-inspired electronic circuits have the potential to address some of the shortcomings of conventional electronic circuits, such as lack of applicability to ill-defined problems, of robustness, or of adaptivity to unexpectedly changing environments.

Bio-inspired circuits are designed by taking inspiration from principles observed in biology. The evolution of biological organisms, their development from a fertilized egg, and their learning capabilities are three sources of bio-inspiration that can be used for this purpose.

Until now bio-inspired electronics mostly focused on a single aspect of bio-inspiration: either evolution, development or learning. In this thesis we consider that electronic circuits should encompass all three aspects to fully benefit from bio-inspiration. These circuits capable of evolution, development and learning are called POEtic circuits (POE stands for phylogeny, ontogeny and epigenesis, that mean respectively evolution, development and learning).

Conceptually these POEtic circuits, much like biological organisms, are multi-cellular circuits that evolve following the principles of selection and differential reproduction, they develop from a single cell and differentiate according to inter-cellular and environmental signals, and eventually they learn during their lifetime. These circuits may also dynamically reorganize their structure in order to cope with changes in the environment, or when they are expanded with new cells, sensors or actuators. In comparison to conventional circuits, POEtic circuits are created automatically using evolutionary principles, even if only a partial or high-level specification of the problem is known. Development provides a complex genotype to phenotype mapping, that may lead to fault-tolerance or adaptive development in order to cope with environmental changes. Finally learning allows these circuits to memorize past events or adapt their response over time to improve their behavior.

This thesis deals with the evolutionary mechanisms required to evolve these POEtic circuits. We argue that in order to fully realize the potential of POEtic circuits a novel evolutionary system that takes into account their characteristics and that encompasses both a genetic encoding and a developmental system is required. Indeed, evolutionary algorithms commonly used to evolve electronic circuits do not exploit the complex dynamics of development which is seen in biological organisms. They generally use a direct ge-

netic encoding with a one to one genotype to phenotype mapping. As a consequence the genetic string grows with the size of the circuits and this may limit the scalability of the evolutionary approach to larger circuits. Furthermore these encodings do not allow inter-cellular or environmental interactions during development, which could lead to adaptive development or fault-tolerant circuits.

In this thesis we develop an evolutionary system suited for multi-cellular POEtic circuits. This evolutionary system is inspired by the mechanisms of gene expression and cellular differentiation seen in biological organisms. It attempts to provide better evolvability and scalability than direct genetic encodings, it allows cellular or environmental interactions during development, and it is computationally simple so that it can be efficiently implemented in hardware. It is furthermore generic, and it makes minimal assumptions on the circuits that are evolved: other than assuming they are multi-cellular, it only requires local communication between neighboring cells.

We demonstrate the proposed evolutionary system by evolving multi-cellular circuits for a wide range of applications. The results that we obtain confirm the generality of our approach and its advantages in comparison to direct genetic encodings.

The proposed evolutionary system is used to evolve structures of differentiated cells, and it shows better scalability to larger structures in terms of fitness than a direct genetic encoding. The dynamics of development within the evolutionary system can recover these structures in case of faults, even at high fault rates. The proposed evolutionary system is used to evolve multi-cellular circuits composed of spiking neurons to recognize patterns and to control the navigation with obstacle avoidance of a mobile robot, and in comparison it outperforms a direct genetic encoding. Finally it is used to evolve circuits capable of learning that control a mobile robot in a vision-based learning and navigation task. This last application demonstrates the three aspects of bio-inspiration of POEtic circuits in a single task: evolution, development and learning.

---

## Version abrégée

---

Les circuits électroniques bio-inspirés ont le potentiel de remédier à certaines carences des circuits électroniques conventionnels, tels que la difficulté à les utiliser lorsqu'une application est mal définie, leur manque de robustesse, et leur manque d'adaptabilité lorsque l'environnement change de façon imprévue.

Les circuits bio-inspirés sont créés en prenant inspiration de principes observés dans la biologie. L'évolution des organismes biologiques, leur développement d'un oeuf fertilisé, et leur capacité d'apprentissage sont trois sources de bio-inspiration qui peuvent être utilisées pour cela.

Jusqu'à présent l'électronique bio-inspirée s'est grandement focalisée sur un seul aspect de la bio-inspiration: soit l'évolution, le développement ou l'apprentissage. Dans cette thèse nous considérons que les circuits électroniques devraient englober tout les trois aspects pour pleinement bénéficier de la bio-inspiration. Ces circuits capables d'évoluer, de se développer et d'apprendre sont appelés des circuits POEtic (POE signifie phylogenèse, ontogenèse et épigenèse, soit respectivement évolution, développement et apprentissage).

Conceptuellement ces circuits POEtic sont, de même que les organismes biologiques, des circuits multi-cellulaires qui évoluent en suivant le principe de la sélection et de la reproduction différentielle, ils se développent à partir d'une seule cellule et se différencient en fonction des signaux inter-cellulaires et environnementaux, et finalement ils apprennent durant leur vie. Ces circuits peuvent aussi réorganiser dynamiquement leur structure de façon à tolérer des changements dans l'environnement, ou lorsqu'ils sont agrandis avec de nouvelles cellules, senseurs ou acteurs. En comparaison avec les circuits conventionnels, les circuits POEtic sont créés automatiquement en utilisant les principes évolutionnaires, même lorsque seulement une spécification partielle ou de haut niveau à un problème est connue. Le développement pourvoit une conversion complexe de génotype à phénotype qui peut amener à la tolérance aux pannes ou au développement adaptatif de façon à faire face à des changements environnementaux. Finalement l'apprentissage permet à ces circuits de mémoriser des événements passés et d'adapter leur réponse au cours du temps de façon à améliorer leur comportement.

Cette thèse traite des mécanismes évolutionnaires requis pour évoluer ces circuits POEtic. Nous soutenons qu'afin de réaliser pleinement le potentiel des circuits POEtic, un

nouveau système évolutionnaire est requis qui prend en compte les caractéristiques de ces circuits et qui englobe à la fois un codage génétique et un système développemental. En effet, les algorithmes évolutionnaires couramment utilisés pour évoluer des circuits électroniques n'exploitent pas la dynamique complexe du développement qui est observée dans les organismes biologiques. Ils emploient généralement un codage génétique direct avec une conversion un à un du genotype vers le phénotype. En conséquence la chaîne génétique croît avec la taille des circuits et cela peut limiter la scalabilité de l'approche évolutionnaire à des circuits plus grands. De plus, ces codages ne permettent pas les interactions inter-cellulaires ou environnementales durant le développement qui pourraient mener au développement adaptatif du circuit ou à de la tolérance aux pannes.

Dans cette thèse nous développons un système évolutionnaire destiné aux circuits multi-cellulaires POEtic. Ce système évolutionnaire est inspiré des mécanismes d'expression génétique et de différenciation cellulaire observés dans les organismes biologiques. Il tente d'amener une meilleure évolvabilité et scalabilité que les codages génétiques directs, il permet les interactions inter-cellulaires et environnementales durant le développement et il est computationnellement simple, ce qui permet une implémentation efficace en hardware. De plus il est générique et fait des assumptions minimales quant aux circuits qui sont évolués: outre l'assumption qu'ils sont multi-cellulaires, il requiert uniquement une communication locale entre cellules voisines.

Nous démontrons le système évolutionnaire proposé en évoluant des circuits multi-cellulaires pour une large gamme d'applications. Les résultats que nous avons obtenus confirment la généralité de notre approche et sa meilleure performance en comparaison à un codage génétique direct.

Le système évolutionnaire proposé est utilisé pour évoluer des structures de cellules différenciées et il montre une meilleure scalabilité lors de l'évolution de structures plus grandes en comparaison à un codage génétique direct. La dynamique du développement au sein du système évolutionnaire permet de récupérer ces structures après qu'elles aient été endommagées, même avec un fort taux d'endommagement. Le système évolutionnaire proposé est utilisé pour évoluer des circuits multi-cellulaires composés de neurones à impulsions pour faire de la reconnaissance de formes et pour contrôler la navigation avec évitement d'obstacles d'un robot mobile. Il atteint une meilleure performance en comparaison à un codage génétique direct. Finalement il est utilisé pour évoluer des circuits capables d'apprentissage qui contrôlent un robot mobile dans une tâche d'apprentissage et de navigation basée sur la vision. Cette dernière application démontre les trois aspects de la bio-inspiration des circuits POEtic dans une même tâche: l'évolution, le développement, et l'apprentissage.

---

# Contents

---

<b>Abstract</b>	<b>i</b>
<b>Version abrégée</b>	<b>iii</b>
<b>Acknowledgements</b>	<b>v</b>
<b>Contents</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Introduction . . . . .	1
1.2 Motivation and aims of this thesis . . . . .	2
1.3 Achievements . . . . .	4
1.4 Structure of the thesis . . . . .	5
<b>2 Evolution of electronic circuits</b>	<b>7</b>
2.1 Introduction . . . . .	7
2.2 Principles of circuit evolution . . . . .	8
2.3 Evolutionary algorithms . . . . .	10
2.4 Digital circuit evolution . . . . .	12
2.4.1 Schematic evolution . . . . .	12
2.4.2 Intrinsic evolution of Boolean logic circuits . . . . .	13
2.4.3 Unconstrained evolution . . . . .	15
2.5 Analog circuit evolution . . . . .	17
2.5.1 Field programmable analog arrays . . . . .	17
2.5.2 Custom generic reconfigurable boards . . . . .	18
2.5.3 Custom reconfigurable integrated circuits . . . . .	20
2.6 Discussion . . . . .	21
2.7 Towards more complex evolved circuits . . . . .	23
2.8 Summary . . . . .	24

<b>3</b>	<b>Developmental systems for electronic circuits</b>	<b>25</b>
3.1	Introduction . . . . .	25
3.2	Biological development . . . . .	26
3.3	Mathematical models of biological development . . . . .	29
3.3.1	Random boolean networks . . . . .	29
3.3.2	L-Systems . . . . .	29
3.3.3	Other models of development . . . . .	31
3.4	Developmental systems in evolvable hardware . . . . .	31
3.4.1	Gene regulatory networks . . . . .	32
3.4.2	Cell programs . . . . .	33
3.4.3	L-Systems . . . . .	34
3.4.4	Abstract representations . . . . .	35
3.4.5	Embryonics . . . . .	36
3.5	Other applications of developmental systems . . . . .	37
3.6	Classification of developmental systems . . . . .	38
3.7	Summary . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Multi-cellular architecture for bio-inspired hardware</b>	<b>41</b>
4.1	Introduction . . . . .	41
4.2	Multi-cellular architecture . . . . .	42
4.3	Translating this architecture in a circuit . . . . .	44
4.4	The POEtic chip . . . . .	47
4.4.1	Cells in the POEtic chip . . . . .	50
4.4.2	Chip manufacturing . . . . .	51
4.5	Summary . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Evolution and growth of a multi-cellular circuit</b>	<b>55</b>
5.1	Introduction . . . . .	55
5.2	Multi-cellular circuit and cell . . . . .	56
5.2.1	Phenotype and genotype layers . . . . .	57
5.2.2	Mapping layer: growth and differentiation . . . . .	59
5.2.3	Implementation . . . . .	60
5.3	Circuit evolution . . . . .	60
5.3.1	Evolution of logic functions . . . . .	61
5.3.2	Evolution of a robot controller . . . . .	62
5.4	Discussion . . . . .	63
5.5	Summary . . . . .	65
<b>6</b>	<b>Evolutionary morphogenesis for multi-cellular systems</b>	<b>67</b>
6.1	Introduction . . . . .	67
6.2	Morphogenetic system . . . . .	69
6.2.1	Family of functions . . . . .	69
6.2.2	Signaling phase . . . . .	69
6.2.3	Expression phase . . . . .	71

---

6.2.4	Genetic encoding and evolution . . . . .	72
6.2.5	Computational requirements . . . . .	72
6.3	Evolvability . . . . .	73
6.4	Scalability . . . . .	76
6.5	Fault-tolerance . . . . .	79
6.6	Analysis . . . . .	82
6.6.1	Number of diffusers . . . . .	83
6.6.2	Number of signal types . . . . .	84
6.6.3	Morphological characteristics . . . . .	84
6.6.4	Fitness landscape . . . . .	87
6.7	Hardware implementation . . . . .	88
6.8	Discussion . . . . .	89
6.9	Summary . . . . .	92
<b>7</b>	<b>Evolutionary morphogenesis of spiking networks</b>	<b>95</b>
7.1	Introduction . . . . .	95
7.2	Evolution of multi-cellular spiking neural networks . . . . .	96
7.3	Pattern recognition . . . . .	98
7.4	Robot controller . . . . .	99
7.5	Hardware implementation of the robot controller . . . . .	102
7.6	Discussion . . . . .	106
7.7	Summary . . . . .	107
<b>8</b>	<b>Evolutionary morphogenesis of learning circuits</b>	<b>109</b>
8.1	Introduction . . . . .	109
8.2	Neural model and learning rules . . . . .	110
8.2.1	Neural model . . . . .	111
8.2.2	Learning rules . . . . .	112
8.3	Learning setup . . . . .	113
8.4	Learning performance . . . . .	115
8.5	Evolution of the learning circuits . . . . .	118
8.5.1	Neuron type . . . . .	119
8.5.2	Neuron type and maximum synaptic activation . . . . .	119
8.6	Discussion . . . . .	121
8.7	Summary . . . . .	123
<b>9</b>	<b>Evolutionary morphogenesis of learning mobile robot controllers</b>	<b>125</b>
9.1	Introduction . . . . .	125
9.2	Setup and robotic task . . . . .	127
9.3	Neural model and learning retina . . . . .	129
9.4	Learning in the robotic setup . . . . .	132
9.5	Evolution of the multi-cellular robot controller . . . . .	134
9.6	Discussion . . . . .	139
9.7	Summary . . . . .	141

<b>10 Conclusions</b>	<b>143</b>
10.1 Summary and achievements . . . . .	143
10.2 Further research directions . . . . .	146
<b>A POEtic chip</b>	<b>149</b>
A.1 Environment subsystem . . . . .	149
A.2 Organic subsystem . . . . .	149
<b>B POEtic tools</b>	<b>155</b>
B.1 POEtic CPU emulator . . . . .	155
B.2 CPU and organic subsystem co-simulation . . . . .	156
<b>C Phenotypic complexity and morphogenetic system parameters</b>	<b>159</b>
<b>D Hardware implementation of the morphogenetic system</b>	<b>163</b>
D.1 Architectural considerations . . . . .	163
D.2 Hardware implementation . . . . .	164
D.2.1 Description of the functional blocks . . . . .	169
D.3 Control signals . . . . .	177
<b>E Implementation of the obstacle avoidance robot controller</b>	<b>183</b>
E.1 FPGA module . . . . .	183
E.2 Details of the hardware robot controller . . . . .	185
E.2.1 Spiking neuron . . . . .	185
E.2.2 Configuration of the multi-cellular circuit . . . . .	186
E.2.3 Implementation results . . . . .	187
<b>F Stimuli parameters and alternate learning measures</b>	<b>189</b>
F.1 Stimuli parameters . . . . .	189
F.2 Alternate measures of learning . . . . .	193
F.2.1 Firing synchrony . . . . .	193
F.2.2 Autocorrelation length . . . . .	194
<b>G DCAM Khepera camera module</b>	<b>197</b>
G.1 Hardware . . . . .	197
G.2 Software . . . . .	200
<b>H Optimization of the retina size and connectivity</b>	<b>205</b>
<b>Glossary</b>	<b>209</b>
<b>Bibliography</b>	<b>213</b>
<b>Curriculum vitae</b>	<b>231</b>