

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 11 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21500023

研究課題名（和文）世界で最小の同期プロトコルの開発と多次元アレイへの応用

研究課題名（英文）Developments of Smallest Synchronization Protocols and Its Application to Multi-Dimensional Cellular Arrays

研究代表者

梅尾 博司 (UMEI HIROSHI)

大阪電気通信大学 情報通信工学部 教授

研究者番号：80132356

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、1次元セルオートマトンのための、状態数が世界で最少の FSSP (Firing Squad Synchronization Problem) 同期アルゴリズムを開発し、多次元アレイ結合セルオートマトン上への応用を目指すものである。1次元セルオートマトンに対しては、多数の4状態解を得る。2次元アレイに対しては、7状態の FSSP 解を開発し、長方形アレイに対しては、9状態の最適時間 FSSP 解を得る。これらは現在知られている解の中で最小のものである。さらに再帰的2分割手法に基づく多次元アレイのための最適時間同期アルゴリズムを開発する。

研究成果の概要（英文）：

We study a firing squad synchronization problem (FSSP) that gives a finite-state protocol for synchronizing cellular automata (CA). In this research project, we made an investigation into smaller FSSP solutions not only for one-dimensional (1D) but multi-dimensional CAs. We present a class of smallest 4-state partial solutions for 1D the CAs. It is shown that there exists a 7-state square synchronizer for 2D square arrays, which is a smallest solution for square arrays, known at present. We also show that there exists a nine-state FSSP solution for 2D rectangular arrays. In the last, we have proposed a new class of optimum-time multi-dimensional FSSP algorithms based on recursive-halving marking.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・情報学基礎

キーワード：オートマトン理論・形式言語理論, アルゴリズム理論, セルオートマトン, 一斉射撃問題

1. 研究開始当初の背景

セルオートマトン(Cellular Automaton)は、

計算機の誕生に深く関わった von Neumann による自己増殖, 自己複製セルオートマトンの

研究に由来する。同一構造を持つ比較的単純な計算素子や有限オートマトンを規則正しく配列し、一様に結線したアレイ構造から構成されるセルオートマトンは、VLSI, SIMD 型並列計算機などの計算モデルとして研究が進められてきたが、近年では物理学、化学、生物学、医学、経済学などの分野でも幅広く研究されている。計算機科学に於いても、人工生命、マルチ・エージェントシステム、ダイナミカルシステム、カオス理論などに応用され、幅広く研究されている。また自然界、生物の体内、有機媒体、分子集団、バクテリア集団、脳細胞などにおける生体情報処理に共通する特徴は、均一で単純な計算素子を多数配置し、それらが集団で並列・分散的に局所的な通信を行いながら集合体として大局的な計算を効率よく行うところにある。こういった特徴は従来から知られているセルオートマトン理論が非常にうまく適合する分野であり、従来から多数の知見が集積されているセルオートマトン理論を応用することにより Natural Computing 等様々な分野の計算機構の解明、効率の良いアルゴリズムの設計が容易になるなど大いなる発展が期待されている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、1次元セルオートマトンのための、状態数が世界で最少の**同期アルゴリズム**(プロトコルとも呼ばれる)を開発し、多次元アレイ結合セルオートマトンへの応用を目指すものである。

セルオートマトン上での同期問題は**一斉射撃問題**(Firing Squad Synchronization Problem, 以下では **FSSP** と略す)として古くから知られ、von Neumann による自己増殖セルオートマトンの動作を一斉に開始させるための同期プロトコルを設計する問題として提案されて以来、数多くの研究がなされている。FSSP は次のように定義される。1次元セルオートマトンにおいて、時刻  $t=0$  時に左端に配置された将軍セルから発せられた命令により、**すべてのセルが動作開始後初めて且つ同時に同一の射撃状態**になるには、どのような局所的な通信をセル間で行えばよいか、そのセルの遷移関数を決定する問題である。すべてのセルが同時に同一の射撃状態になることにより、同期が実現される。

隣接セルとの局所通信のみで大規模なセル空間を同期に導き、セル空間全体のグローバル制御の一種と考えられる同期現象を実現するプロトコルは、局所的な計算を大局的な計算に反映させる非常に基本的かつ重要なアルゴリズムと認識されている。一斉射撃アルゴリズムと呼ばれる同期プロトコルは、その実現に必要な内部状態数、時間計算量、状態変化回数、ビット転送量などをパラメー

タとして比較され、とりわけ同期にいたる時間計算量と内部状態数が重要な評価ファクターである。例えば内部状態数に関しては、40 数年前に Goto [1962] が数千もの内部状態からなる最初の最適時間 (すなわち、 $n$  個のセルに対し  $2n-2$  ステップ) アルゴリズムを提案して以来、Waksman [1966] が 16 状態解を、Balzer [1967] が 8 状態解を、Gerken [1987] が 7 状態解を、Mazoyer [1987] が 6 状態解を示し、現在に至っている。Mazoyer [1987] による 6 状態解が世界で最少の最適時間アルゴリズムとして知られている。一方理論的にすべてのセル数  $n (>1)$  に対する 4 状態解が存在しないことはすでに、Sanders [1993], Berthiaume et al. [2004] らにより検証されており、5 状態アルゴリズムの存在の可否が、一斉射撃問題が提起されて以来、40 数年にわたり大きな未解決問題として残されていた。ところが 2007 年 9 月に Umeo and Yanagihara [2007] らが、 $n=2^k$ ,  $k=1, 2, 3, \dots$  で定義される 1 次元セル空間を同期に導く 5 状態解が存在することを示し、この未解決問題に部分解が存在することを世界で最初に示した。本研究は Umeo and Yanagihara [2007] らによるアプローチをさらに進め、従来とはまったく違った代数的手法に基づき、部分解として 1 次元 4 状態解を提案するとともにその手法の可能性を広く多次元アレイにまで追求するものである。

## 3. 研究の方法

本研究は研究代表者の研究室にて実施された。研究代表者の研究室にはネットワークで接続された 64 個の高性能パソコンがすでに設置されており、過去数年間に研究室にて独自に開発したセル・アルゴリズム設計支援システムが稼働中である。同システムは大規模なセルオートマトンの挙動をシミュレートすることが可能である。本システムの特徴は、セル空間の形状、アレイの次元性、セル間通信量、考察すべき問題の制約条件など、テキスト情報で記述されたパラメータに基づき、容易にシステムの再構成が可能で、ターゲット・セルオートマトンの動作並びにその上で実行されるアルゴリズムを様々な観点から動的に解析することが可能である。また本システムは、シミュレーション時のバックトラック機能、遷移関数におけるマスク付きワイルドカード設定などの機能を備え、複数ユーザが同一画面上でインタラクティブにセル・アルゴリズムを設計できる。セルオートマトンの挙動は極めて高度な非線形性を有し、その動作の予測、解の試算、アルゴリズム設計等には効率の良い計算機によるシミュレーションは必要不可欠である。

#### 4. 研究成果

##### (1) 1次元 CA 上での FSSP アルゴリズム ①リングアレイ結合セルオートマトン 上での FSSP

代数的セルオートマトンをベースとするリングアレイ結合 (図 1 参照) を有する 1次元アレイ上での 4 状態解を得る。図 2 は代表的な 4 状態解の遷移関数とその計算状況である。

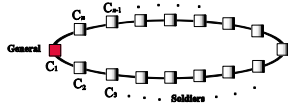


図 1. リングアレイ結合セルオートマトン

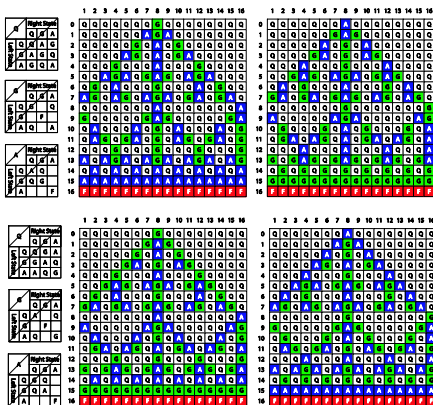


図 2. 4 状態解の遷移関数とその計算状況

②5状態の  $3n+0(1)$  ステップアルゴリズム  
5状態の  $3n+0(1)$  ステップアルゴリズムを開発した。図3は5状態の  $3n+0(1)$  ステップアルゴリズムの計算状況である。本アルゴリズムはセル空間のサイズに関して制限つきではあるが、その制御構造は非常にsimpleなものである。

##### ③1 Bit CA 上での FSSP

Umeo and Kamikawa [2002, 2003], Umeo et al. [2007] 等で提案している 1-Bit CA (隣接するセル間で 1 ビット/1 ステップの情報交換が可能なセルオートマトンで、従来から数多くの研究がなされているセルオートマトンのサブクラスに位置する) を通信手段とする 1次元並びに 2次元 CA 上での FSSP アルゴリズムを設計し、これらは国際会議 PaCT 2011 で公表された。

##### ④Number-Conserving CA, Inner-Independent CA 上での FSSP

FSSP 解を特徴づける Cellular Automaton の性質として、Number-Conserving CA, Inner-Independent CA を考案し、これらの CA 上で

動作する FSSP 解の設計に成功する。一部はすでに中国で開催された国際会議にて発表しているが、今後その詳細を公表する予定である。多次元アレイについても同様な考察を行い、解の存在を把握している。

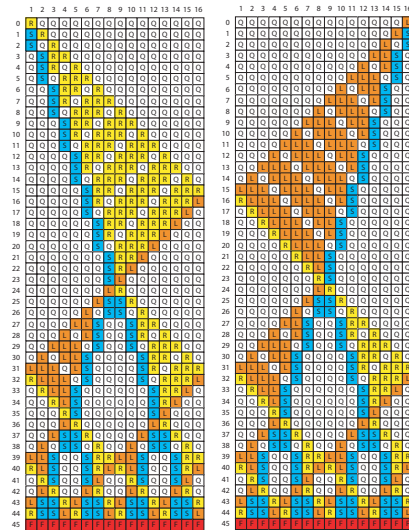


図 3. 5 状態の  $3n+0(1)$  ステップアルゴリズムの計算状況

(2) 2次元 CA 上での FSSP アルゴリズム  
2次元アレイ上における最適時間解を統一的な観点から見直し、整理する。これらは国際会議で公表された。2次元アレイ上における最適時間解を得る。本アルゴリズムは 2次元アレイを回転型 1次元 L 字アレイに分割し、それらの上に通常の 1次元 FSSP アルゴリズムと全く動作しなし stationary layer を交互に配置する手法で、Zebra-mapping という新しいアルゴリズムである。図 4 参照。2次元アレイ上におけるこれまでの最適時間最小 FSSP 解として、長方形アレイに対して Umeo et al. [2006, LNCS 3699] の 12 状態アルゴリズムが、正方形アレイに対して Umeo et al. [2002, LNCS 2493] の 9 状態アルゴリズムが最小のものとして知られているが、上記の Zebra-mapping 手法を適用することにより、より状態数の少ない FSSP 解が得られた。図 5 は Zebra-mapping 手法を適用した正方形アレイでの 7 状態解の計算状況である。長方形アレイに対しては、9 状態解が得られ、これらはともに現在知られている最小の状態数をもつ FSSP 解である。多次元アレイに対しても同様なアプローチが可能と思われる。

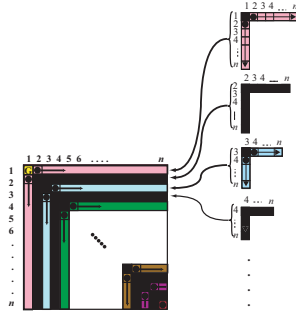


図4 Zebra-mapping 手法

さらに、2次元、3次元アレイに対して再帰的2分割マーキングを利用することにより、従来から知られていたアルゴリズムとは全く違った同期アルゴリズムの開発に成功した。同アルゴリズムの計算機上への実装を行い、384状態、112690個の遷移ルールから構成されることが判明した。これらは2つの国際会議 CiE 2011 並びに HPSC 2011 にて公表された。

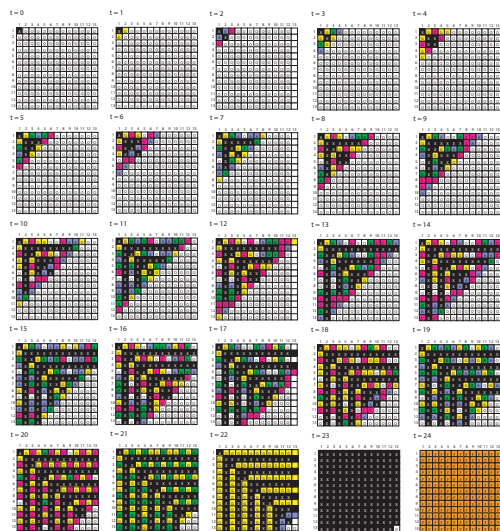


図5 Zebra-mapping 手法を用いた7状態解の計算状況。

(3) 多次元 CA 上での FSSP アルゴリズム  
 多次元アレイに対して再帰的2分割マーキングを利用することにより、従来から知られていたアルゴリズムとは全く違った同期アルゴリズムの開発に成功した。  
 これらの結果は2012年開催の国際会議にて発表される予定である。

FSSP 解の探索において、世界で最小の同期プロトコルの開発と多次元アレイへの応用に関する研究としておおむね順調に進捗したと考えている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 20 件)

- ① H. Umeo, T. Yamawaki, and K. Nishide: An optimum-time firing squad synchronization algorithm for two-dimensional rectangle arrays. *Journal of Cellular Automata*, Vol.7, No.1, pp. 31-46, (2012), (査読有).
- ② H. Umeo: Synchronizing square arrays in optimum-time. *International Journal of General Systems*, Vol. 41, No.6, pp.1-16, (2012), (査読有).
- ③ H. Umeo: Realizing global synchronizations for locally-connected two-dimensional rectangle cellular arrays. *Proc. of the 26th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications, AINA 2012*, pp.344-351(2012), (査読有).
- ④ H. Umeo: Synchronization algorithms for multi-dimensional cellular arrays. *Proc. of the 5th High-Performance Scientific Computing, HPCS-2012*, pp.212(2012), (査読有).
- ⑤ H. Umeo: Synchronizing large-scale locally-connected automata on two-dimensional square arrays. *Proc. of The 6th International Conference on Ubiquitous Information Technologies & Applications, CUTE 2012*, pp.265-270, (2011), (査読有).
- ⑥ H. Umeo and T. Yanagihara: Smallest implementations of optimum-time firing squad synchronization algorithms for one-bit-communication cellular automata. *Proc. of the 2011 International Conference on Parallel Computing and Technology, PaCT 2011, LNCS 6873*, pp. 210-223, (2011), (査読有).
- ⑦ H. Umeo, H. Uchino and A. Nomura: How to synchronize square arrays in optimum-time. *Proc. of the 2011 International Conference on High Performance Computing and Simulation (HPCS 2011)*, pp. 801-807, IEEE, (2011).
- ⑧ H. Umeo: Recent developments in firing squad synchronization algorithms for two-dimensional cellular automata and their state-efficient implementations. *Proc. of the 13th Intern. Conference on Automata and Formal Languages, AFL 2011*, pp.368-387, (2011), (査読有).

- ⑨ H. Umeo, K. Nishide, and T. Yamawaki: A new optimum-time firing squad synchronization algorithm for two-dimensional rectangle arrays - one-sided recursive halving based. Proc. of the Intern. Conf. on Models of Computation in Context, Computability in Europe 2011, CiE 2011, LNCS 6735, (B. Lowe et al. (Eds.)), pp. 290-299, (2011), (査読有).
- ⑩ H. Umeo, N. Kamikawa, K. Nishioka, and S. Akiguchi: Generalized firing squad synchronization protocols for one-dimensional cellular automata - a survey. Acta Physica Polonica B, Proceedings Supplement. Vol. 3, pp. 267-289, 2010, (査読有).
- ⑪ H. Umeo and Kubo: A seven-state time-optimum square synchronizer. Proc. of the 9th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, LNCS 6350, Springer-Verlag, pp. 219-230(2010), (査読有).
- ⑫ S. Adachi, J. Lee, F. Peper, and H. Umeo: Universality of 2-state asynchronous cellular automaton with inner-independent totalistic transitions. Proc. of 16th Intl. Workshop on CA and DCS, Automata 2010, pp. 153-172, (2010), (査読有).
- ⑬ H. Umeo: Two-dimensional cellular automata synchronizers. Proc. of the 4th WSEAS International Conference on Computational Intelligence, pp. 107-112, (2010), (査読有).
- ⑭ H. Umeo, K. Miyamoto, and Y. Abe: A Construction of Smallest Real-Time Prime Generators on Cellular Automata. Proc. of the 2010 2nd International Conference on Computer Technology and Development. pp. 338-342, IEEE, IACSIT, Cairo, Egypt, November 2-4, (2010), (査読有).
- ⑮ H. Umeo, T. Yamawaki and K. Nishide: An optimum-time firing squad synchronization algorithm for two-dimensional rectangle arrays - freezing-thawing technique based -. Proc. of the 2010 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS 2010), pp. 575-581(2010), (査読有).
- ⑯ H. Umeo, N. Kamikawa, and J.-B. Yunes: A family of smallest symmetrical four-state firings quad synchronization protocols for ring arrays. Parallel Processing Letters, Vol.19, No.2, pp.299-313, (2009), (査読有).
- ⑰ H. Umeo and T. Yanagihara: A Small Five-State Non-Optimum-Time Solution to the Firing Squad Synchronization Problem - A Geometrical Approach. Fundamenta Informaticae, 91(1), pp.161-178, (2009), (査読有).
- ⑱ H. Umeo, J.-B. Yunes, N. Kamikawa, and J. Kurashiki: Small non-optimum-time firing squad synchronization protocols for one-dimensional rings. Proc. of the 2009 Intern. Symp. on Nonlinear Theory and its Applications, NOLTA'09, pp. 479-482, (2009), (査読有).
- ⑲ H. Umeo, J.-B. Yunes, and T. Yamawaki: A simple optimum-time firing squad synchronization algorithm for two-dimensional rectangle arrays. Proc. of the 1st 2009 Intern. Conf. on Computational Intelligence, Modelling and Simulation, IEEE Computer Society, pp.120-125, (2009), (査読有).
- ⑳ H. Umeo, K. Ishida, K. Tachibana and N. Kamikawa: A construction of real-coded transition rule set for Shinahr's optimum-time synchronization algorithm on two-dimensional cellular arrays. Proc. of the 24th Intern. Technical Conf. on Circuits/Systems, Computers and Communications, ITC-CSCC 2009, pp.251-254, (2009), (査読有).
- [学会発表] (計 11 件)
- ① H. Umeo, K. Nishide, and T. Yamawaki: Synchronizing two-dimensional cellular automata in optimum-time, IPSJ SIG Technical Report, 情報処理学会, 2011年5月17日, 秋田県立大学, Vol.2011-AL-135, No.6, pp.1-6, (2011), (査読無)
- [図書] (計 6 件)
- ① H. Umeo: Cellular Automata. in  $\Upsilon$ textit{Encyclopedia of Designs in Forms and Functions}, pp.336-339, Maruzen Publishing, Tokyo, (2011).
- ② 梅尾, F. Peper (監修), 足立, 磯川, 今井, 小松崎, J. Lee (訳): セルオートマトン, 共立出版, pp.250, (2011). 原著: J. L. Schiff: Cellular Automata, Wiley-Interscience, (2009).
- ③ H. Umeo: Problem solving on one-bit-communication cellular

automata. Chapter 6, pp.117-144, in *Simulating Complex Systems by Cellular Automata*, (ed. A. G. Hoekstra, J. Kroc, and P.M.A. Soot), Springer, Berlin-Heidelberg, (2010).

- ④ S. Bandini, S. Manzoni, H. Umeo, and G. Vizzari (Eds.): Proceedings for 9th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry ACRI 2010, LNCS 6350 (2010), pp. 672, Springer.
- ⑤ H. Umeo: Firing squad synchronization problem in cellular automata. *In Encyclopedia of Complexity and System Science*, R. A. Meyers (Ed.), Springer, Vol.4(2009), pp.3537-3574.
- ⑥ F. Peper, H. Umeo, N. Matsui, and T. Isokawa (Eds.): Proceedings for 4th International Workshop on Natural Computing, Himeji, September, PICT 2, pp.390, (2009), Springer.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

梅尾 博司 (UME0 HIROSHI)  
大阪電気通信大学・情報通信工学部・教授  
研究者番号 : 80132356