

Langton の自己増殖ループへの構造解消機能の導入

佐山 弘樹

東京大学大学院 理学系研究科 情報科学専攻

生命の死という現象には、機能破綻と構造解消という2つの側面がある。本研究では、後者をモデル化してその意義を考察するため、既に機能破綻としての死が備わっている Langton の自己増殖ループ (SR ループ)[1] に、新たに構造解消機能を導入して「構造解消可能型自己増殖ループ (SDSR ループ)」を構成することを試みた。具体的には、SR ループを構成するのに用いられたセルラオートマタ (CA) の状態集合に解消状態 '8' を導入し、さらに状態遷移規則に幾つかの変更を加えた。この変更により SDSR ループは、自己増殖に必要な空間が不足するなどの困難な状況に遭遇した際に自分自身の構造を解消する能力を得た。システム全体の中で一部のサブシステムが消失するというこの仕組みにより、SDSR ループの個体群は、動的な安定性と潜在的な進化可能性を持った特徴的な振舞いを示すようになった。

Introduction of Structural Dissolution into Langton's Self-Reproducing Loop

Hiroki Sayama

Department of Information Science, University of Tokyo

The phenomenon of death, or disappearance of life, has two aspects. One is failure in the function of life and the other is dissolution of the structure of life. In order to model the latter aspect and examine the significance of it, the author contrived a "structurally dissolvable self-reproducing (SDSR) loop" by introducing the capability of structural dissolution into Langton's self-reproducing (SR) loop[1] in which death as functional failure has already been installed. To be more specific, a *dissolving state* '8' was introduced into the set of states of the cellular automata (CA) used for embodying the SR loop, besides other modifications to Langton's transition rules. Through this improvement, the SDSR loop can dissolve its own structure when faced with difficult situations such as a shortage of space for self-reproduction. This mechanism (disappearance of a subsystem of the whole system) induces, for the first time, dynamically-stable and potentially evolvable behavior into the colony of SDSR loops.

1 はじめに

本研究は、既に「機能破綻としての死」が組み込まれている有名な Langton の自己増殖ループ (SR ループ)[1] に「構造解消としての死」を導入しようという試みである。

生命の死には、システムの正常な機能が失われる「機能破綻としての死」と、システムの物理的な構造自体が消滅する「構造解消としての死」という2つの面があるが、これまででこの2つを明確に区別した議論はあまり行なわれてこなかった。そこで本研究では、機能破綻はあるが構造解消のないシステムに後者を導入することで「構造解消としての死」をモデル化し、そのもつ意義を明らかにすることを狙い、その題材としてセルラオートマタ (cellular automata, CA) 上に構築された自己増殖モデルとして有名な Langton の SR ループを選択した。これに幾つかの改訂を加えて「構造解消可能型自己増殖ループ (structurally dissolvable self-

reproducing loop, SDSR ループ)」を新たに構築し、それをを用いて実験を行なったところ、SR ループにおいては見られなかった興味深い現象が観察された。本稿では、Langton の SR ループの概要、SDSR ループの具体的な実現の方法、および実験によって得られた結果について簡単に紹介する。

2 Langton の自己増殖ループ

セルラオートマタ (CA) は von Neumann によって考案された離散物理系モデルで、 D 次元格子状の離散的な空間 Z^D 内の格子点上に均一に並べられた同一の機能をもつオートマトン (=セル) の集合について、時刻 t における座標 $z \in Z^D$ 上のセルの状態を $s_t(z) \in \Sigma$ (Σ は状態集合) としたとき、その時間発展が一律に

$$s_{t+1}(z) = \Delta(s_t(z+z_1), s_t(z+z_2), \dots, s_t(z+z_n))$$

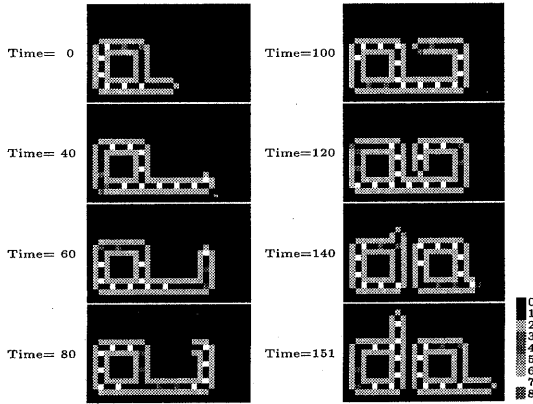


図 1: Langton の SR ループの自己増殖。右下のチャートは各状態が図中でどの色調で示されているかを表す。

の形で表されるようなモデルを指す。ここで、 $\Delta : \Sigma^n \rightarrow \Sigma$ は局所写像 (状態遷移規則とも呼ばれる) を、 $\mathcal{N} = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ ($z_i \in Z^D$) は近傍系をそれぞれ表す。CA は流体力学から人工生命まで様々な分野においてモデル化の手法として用いられており、特にこれを用いて生命の自己増殖をモデル化する試みについては、CA の考案者である von Neumann[3] をはじめ、これまでに様々な研究がなされてきている。

Langton の SR ループ [1] は、CA 上に構築された自己増殖モデルの中で最も有名なものの一つである。この SR ループは 8 状態 5 近傍 CA の上に考案されており、その構造は図 1(time=0) のようになっている。「鞘 (sheath)」と呼ばれる状態 '2' によって覆われたアルファベットの Q の形をした管の中に、状態 '4' や '7' などの信号が配置されている。各状態の名称と主な働きを表 1 に示す。

SR ループの中の信号は、隣接する状態 '1' の方向へ管の中を伝播してゆく。ループから外へ突き出された腕の先端に信号が到達すると、遺伝型から表現型への翻訳、即ち腕の伸長や屈折が生じる。腕が 3 回左折してその先端が自らの根元に接すると、それらが結合して新しい子ループが生じ、親ループと子ループの間の結合が消滅する。以上のようなやり方で、SR ループは 151 ステップかけて巧みに自己増殖を行なう。その様子を図 1 に示す。

SR ループは、子個体を生成し終わると、反時計回りに 90 度回転した形で再度同様のことを行なう。これから子個体を生成しようとする領域が既に他の個体によって占有されていた場合は、体内に鞘の小片を生成して信号の通り道をふさぐ。すると、時間とともに体内の信号はこの小片に吸収され、

表 1: SR ループを構成する各状態の名称と主な働き。

状態	名称	主な働き
'0'	背景	何も無い空間を表す default の状態。
'1'	芯	ループの管の中を満たし、中の信号を伝播させる。
'2'	鞘	ループの管構造を構成する。
'3'	信号	腕の左折や管同士の接合を補助する。
'4'	"	腕の左折を記述する遺伝情報を表す。
'5'	"	親と子の間の結合を解消し、次に腕を出す箇所を指定する。
'6'	"	子が最初に腕を出す箇所を指定する。
'7'	"	腕の伸長を記述する遺伝情報を表す。

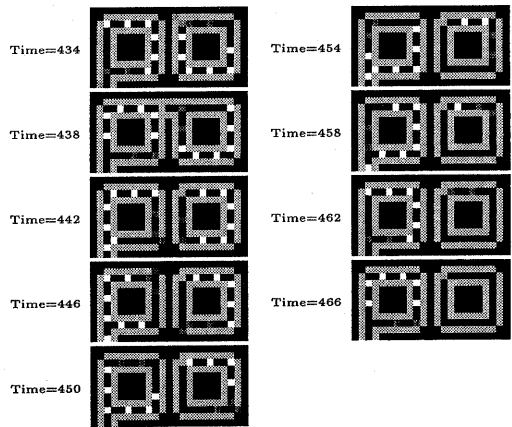


図 2: Langton の SR ループの機能破綻としての死。

最終的に環状の管のみが残る。その様子を図 2 に示す。これを見ると、Langton の SR ループには明らかに機能破綻としての死が存在しているが、構造解消としての死は実現されていないことがわかる。

3 構造解消可能型自己増殖ループ

本研究では、前章で紹介した Langton の SR ループを元に、構造解消の機能をもつ SDSR ループを以下の手順で構築した。詳細は文献 [2] に紹介されているので、ここではその概要のみを述べる。

第一に、Langton によって発表された SR ループの状態遷移規則は、単純な自己増殖の過程で発生する状況に対する規則のみに限られており、他の多くの状況については未定義のままであった。そこで、まず最初に状態遷移規則に対して、管の中における信号の伝播等について的一般則を定義する拡張を施し、未定義状況を大幅に削減した。

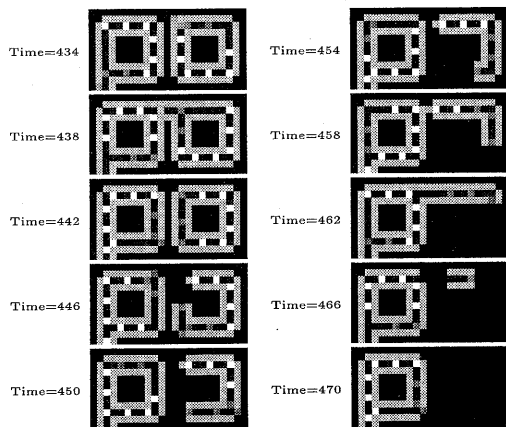


図 3: SDSR ループの構造解消としての死.

第二に、CA の状態集合に新しく解消状態 '8' を導入し、これに関する規則を次のように定めた。

1. 解消状態 '8' は無条件に '0' に遷移する。
2. 解消状態 '8' が近傍に存在するとき、
 - (a) 状態 '0' 及び '1' は、近傍に状態 '2'-'7' のいずれかがあれば '8' に遷移する。
 - (b) 状態 '2', '3', '5' は '0' に遷移する。
 - (c) 状態 '4', '6', '7' は '1' に遷移する。

これらの定義により、解消状態は、管の中を信号の流れと同方向に伝播しながら、近接する構造を順次解消していく能力を得る。

第三に、Langton から継承した状態遷移規則の中でただ 1 箇所、SR ループの死の最初に鞘の小片を発生させる規則を、代わりに解消状態を発生させるように修正した。

第四に、以上の定義によってもなお未定義となつて残った状況については、全て解消状態 '8' に遷移するものとした。

上記の改訂により、ひとたびあるセルが解消状態になると、それを含む一連の構造は解消状態の伝播により急速に消失するようになる。即ち、SDSR ループは、SR ループからそっくり継承した自己増殖能力に加えて、自らの構造を解消する能力を獲得する。SDSR ループが構造解消としての死を生じる様子を図 3 に示す。

また、構造解消の導入によって、SDSR ループは外から与えられる困難をある程度克服する能力をも獲得する。例えば、図 4 のようにループが増殖しようとする先に障害物 (鞘の小片) を配置した場合、

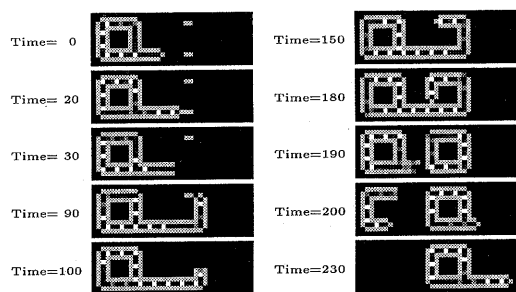


図 4: SDSR ループの器官構造解消.

SDSR ループは障害物を腕の先端と共に構造解消させることによって除去し、正常に自己増殖を行なうことがある。

4 実験

本節では、SR ループと SDSR ループとを用いて行なった幾つかの実験の結果を紹介する。

実験に先立ち、SR ループにも、解消状態 '8' に関するもの以外は SDSR ループと全く同様に状態遷移規則の拡張を施した。その際、未定義のまま残った状況については、状態遷移を起こさないと設定した。

4.1 無限空間内での自己増殖

第一の実験は、ループを無限空間内において自由に増殖させる試みである。図 5 は、無限空間内での増殖過程における個体の分布の変化を、SR ループと SDSR ループとを比較して示したものである。

成長するコロニーの外周部分においては、空間の閉塞がなく構造解消が生じないため、個体の様子は SR ループと SDSR ループとで全く同一である。しかしコロニーの内部においては、SR ループでは機能破綻を生じた個体の残骸が静的に残っているのに対し、SDSR ループでは構造解消が頻繁に生じて一度占有された空間が解放され、新たな個体が増殖している。図 6 は、双方の増殖過程における生存個体数の変化である。SDSR ループは、SR ループでは個体の死骸で埋まっているコロニーの内部に進出できるため、崩れた渦巻のような形に 2 次元的に広がる。このため、時間の進行にともなってその生存個体数は $O(\text{Generation}^2)$ に近付くと予想される。これは SR ループがコロニーの表面にしか増殖できず、その生存個体数が $O(\text{Generation})$ であるのに対して、本質的に異なっている。

Generation SR ループ

SDSR ループ

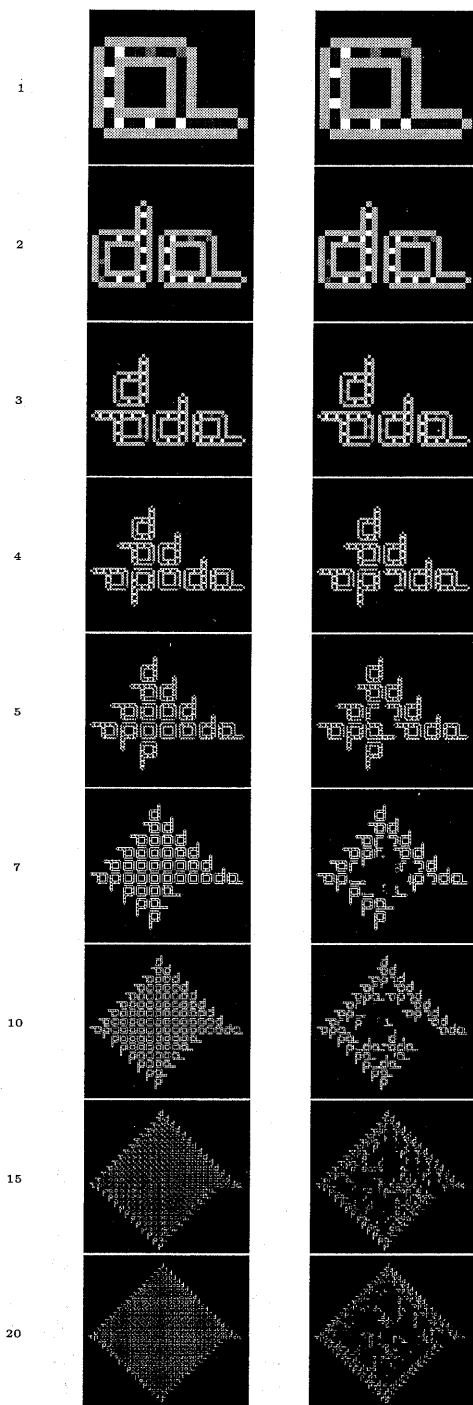


図 5: 無限空間内での SR/SDSR ループの増殖の様子。各図の縮尺はコロニーの大きさに応じて変更してある。1Generation は 151 ステップを表す。

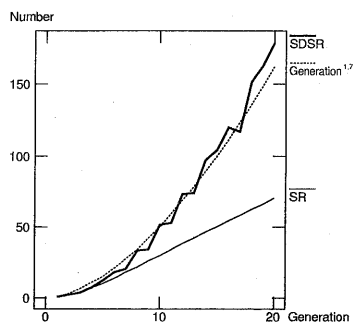


図 6: 無限空間内で増殖させた場合の SR/SDSR ループそれぞれの生存個体数の変化。参考までに Generation の 1.7 乗のカーブを併記した。

4.2 有限空間内での自己増殖

第二の実験は、有限空間内においてループを増殖させる試みである。図 7 は、有限空間内での増殖過程における個体の分布の変化を、図 5 同様に示したものである。空間の大きさは 200×200 セルとし、空間の境界は x 方向、 y 方向それぞれに周期的に連続しているとした。

SR ループの世界では、空間内に広がったコロニーの両端同士が空間の周期性により接触すると、未定義の状況が発生して機能破綻が生じ、自己増殖は正常に行なわれなくなる。やがて空間の全てが個体の残骸で充満されると、その後は永遠にそのままの状態がつづく。これに対して SDSR ループの世界では、新たな個体が増殖可能な空間が構造解消により継続的に生産されるため、自己増殖が活発に継続される。今回の実験では、10000 世代以上という極めて長期において自己増殖が継続されていることが確認された。

また、SDSR ループの自己増殖過程において、図 8 のように奇妙な形に融合したループが多数観察された。SDSR ループは構造解消の結果極めて長期に渡り自己増殖を継続することが可能となったため、このように表現型同士の直接の相互作用によって融合ループが生じるような稀少な状況に何度も遭遇するようになったものと考えられる。

4.3 有限空間内での生存競争

第三の実験は、有限空間内において、異なる種の SDSR ループの間に生じる生存競争を観察する試みである。今回拡張した規則の下では、信号 '7' の数が 4 以上であれば、任意のサイズのループを構築することができる。そこで、図 9 のように、異なる

Generation SR ループ

SDSR ループ

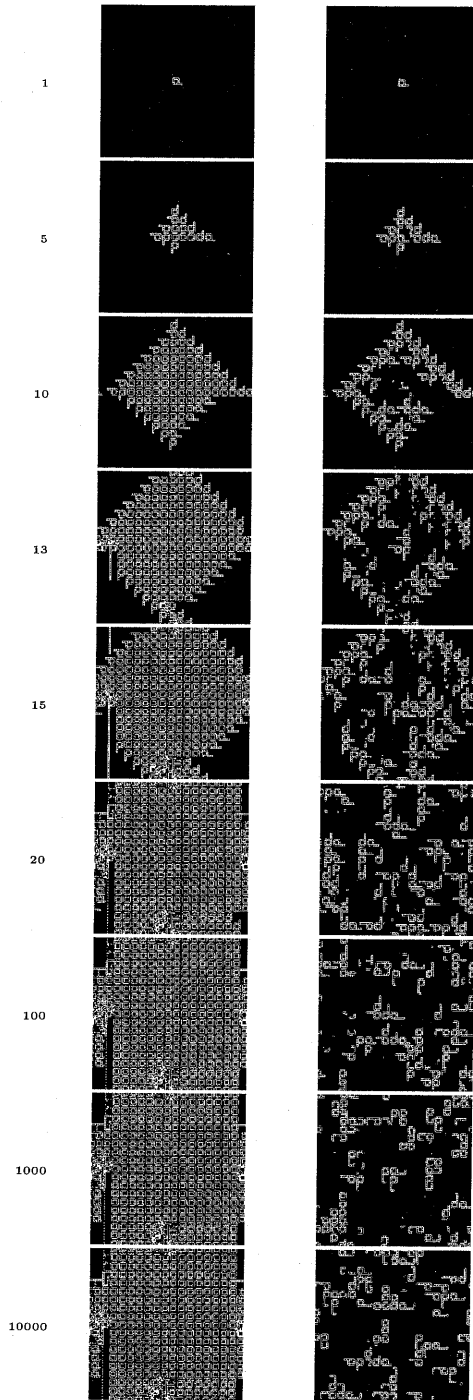


図 7: 有限空間内での SR/SDSR ループの増殖の様子. 各図は全て 200 × 200 セルに縮尺してある.

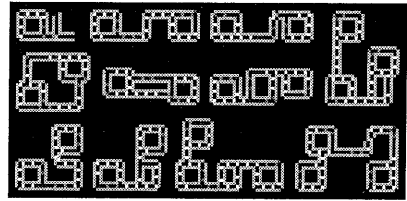


図 8: SDSR ループの増殖過程において, 表現型同士の間相互作用により生成された融合ループの例.

る 2 つの種のループを同一の有限空間内に配置して増殖させると, SDSR ループの世界において, time=10000 位までの間にどちらか一方が他方を駆逐する現象が観察された. また, 今回の条件の下では, 一般に小さいサイズの種の方が適応度が高いことも確認された. これは, 個体のサイズが小さければそれだけ 1 回の自己増殖に必要な時間が短く, かつ 1 つの個体の構造解消がコロニー全体に与える損失が小さくなるためであると考えられる.

5 考察

これまでに, 解消状態 '8' に関する規則以外は全く同一の 2 種類のループについて, その振舞いを比較してきた. その結果, SDSR ループの世界では, 次のような独特の現象が観察された. (1) 構造解消によって, 外から与えられる困難をある程度克服する能力が生じた. (2) 無限空間内での自己増殖の際, 生存個体数が 2 次関数的に増加するようになった. (3) 有限空間内において, 自己増殖が半永久的に継続された. (4) 増殖の過程で, 複数の個体の表現型が直接相互作用することにより, 融合した奇形ループが多数発生した. (5) 同一の有限空間内で増殖する異種ループ間に, 排他的競争が生じた.

このうち (2) は, 有限の大きさを持つコロニーの内部にループが再度進出可能になったためであるから, 本質的には (3) と同じことである. (4) は, 自己増殖が長期に継続された結果として, 融合ループを形成する稀少な状況が多数発生したのであるから, (3) が実現したことによる副産物であるとみなすことができる. また, (5) は, 双方の種の自己増殖活性が長期的に継続したことによって実現されたこと, 及び, 相手種を環境として見た場合には外的困難の克服に相当することから, (3) と (1) の両方に端を発する現象であると解釈できる. 以上のように考えると, 構造解消の本質的な意義は (1) と (3) にあるものと考えられる. この両者の違いは構造解消の生じる階層が器官レベルか個体レベルかの違いであり, システムの振舞いを考察する上ではそれほ

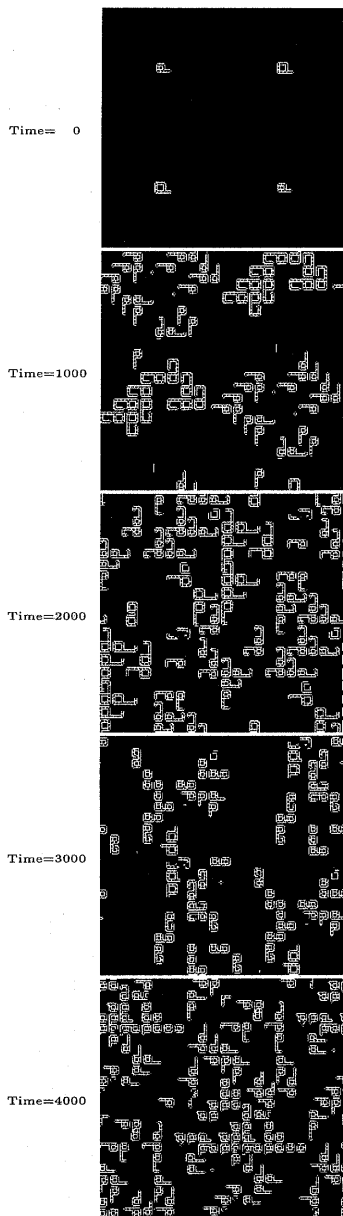


図 9: 信号 '7' を 4 つ持つ種 4 と, 6 つ持つ種 6 の間に生じた生存競争の例. 開始時点で左上と右下に種 4 の個体を, 右上と左下に種 6 の個体をそれぞれ配置して増殖させると, 徐々に種 4 が優勢になり, 最終的に種 6 は完全に駆逐される.

ど本質的ではないといえる.

両者に共通する重要な点は, (1)においても(3)においても, 構造解消が環境との不適合を生じたサブシステムを消滅させるある種のネガティブフィードバック機構として機能している, ということである. この機構により, 消滅したサブシステムが占有していた資源(この場合は空間)は, 後に別のサブシステムによって使用されるようになり, このプロセスの反復によって, システム全体に動的で適応的な安定性がもたらされるのである. 例えば, 個体は部分的な器官の解消によってその生存状態を確保し, コロニーは個体の解消によってそのダイナミックな振舞いを継続している.

また, 実験の結果, ループの表現型がそれらの直接の相互作用によって変化したこと, 及び SDRS ループの世界において異なる種の間には排他的競争が生じたことから, SDRS ループが表現型同士の直接の相互作用によって進化する可能性を潜在的に持っていることも示唆されている.

6 おわりに

本研究では, Langton の SR ループを改訂し, 構造解消の能力を備えた SDRS ループを実装した. この SDRS ループを用いて幾つかの実験を行なった結果, SR ループの世界では見られなかった動的な安定性や潜在的な進化可能性など, 注目すべき振舞いが新たに観察された.

なお, SDRS ループに関する情報は WWW (<http://proton.is.s.u-tokyo.ac.jp/sayama/sdsr/>) でも紹介しているので, 関心をお持ちの方には一度ご覧いただきたい.

参考文献

- [1] Langton, C. : Self-Reproduction in Cellular Automata, *Physica*, 10D pp. 135-144 (1984).
- [2] Sayama, H. : Introduction of Structural Dissolution into Langton's Self-Reproducing Loop, in Adami, C., Belew, R. K., Kitano, H., and Taylor, C. E. eds., *Artificial Life VI: Proceedings of the Sixth International Conference on Artificial Life*, Cambridge, Massachusetts (1998), MIT Press, (in press).
- [3] Von Neumann, J. : *Theory of Self-Reproducing Automata*, University of Illinois Press, Urbana (1966).