

機関番号：33302

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20500216

研究課題名（和文） 1/f ゆらぎにもとづく計算万能セルオートマトンの探索

研究課題名（英文） Search for computationally universal cellular automata by 1/f noise

研究代表者

蜷川 繁 (NINAGAWA SHIGERU)

金沢工業大学・情報学部・教授

研究者番号：50308087

研究成果の概要（和文）：

2次元セルオートマトンのライフゲームや1次元セルオートマトンのルール110に見られるように、計算万能性と1/f ゆらぎの間に関連があることが予想される。本研究では2次元3状態9近傍セルオートマトンにおいて1/f ゆらぎを示すルールを遺伝的アルゴリズムを用いて探索を行った。その結果、固定パターンや周期的パターン、さらにはグライダーのような移動パターンを備えたルールを見つけることが出来た。このルールではグライダーやグライダーを消滅させるイーター、さらにはグライダーの進行方向を直角にまげる固定物体があることがわかった。

研究成果の概要（英文）：

We search for two-dimensional three-state nine-neighbor cellular automata with a 1/f power spectrum by means of genetic algorithms under the assumption that there is a relationship between 1/f noise and computational universality in cellular automata. The power spectrum is calculated from the evolution of the state of the cell, starting from a random initial configuration. The fitness is estimated using the power spectrum by considering the spectral similarity to the 1/f spectrum. As a result, we obtained a rule with stationary, periodic, and propagating patterns and observed various interactions between them which suggest the possibility of supporting universal computation, although this remains unproven.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：複雑系

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：セルオートマトン、計算万能性、1/f ゆらぎ、遺伝的アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

コンピュータのようにアルゴリズムで表現できるものであれば何でも計算できる機能を計算万能性とよぶ。セルオートマトンの中にも計算万能性をもつものがあるが、そのようなセルオートマトンを設計することは

容易ではない。計算万能セルオートマトンとしては2次元セルオートマトンのライフゲームが知られているが、ライフゲームが1/f ゆらぎを示すことが研究代表によって示された(1/f Fluctuation in the “Game of Life”, S. Ninagawa, et al., Physica D, 118,

49-52 (1998)). さらに, 1次元セルオートマトンのルール110も, 計算万能性を持つことが証明されているが, $1/f$ ゆらぎを示すことが研究代表者によって示された (Power Spectral Analysis of Elementary Cellular Automata, S. Ninagawa, Complex Systems, 17, 399-411 (2008)). これらの結果からセルオートマトンにおいて計算万能性と $1/f$ ゆらぎの間には何らかの関連性があるのではないかと予想される.

研究代表者は2次元セルオートマトンにおいて $1/f$ ゆらぎを示すセルオートマトンを遺伝的アルゴリズムを用いて探索したところ, ライフゲームに極めて類似したセルオートマトンを発見することに成功した. これは $1/f$ ゆらぎを指標として万能計算セルオートマトンを探索することの有効性を示唆しているといえる.

2. 研究の目的

本研究ではライフゲームよりも状態数を1つ増やした2次元3状態9近傍セルオートマトンにおいて計算万能性をそなえたルールを見つけることを目指して, 遺伝的アルゴリズムを用いて $1/f$ ゆらぎを示すルールを探索する. ライフゲームにおける計算万能性は理論的に予想されているだけで実際にセル平面上で計算機を構成するには膨大なセル数のセル平面が必要とされる. それに対して, 本研究で対象とする3状態のセルオートマトンはセル数が増えることにより, ライフゲームよりも少ないセル数で計算機を構成できる可能性がある.

3. 研究の方法

対象となる2次元3状態セルオートマトンの状態遷移規則は135桁の3進数で表現することができるので, これを遺伝子型とする. テーブルウォークスルー法と呼ばれる方法を用いて遺伝子型を180個ランダムに生成して1集団とする. それらに対して1次選抜を行い, 選ばれたものだけに以下の処理を施す. 1次選抜では1024ステップという比較的短いステップ数のパワースペクトルから適合度を求めることにより, $1/f$ ゆらぎをする見込みのあるルールを選抜する. こうすることにより効率的に探索が行える. 次に本選抜では8000ステップにわたり状態遷移させてパワースペクトルを求め, 最小2乗法によって, 次式で近似した場合のパワースペクトルの傾き b と残差平方和 σ^2 を求める.

$$\ln(S) = a + b \ln(f),$$

ただし傾き b は周波数 $f=1 \sim 10$ の範囲で求める. これは $1/f$ ゆらぎでは特に低周波数域での振舞いが重要と考えられるためである. それに対し, 残差平方和 σ^2 は周波数 $f=1 \sim$

3000 の範囲で求める. これは, 周波数全域にわたって, パワースペクトルが $1/f$ ゆらぎに近いかどうかを判定するためである. こうして求めたパワースペクトルの傾き b と残差平方和 σ^2 から適合度 F を次式で求める.

$$F = |b| / (\sigma^2 + \delta) \quad b < 0 \text{ の場合}$$

$$F = 0 \quad b \geq 0 \text{ の場合}$$

ここで $\delta = 1.0 \times 10^{-6}$ は分母がゼロになることを避けるための項である. これによりパワースペクトルが $1/f$ ゆらぎに近いものほど高い適合度をもつようになる. 実験は集団の平均適合度に変化が見られなくなるまで繰り返す.

4. 研究成果

これまでに100通りの集団について合計で約17,000世代の計算を行い, 2,780,000種類のルールのパワースペクトルを求めた. その結果, もっとも高い適合度をもつルールの遺伝子型の3進数表現は2020212001100121101000000001002022200110012201011020212200010110112002000120000221110000000002000220021111002000001110102000010000 となり, そのパワースペクトルを図1に示す. このパワースペクトルの傾きは -1.225 で残差平方和は 1.46×10^{-4} , 適合度は8333である. しかし, このルールの高い適合度は主に, 残差平方和が小さいことによりであり, 生成されるパターンを調べてみたが, 計算機能に必須である伝播パターンが見つからなかった.

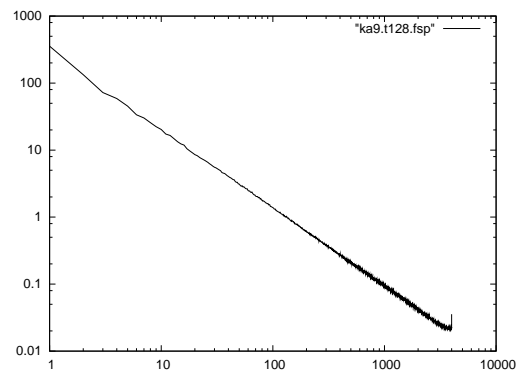


図1. 最大適合度のルールのパワースペクトル

もっとも計算万能性をもつ可能性が高いと思われるルールの遺伝子型の3進数表現は0222222110110002112002101201102220102220102102010010201002200100221210022212110022122121122011002002210101001002121012022200002220000 であり, そのパワースペクトルを図2に示す. このパワースペクトルの傾きは -0.535 で残差平方和は 4.94×10^{-4} , 適合度は1081である.

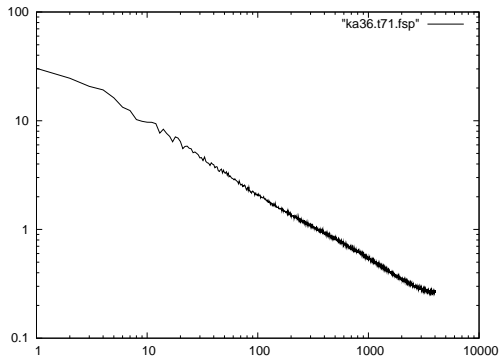


図2. 計算万能性が期待されるルールのパワースペクトル

このルールで発見できた固定物体を図3に示す. 今後, 状態0, 1, 2のセルをそれぞれ白, 黒, 網かけのマス目で表わす. 図3の右端のパターンにおいて一边のセルを増やすことによってより大きな固定物体を作ることができる.

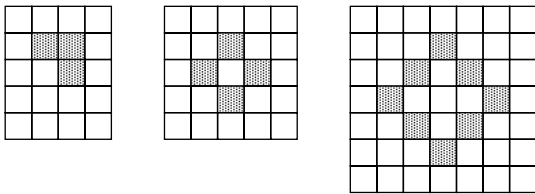


図3. 固定物体

また, 図4に周期2の周期物体の例を示す.

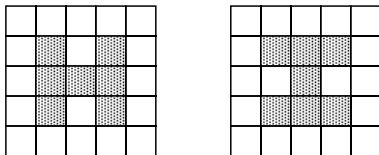


図4. 周期2の周期物体のパターン

図5には伝播パターンを示す. 2ステップごとに同じ形に戻り, 右に1セルだけ進む. このパターンをライフゲームにちなんでグライダーとよぶことにする.

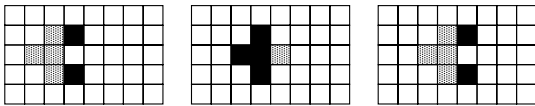


図5. 伝播パターン

図6にはグライダー同士の衝突の様子を示す. 左と下からそれぞれ飛来したグライダーが衝突して上向きのグライダーが生成される.

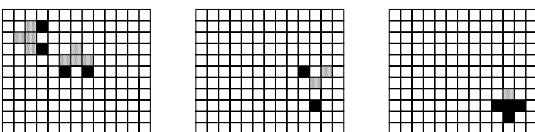


図6. グライダー同士の衝突

図7は図3に示した固定物体を並べて作られるイーターとよばれる固定物体がグライダーと衝突することにより, グライダーを吸収する様子を示している. また, 図8は別の固定物体を用いたイーターによるグライダーの吸収過程を示している.

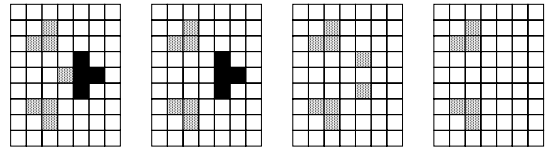


図7. イーターによるグライダーの消滅

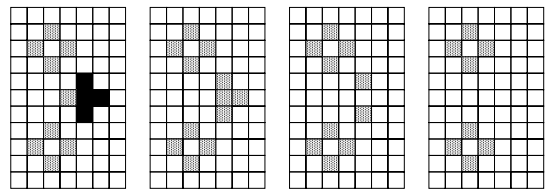


図8. 別のイーターによるグライダーの消滅

図9には図4で示した周期2の周期物体と右から飛来したグライダーとの衝突の様子を示した. 衝突の結果, 下向きのグライダーが作られるとともにイーターが新たに生まれる.

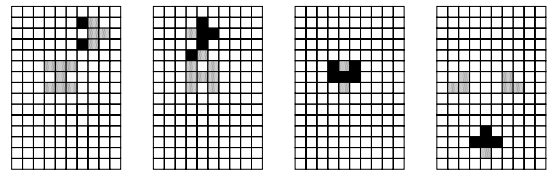


図9. 周期物体とグライダーの衝突

図10の上段は下から飛来したグライダーと固定物体の衝突によってグライダーが左に曲がる様子を, 下段は右から飛来したグライダーと固定物体の衝突によってグライダーが消滅し固定物体が2セル分下に移動する様子をそれぞれ示している.

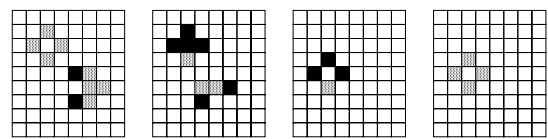
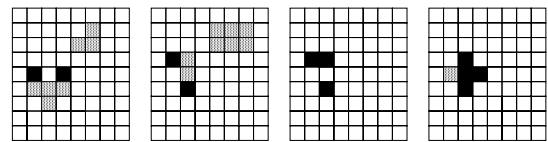


図10. グライダーと固定物体の衝突

図 1 1 に周期 6 の周期物体のパターンを示す (上段左から右へ t , $t+1$, $t+2$, 下段左から右へ $t+3$, $t+4$, $t+5$).

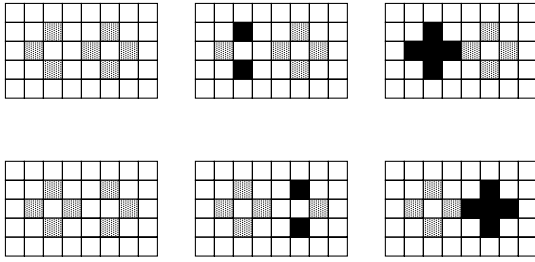


図 1 1. 周期 6 の周期物体

図 1 2 に周期 6 の周期物体と左から飛来したグライダーの衝突の様子を示す. 衝突によって左右に飛んでいくグライダーが生成される.

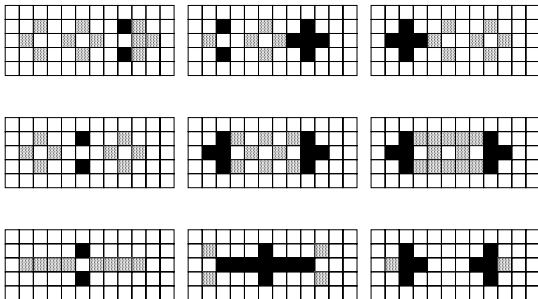


図 1 2. 周期 6 の周期物体と右から飛来したグライダーの衝突

このルールが計算万能性を有するかどうかは, 現時点では不明だが, 今後はこのルールで論理素子がつくれるかどうかを調べる予定である.

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕 (計 2 件)

蜷川 繁, 一次元セルオートマトンによるパーティ問題におけるカスケード過程, 電子情報通信学会論文誌, 査読有, Vol.J93-A, No.12, (2010), 821-824.

Shigeru Ninagawa, Evolution of Cellular Automata toward a LIFE-Like Rule Guided by $1/f$ Noise, IEICE transactions on information and systems, 査読有, Vol. E93-D, No. 6, (2010), 1489-1496.

〔学会発表〕 (計 5 件)

Shigeru Ninagawa, Search for Computationally Universal Cellular Automata by $1/f$ Noise, Artificial Life XII, 2010/8/22, オーデンセ (デンマーク).

〔図書〕 (計 0 件)
〔産業財産権〕
○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

蜷川 繁 (NINAGAWA SHIGERU)

金沢工業大学・情報学部情報工学科・教授

研究者番号: 50308087

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: