

修士論文

自律分散協調システムを用いた
音響生成装置の制作に関する研究

Sound Generation using
Autonomous, Distributed, and Coordinating System

04108 齊田一樹

情報科学芸術大学院大学 メディア表現研究科 スタジオ 2

提出日 2006 年 1 月 26 日

目次

1	はじめに	1
2	導入と研究動機	2
2.1	本作品の制作目的	2
2.2	制作物の仕様	2
2.3	実装	4
2.4	付随制作物	5
2.5	解析への興味	5
2.6	制作物は「何」か？	6
3	関連研究	7
3.1	関連研究 1：自律分散協調システムとその解析	7
3.1.1	自律分散協調	7
3.1.2	複雑系・カオス	8
3.1.3	セルオートマトンと複雑さのクラス分け	9
3.1.4	Random Boolean Network(RBN)	10
3.1.5	マルチエージェントシステムと相互作用の評価手法	10
3.1.6	関連研究 1 のまとめ	10
3.2	関連研究 2：コンピュータ音楽と自律分散協調システム	12
3.2.1	コンピュータ音楽とセルオートマトン	12
3.2.2	コンピュータ音楽とマルチエージェント	12
3.2.3	コンピュータ音楽と実空間マルチエージェントシステム	13
4	理論と実施計画	14
4.1	研究のねらい	14

4.2	相互情報量	15
4.3	離散時間フーリエ変換	16
4.4	複雑さ	17
4.5	実施計画	17
5	実験	18
5.1	実験の環境設定	18
5.1.1	単体オートマトンの設計	18
5.2	実験 1：実験系のとりうる相互情報量	20
5.2.1	目的	20
5.2.2	手順	20
5.2.3	結果	20
5.2.4	考察	21
5.3	実験 2：音量のふるまい	21
5.3.1	目的	21
5.3.2	手順	21
5.3.3	結果	22
5.3.4	考察	24
5.4	実験 3：音の中心の移動	25
5.4.1	目的	25
5.4.2	手順	25
5.4.3	結果	25
5.4.4	考察	27
6	結論とまとめ	28
6.1	音量変化と定位変化	28
6.2	1/f ゆらぎ	28

6.3	制作物との関係	29
6.4	まとめ	30

1 はじめに

近年，コンピュータサイエンスの分野では マルチエージェントシステム・ユビキタスコンピューティング・グリッドコンピューティング といった単語で代表される，「多数のシステムを組み合わせることで目的を実現する」分野の研究と，そのハードウェアとしての実用化がさかんになってきている．その技術的背景は主に，第一に安価で少数の部品を用いても高度な処理が可能になったこと．つまり，多数のハードウェアを物理的に配置するシステムの実現が経済的側面や開発の難易度の点で，同一の機能を実現する単一で複雑なシステムを作ることと大きな差がなくなってきたことと，第二に単一のシステムでは解決困難な問題があることの二点があげられる [1]．本研究の動機は，「音響生成にこの『多数のシステムの組み合わせ』技術を応用することで，新しい方法を提案できないだろうか」ということである．また上述の背景から，計算機シミュレーションのみならず物理的ハードウェアで実装することが現実的であるため，その試みをしたいと考えた．

以上述べた背景から，本学の三原聡一郎氏，むぎばやしひろこ氏とともに，「多数の音が出るものを組み合わせた音響生成装置」を共同作品として制作した．筆者はこの共同制作に電子工学・デジタル信号処理の分野から参加している．筆者が共同作業で果たした役割は，単体ハードウェアの設計と，制作物の振る舞いを定量的に解析することである．

2 導入と研究動機

筆者らはこれまでに、2種類の作品を共同で製作してきた。

1つめは、回転運動する単体同士が近づくと反応し、音を出すもの、2つめは、人間が周波数を変更可能なたくさんのオシレータを用いたものである。

2.1 本作品の制作目的

これまでのものは、1つ目のものは音の入出力以外の要素が多く含まれていたため、制作が困難な割に目的の現象を得る事が難しかった。2つ目のものは、人間が介在しないと系がなりたたない。

これらの問題点を解決するため、要素を最低限に絞り、またこれらが自律的に状態を変更するようにしたものが本作品である。

2.2 制作物の仕様

制作物の単体の仕様は、以下の通り、非常にシンプルなものである。

- 音声が入力されると、ある確率 $P(a)$ で反応する
- 反応したら、一定時間 (Δt) 待って、一定時間 (Δt) 音を出す
- 音を出している間は、入力があっても無視する
- 音の種類は3種類 ($f_1[Hz], f_2[Hz], f_3[Hz]$) で、反応するたびに順番に出る

仕様を状態遷移図と遷移表で表すと、以下の図1、表1のようになる。

表 1 実装した単体自律システムの状態遷移

状態名	内部状態	出力	遷移先
S_0	初期状態・入力受付	なし	$S_{1'}, S_0$
$S_{1'}$	Δt 待機	なし	S_1
S_1	発音と入力受付	Δt 間音発生 (f_1 Hz)	$S_{2'}, S_1$
$S_{2'}$	Δt 待機	なし	S_2
S_2	発音と入力受付	Δt 間音発生 (f_2 Hz)	$S_{3'}, S_2$
$S_{3'}$	Δt 待機	なし	S_3
S_3	発音と入力受付	Δt 間音発生 (f_3 Hz)	$S_{1'}$

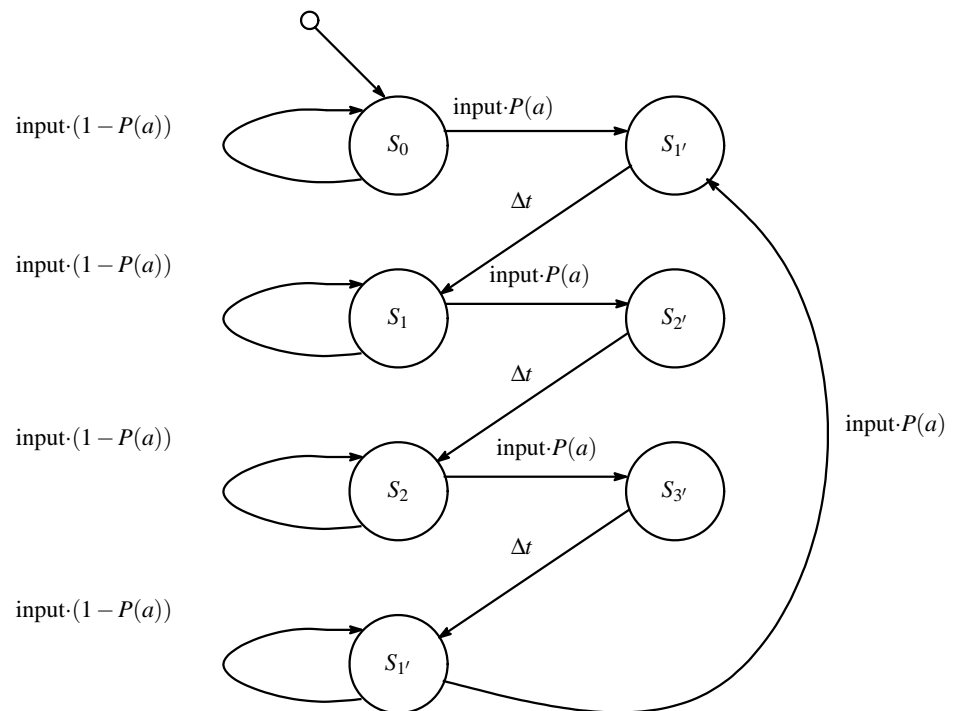


図 1 単体の状態遷移図

2.3 実装

これまでの制作物では電子部品により各パラメータ（周波数・時間等）を実装していた。このとき、著しい仕様の硬直化と、部品点数の増加による多数を作った場合の歩留まり、メンテナンス性の悪さが問題となった。まず使用する部品点数を減らすことによるコストパフォーマンス・メンテナンス性・歩留まりそれぞれの向上を意識した。また、仕様が簡単に変更できるようにマイクロコントローラを用いた。

コストパフォーマンスを考慮しなければ、もっとも開発に適している環境は、通常の計算機による方法だろう [2]。今回、実際には 50 個制作した。通常の計算機を用いた場合、大幅にコストが上昇してしまう。以上の点を考慮した結果、両者の中間であるマイクロコントローラを使用することとした。マイクロコントローラを使用する利点や、電子部品とプログラムのどちらで機能を実装するかというトレードオフなど、設計時にマイクロコントローラを使用する場合の問題については [3] に詳しい。今回使用したマイクロコントローラは、その中でも外付け部品が比較的少数で済む上、必要な性能が期待でき、また安価（1 個 270 円で入手可能）であるという理由から AVR Mega8[4] とした。マイクロコントローラを用いて音響を発生させる方法もさまざまなものが考えられた。今回は共同制作者の希望により、正弦波を発生させる必要があった。正弦波の発生方法に限ってもいくつか考えられるが、数値をメモリ内に 2 つ持つだけで実現できる iir フィルタ [5, 6] による方法がもっとも適していると考えた。iir フィルタによる正弦波の発生方法は文献 [7] に掲載されている方法によった。有限語長フィルタ構造と発生できる周波数の関係は筆者の過去の研究 [8] とその参考文献に詳しく述べてある。以上のことを考慮して制作した実装物が図 2 に示すものである。マイクロコンピュータ以外の部品は、マイクとスピーカー、そしてそれぞれのためのアンプが基板には実装されている。回路図とプログラムは本論文の付録とした。



図2 実装した単体

2.4 付随制作物

今回の制作は共同制作であるため、他のあまりマイクロコントローラのプログラミングに詳しくない人にも、開発ができるように配慮した。

周波数と持続時間を入力すると、対応するCソースコードを生成する Web アプリケーションを制作した*¹。

これを用いることで、開発環境を入れておけば機械的な操作でマイクロコントローラのプログラムを書き換えることができるようになった。

2.5 解析への興味

以上述べた経緯で単体が作られた。この単体を組み合わせたとき、全体としてどのようなふるまいをするだろうか。また条件を変えてみたとき、それは全体にどのような効果をもたらすだろうか。筆者はこのように疑問を持った。このとき、やってみてその結果を定性的（感覚的）に判断し、自分がいいと思うようなふるまいをするまで設計を続けるという方法と、定量的（数字で表現できる）解析による方法がある。どちらの方法にもそれぞれ優れている点があるだろう。筆者は定量的な判断による解析手法について興味があり、また可能であると判断したため、その方法を見つけたいと考えた。

*¹ <http://www.kinoshita-lab.org/moids/moids4.php/>

2.6 制作物は「何」か？

定量的解析をするにあたり，制作物の解析がどの分野の何にとしてモデル化可能であるかということを検討する必要がある．詳細な分野の定義は4で述べるが，その前になぜその分野に属するのかということの説明が必要だろう．図1と表1に示したように，単体の制作物は状態とその遷移条件がある．状態の数が決まっています，状態間の遷移規則があるものを有限オートマトンという．有限オートマトンによってモデル化できる物理的なシステムを「自律」システムという．この自律システムを多数存在させる．このようにしてできる状況を「分散」という．制作物は，別の単体が発した音に反応して自分も音を発する．このような相互作用を「協調」動作という．1つの単体のマイクと，別の単体のスピーカーを反応するように接続していくと，1つの単体からの動作を見ても決してわからない複雑な音量・定位・音のパターンのダイナミックな動きが生まれる．このような多数の要素がそれぞれ局所的な相互作用をすることによって，全体的な性質が生まれる現象を創発という [9]．以上のことから，「単体の制作物をお互いに反応するように並べたもの」は一般に自律分散協調システムと呼ばれるものとして必要な要素を満たしている．以上の経緯で，本論文の題名は，「自律分散協調システムを用いた音響生成に関する研究」とした．自律分散協調システムは非常に広い概念であり，さらに自律分散協調システムの中のどの分野に属するものであると考えるかによって，解析方法は異なる．以降の節では，これまでに自律分散協調システムとしてどのようなものがあり．それがどのようにして解析されてきたのかと，音響生成にどのように応用されてきたのかを見ていく．

3 関連研究

3.1 関連研究 1：自律分散協調システムとその解析

3.1.1 自律分散協調

自律分散協調システムとは何か．この 20 年程度で，計算機システムやロボットなどを用いて目的の仕事を達成するのシステムが大規模化かつ複雑化してきた．大規模化や複雑化を，単一のシステムを前提として拡張的に実装していく場合，システムの信頼性や柔軟性を高めるのが困難であることがわかってきた [1]．そのため，単一・中央集権的で複雑なシステムを開発するというアプローチとは別に，比較的複雑でないシステムを多数用いることで問題解決をする考え方が提唱されている．1 つ

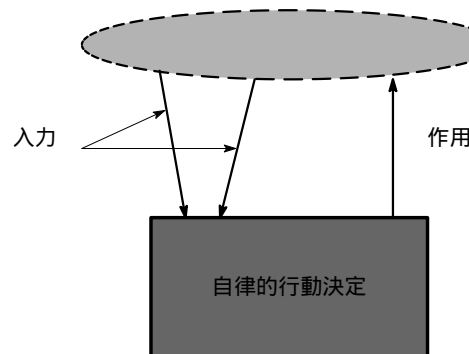


図 3 自律システムのモデル化

のシステムは単純な動作をする．そのシステムは外部からの情報をもとに，自らの行動を決定する．このようなシステムが多数用いて，それぞれの自律システムが集まることによって作られるシステムを「自律分散協調システム」という．自律分散システムの一般的な構成を図 4 に示す．自律分散型のシステムにおいて自律システムはそれが物理的存在であるか否かにかかわらず，自らの作業空間において局所的に相互作用をするものである [10]．分散とは処理の形態の物理的特性のことを言う．問題や処理主体が物理的に分散された環境（情報も分散している）においていかに振舞うかという問題設定のことであり，協調とは，複数のエージェントが各々単独に処理することの和以上の成果が全体として発揮できるような処理方式のことをさすと考え

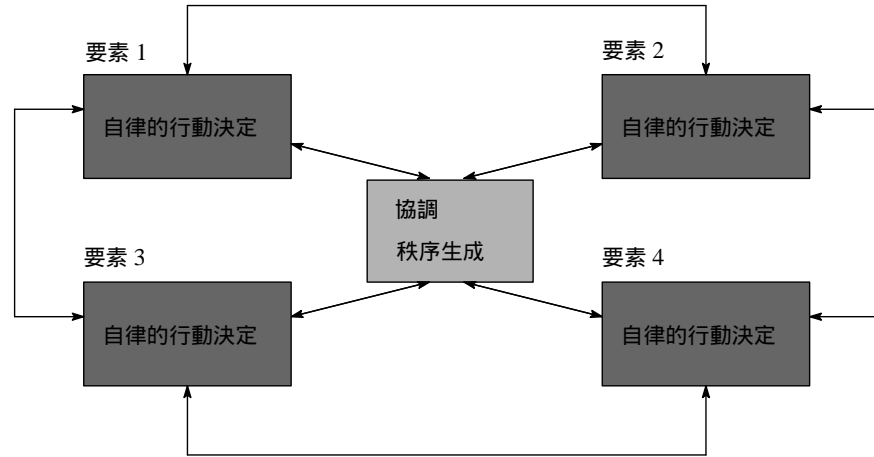


図 4 簡略化した自律分散システムの構成図

る．全体が部分の和以上であるときに，それを協調的システムであるというのである [11]．

3.1.2 複雑系・カオス

自然界には，様々な秩序 (パターン) の形成，維持が見られる．温度の低下による液体の結晶化や磁性体における自発磁化などの相転移現象はミクロな原始や磁石の整列による熱平衡系の静的な秩序形成であり，生物の形態形成，熱対流運動などは非平衡開放系におけるマクロな動的秩序の形成である [12]．このような自然現象を分析するための理論がこれまでに多く考えだされてきた．最初の詳細な分析は，Prigogine によるものである．非平衡開放系において形成される秩序の構造を「散逸構造」と名づけて，秩序の自発的生成に対して明快な説明を与えた [13]．物理系に限定せず，一般このような秩序形成を研究する分野を複雑系という．複雑系の定義や，それを用いたシステムの定義は現在存在しないが，文献 [9] では，以下のように述べられている．

あるシステムを想定しよう．そのシステムを構成している要素は各自のルールに従って機能しており，局所的な相互作用によって全体の状態・振舞いが決定される．そしてそれらの全体的な振舞いをもとに個々の構成要素のルール・機能・関係性が変化していく．このようなシステムを本書では二重括弧付きで『複雑系』(Complex System) と呼ぶことにする．(中略)『複雑系』という言葉

は、単なる「複雑なシステム」や「複雑性を生み出すシステム」という意味ではない。

この『複雑系』科学の世界観を形成する要素の一つにカオスがある。カオスとは、規則に従って発生したにもかかわらず、不規則に見える振舞いを示す現象のことである [9]。以降の 2 節では、規則に従って発生する不規則なふるまいの例として、セルオートマトンと Random Boolean Network を見る。

3.1.3 セルオートマトンと複雑さのクラス分け

セルオートマトン (以下 CA) とは、一様なオートマトンをある次元で配置したシステムのことであり、J. von Neumann によって考案された [14]。各セルは次の状態を、現在の自分の状態と近傍の別のセルの現在の状態によって決定する。たとえば、1 次元 3 近傍 2 状態を仮定する。この系は 1 次元で、自分とその両隣の 3 つのオートマトンの現在の状態から、次の状態を 2 状態のどちらかに決定する。今、3 近傍を一つの系と見たとき、その数は全部で $2^3 = 8$ 種類ある。8 種類のパターンそれぞれで、次の自分の状態を 2 とおりに決定する。ルールは合計で $2^{2^3} = 256$ 通りある。この次元・状態数・近傍とする数によって決定される各ルールでの系全体のふるまいを、Wolfram は 4 種類に分類した [15]。

- クラス I いずれかの状態にすべてのオートマトンが収束する
- クラス II ある安定した周期に落ち着く
- クラス III 2 状態がランダムに現れる
- クラス IV 複雑で、時間発展が局所化され、長い過渡状態を持つ

C. Langton はセルオートマトンに λ パラメータを導入した。これはセルがとりうる状態のうち、任意の 1 状態を静状態と定義したとき、セルが静状態に遷移しない確率のことである。これを 0 から 1 のまで変化させたとき、系の相互情報量が徐々に増えていき、ある点で最高となり再び下降する。相互情報量がもっとも高い点付近が、クラス IV に分類できることを示した [9]。

3.1.4 Random Boolean Network(RBN)

各オートマトンが2状態をとり、それぞれのオートマトンの遷移規則が異なることを許し、接続先も近傍のみでなく系に存在するオートマトンに自由に接続できるような系を Random boolean Network(以下 RBN) という [9, 16]。オートマトンと接続先が近傍に限定されが一様であるセルオートマトンの拡張と考えられる。最近では RBN のさらなる拡張が進んでおり、

- 2状態の遷移規則に確率を導入したもの
- 状態数を増やしたもの
- 全体が非同期で動作するもの
- 接続状態が動的に変更可能なもの
- それぞれの組み合わせ

といった系の解析が試みられている [17, 18, 19, 20, 21]。CA に λ パラメータが導入されたものと近い研究に、 p パラメータという静状態になる確率を用いた解析 [17] や、ハミング距離を用いた周期性の解析などがある [22]。

3.1.5 マルチエージェントシステムと相互作用の評価手法

マルチエージェントシステムは、学習などの高度な機能を持つことが可能なエージェント同士の協調動作による自己組織化、つまり個々の要素の相互作用により全体的な秩序を生み出すことを目的としている [11]。そのため、マルチエージェントシステムの、各エージェント間相互作用の評価手法に対する需要が生まれ、いくつか提案されている。これまでに、相互情報量を用いた相互作用の解析として研究 [23] や研究 [24] などがされてきた。これにより、この方法が一般的に相互作用の定量的解析に有効であることが示されている。

3.1.6 関連研究1のまとめ

本節で紹介した CA, RBN, マルチエージェントはいずれも、局所的な個々の動作が全体的な秩序を作り出すふるまいの解析をしている。このような全体的な秩序の生成を創発現象ということは 2.6 で述べた。制作物をたくさん組み合わせた状況解析を

するには、上記のいずれかの分野で適当なモデルが見つければよいということがわかった。CA は RBN のうちで、接続が近傍にしか許されていない点とすべてが一様なオートマトンで構成されているという点で特殊な場合である。RBN はマルチエージェントのうちで各オートマトンが学習することがないという点で特殊な場合であると考えられる。創発現象の解析という範囲で考えると、本節で紹介した研究は図 5 のような関係になっている。

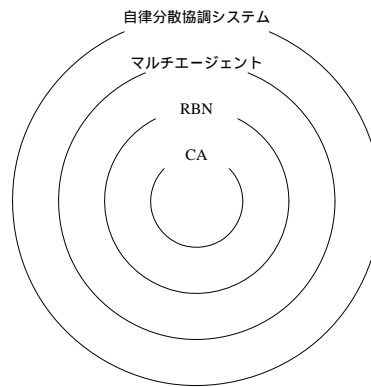


図 5 関連研究の関係

3.2 関連研究 2：コンピュータ音楽と自律分散協調システム

上述の分野に固有の創発現象の面白さに着目し、音響生成や楽曲構造の生成など、音楽への応用が数多く試みられてきた。これまでに研究としてまとめられている例に限定しても、オートマトンを作曲に用いる例は、さまざまなものが考えられている [25]。3.1 で述べた各システムの解析結果は、抽象的な数値として表現される。この数値に対して音響生成のどのパラメータを当てはめるのか、また 1 動作の時間 (タイムステップ) をどうするか、といった問題は、本質的には数値と無関係であり、このため設計者個人の恣意性に依存する問題である [26]。そのため本論文では制作物とパラメータの当てはめ方やタイムステップが近いものについてのみを挙げることにした。

3.2.1 コンピュータ音楽とセルオートマトン

CA を用いた音響生成は、これまで音響生成の各種パラメータにわたって検討や実装が行われてきた。文献 [27] や、文献 [28] に引用されている内容が参考になる。1 次元の CA を使って、各セルを音符の音の高さに割り当てた単純な例が [29] にある。cellular automata music [30] では、2 次元の CA を使い、さまざまなルール使い同様のことをした例が多く紹介されている。CAMUS [31] は、Lifegame と呼ばれるルールの 2 次元 CA を使い 3 和音を定義し、DemonCyclic Space と呼ばれるルールの 2 次元 CA を使ってそれを演奏する楽器を選択するという重層的な構造になっている。

3.2.2 コンピュータ音楽とマルチエージェント

マルチエージェントシステムを同様の方法で利用している例が、Tim Blackwell と Michael Young による Swarm Music [32] という研究である。これは仮想 3 次元空間上を移動する複数のエージェントの x, y, z 方向にそれぞれ音の高さ、大きさ、繰り返しのテンポを割り当てたものである。同時に外からの音の入力にも反応するようになっていて、入力された音によりエージェントの動きが変化している。もう一つの例として、徳井直生の Sonasphere [33] を挙げる。

物理法則が支配する仮想的な 3 次元空間を仮定し、その中で機能単位のネッ

トワークが組み上げられる。音に作用するプロセス(エフェクタ、ミキサーなどは)は、3次元空間上の球ノードとして表現され、ノードをつなぐ線はそこに音声信号の流れるバス、あるいは制御関係があることを示している。ネットワーク・ノードの3次元空間内の位置は、そのノードの持つパラメータに関係づけることができる。また、ノード間の相互作用を実現するために、ネットワークのリンクにバネのようなモデルを適用し、標準の長さからの変位に応じて力が働くものとした。また、ノード自体に対しても仮想的な電荷を定義しそこにクーロン力が働くことと仮定している。ノード同士が衝突した際にある一定の条件が満たされるとそこに新しいコネクションが生まれる。ユーザの操作や状況に応じて、このコネクションは切れたり、また新たに結ばれたりといった動作を繰り返す。これによって、ノードのネットワークは、Biosphere of Sounds の副題が示すような有機的な振る舞いを示すようになり、それがさらに出力される音へとダイレクトな影響を及ぼす。以上のような相互作用するネットワークは、空間を支配する重力などのパラメータの変化やマウス入力に応じて、多種多様な振る舞いを示す。

3.2.3 コンピュータ音楽と実空間マルチエージェントシステム

いままでの例はすべてが計算機上の仮想的空間での実装されたものである。マルチエージェントシステムで実空間に実装された例もいくつかある。江渡浩一郎による SoundCreatures[34] は、実空間の平面上を移動する複数のロボットに対して音のパターンを割り当てたものである。別のロボットと衝突すると音のパターンを交換するようになっており、また鑑賞者がサウンドエフェクトをロボットに送ることができるようになっている。現時点でもっとも複雑な自律分散協調型の実空間音響生成システムであり、またある程度マルチエージェントシステムとして詳細な解析がされていると考えられるのが、Jônatal Manzolli と Paul F.M.J. Verschure による *roboser* である。これは CCD カメラ・マイク・圧力センサ備えた、学習機能付きのロボットが外の光や衝突など、7種類の動作を解析する。その結果7パターンの動作をするような実装である。文献 [35] には、この7種類のうち4種類にパターンを当てはめたときの創発の解析が定性的に記述されている。

4 理論と実施計画

4.1 研究のねらい

本節では，研究の範囲と目的をより明確にし，具体的な達成目標を立てる．前節で見てきたように，これまで計算機上，実空間どちらでも，さまざまな自律分散協調的方法による音響生成装置が考案されてきた．制作物の芸術作品としてのこれらとの差異や新規性については，本論文では検討しない．本研究は，制作物がどのようにして解析できるのかという問いに答えることを目的とする．

3.1 で述べたことを考慮すると，制作物をつなげたものは確率付き多値 RBN と考えられる．この範囲で解析しても有効な結果が得られるだろうが，その結果は確率付き多値 RBN としてモデル化できる系に限定されてしまう．また，確率付き，多値それぞれの RBN については現状で解析手法が確立しているが，「確立付きでかつ多値」である系についての解析手法は存在しなかった．もしこれがあれば，厳密な解析が可能だったかもしれないが．そこでより大きな概念であるマルチエージェントシステムとみなすこととし，系の相互作用を調査する．これにより少なくとも系の「複雑さ」はある計測できる．

単体の制作物を何個，またどのようにして組み合わせたらよいか，ということ考えると，場合の数が大きくなりすぎてしまう．そこで，個数と組み合わせは固定とすることにした．このとき，ある程度相互作用が連続することと，実際の製作物と近い構造をとるようにするようにした．

実際の製作物では音量が可変になっている．音量が大きければ大きいほど，隣に接続された別の装置が反応する確率は高くなる．このように，遷移確率は変更可能なパラメータとすることができる．実験では，遷移確率を変化させたとき，どのようなふるまいをするかを調べることにした．

このように設定した状況で，どのようなパラメータをとったらもっとも有効だろうか．3.2 の冒頭で述べたように，得られるパラメータを何に当てはめるのかによって，結果の見方は変わってしまう．数値として分析でき，創発現象として現れる全体の状況を表すパラメータはどのようなものがあり，またもっとも有意であるのかを検

討した。

その結果，1 タイムステップごとに何個反応するかと，全体の中心がどのように移動するかを計測することとした．これは制作物にとっては，全体が作り出す音量がどのように変化するかと，定位がどのように変化するかを解析するということである．本章では，本研究の理論的根拠と，それに基づいた実験の実施計画を立てる．

4.2 相互情報量

本節の数式の出典は文献 [36] によるものを元としている．

定義 1 確率が $P(a)$ をもつ事象 a が生じたとき，これが与える情報量 $I(a)$ は，次式で定義される．

$$I(a) \equiv \log_2 \frac{1}{P(a)} \quad [\text{shannon}]. \quad (1)$$

定義 2 ある情報源 X において，互いに背反な起こりうるすべての事象を a_1, a_2, \dots, a_M とする．それらの生起確率が $P(a_1), P(a_2), \dots, P(a_M)$ と与えられているとする．このような状況で，ある一つの事象 a_i が実際に起こったと仮定すると，それによって与えられる情報量 $I(a_i)$ は，定義 1 から

$$I(a_i) = \log_2 \frac{1}{P(a_i)} \quad [\text{shannon}] \quad (2)$$

で与えられる．記号 a_1, a_2, \dots, a_M の中から，常に一定の確率が $P(a_1), P(a_2), \dots, P(a_3)$ で記号が選択されるような情報源を独立生成情報源という．この情報源から得られる情報量の期待値，エントロピー $H(X)$ を次式で定義する．

$$\begin{aligned} H(X) &= \sum_{i=1}^M P(a_i) \log_2 \frac{1}{P(a_i)} \\ &= - \sum_{i=1}^M P(a_i) \log_2 P(a_i) \quad [\text{shannon}] \end{aligned} \quad (3)$$

定義 3 a_i と b_j の 2 つの確率事象があり，その結合確率がわかっているとするとき，その 2 つの確率事象の相互情報量を以下で定義する．二つの確率変数 X, Y があり， X のとりうる値を a_1, a_2, \dots, a_M ， Y のとりうる値を b_1, b_2, \dots, b_N とし， a_i と b_j に関

する確率がわかっているとき，

$$I(a_i; b_j) \equiv \log_2 \frac{P(a_i, b_j)}{P(a_i)P(b_j)} \quad (4)$$

を， a_i と b_j の相互情報量という．

情報源が一つの場合に，その情報源から得られる情報量期待値が定義できたのと同様に，相互情報量の期待値が以下で定義される．

定義 4 二つの確率変数 X, Y があるとする． X は M 個の記号を生起し， Y は N 個の記号を生起するとする． X から事象 a_1, a_2, \dots, a_i が観察され，その生起確率が $P(a_1), P(a_2), \dots, P(a_N)$ であるとする． Y から事象 b_1, b_2, \dots, b_i が観察され，その生起確率が $P(b_1), P(b_2), \dots, P(b_N)$ であるとする．このとき， X と Y から観察される事象 (a, b) の同時確率が $P(a, b)$ であるとするとき，平均相互情報量 $\bar{I}(X; Y)$ を

$$\bar{I}(X; Y) \equiv \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N P(a_i, b_j) \log_2 \frac{P(a_i, b_j)}{P(a_i)P(b_j)} \quad [\text{shannon}] \quad (5)$$

と定義する．

系の何と何の相互情報量をとると有効であるかということの議論は文献 [37] に述べられている．1 タイムステップ前の系列と今の系列との平均相互情報量をとることで，系のふるまいの指標となる．

4.3 離散時間フーリエ変換

離散時間信号 $x(n)$ が長さ N であるとき，

$$X(k) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) W_N^{kn} \quad (6)$$

と定義される $X(k)$ を $x(n)$ の N 点離散時間フーリエ変換という．ここで， W_N は回転因子 $\exp(-j2\pi/N)$ とする．

離散時間フーリエ変換で得られる信号列 $|X(k)|$ はそれぞれ周波数 k/N ($k = 0, 2, 3, \dots, N-1$) の周波数成分の振幅をあらわす．

4.4 複雑さ

残念ながら、現時点で複雑さとは何かという対する答えは得られていない。「おそらく複雑さの定義というものは複雑系の研究の最終段階になって初めて明らかにされるものなのかもしれない。[38]」[39]。そのため、数値解析実験をして得られた結果をみて、複雑であるとか単純であるとかということをいうことができない。そこで、C. Langton が λ パラメータによる解析をした場合に用いた「より相互情報量が高い」という状況を、以降便宜的に「より複雑である」と述べることにする。また、より複雑であるということと、よりふるまいが感覚的に面白いかということの相関については、文献 [37] に述べられているということにふれておく。

4.5 実施計画

以上の理論的基礎に基づき、実験の計画を立てる。まず実験系を設定する。次に、その実験系を用いて、各オートマトンの遷移確率を変化させる。そのときの平均相互情報量の値を記録する。この実験で系の持つ平均相互情報量に変化があれば、有意な結果であると判断する。次に、1 ステップごとに何個反応するかを、上の実験で得られた平均相互情報量の異なる各点で計測する。このとき出てきた音量の変化の系列を離散時間フーリエ変換することで、どのような周波数成分が含まれているのかがわかる。この結果が、各点で異なれば系の平均相互情報量と創発現象として現れる全体の音量変化と単体のふるまいの関係がわかると考える。

5 実験

5.1 実験の環境設定

5.1.1 単体オートマトンの設計

実験には、製作物の単体をモデル化したオートマトンを用いる。実験に用いたオートマトンは図 6 に示したものである。これは音になるのは遷移時として、制作物の状態数を縮退させたものである。次に、このオートマトンを 24 個使い、図 7 に示す形

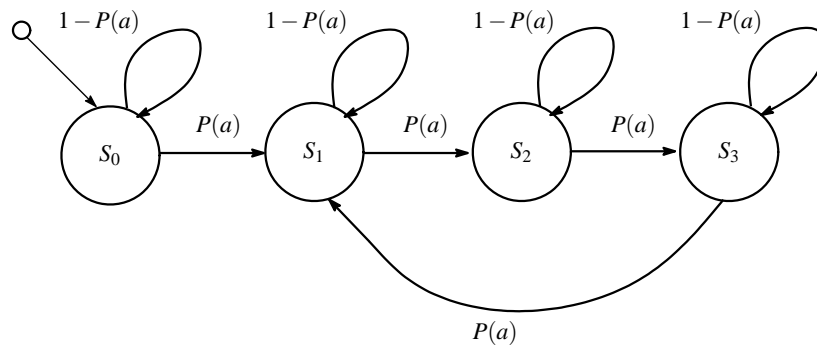


図 6 実験に使用した有限オートマトンの状態遷移図

のネットワークを構成した。図中の矢印の先端部分が単体のスピーカー，反対側がマイクに相当する。図の実験開始時には、時間 $t = 0$ で点線の部分に対して 1 回入力をする事とした。

まず、予備実験として、この系が「ある程度相互作用が連続する」ものであるかを調べた。結果を図 8 に示す。

結果から、確率が低いとほとんど相互作用は連続せず、また相互作用が連続する確率は遷移確率よりは大きくなる事がわかる。

結果のグラフから、200 回の相互作用を調べると、 $P(a) = 0.750$ 程度から有効であり、比較的広く遷移確率を変更できる。制作物は、1 タイムステップを 150[msec] とした。この場合 200 回相互作用が連続すると 30 秒になる。この範囲で音量の変化を解析すれば、音量のゆらぎなどが計測できると考える。

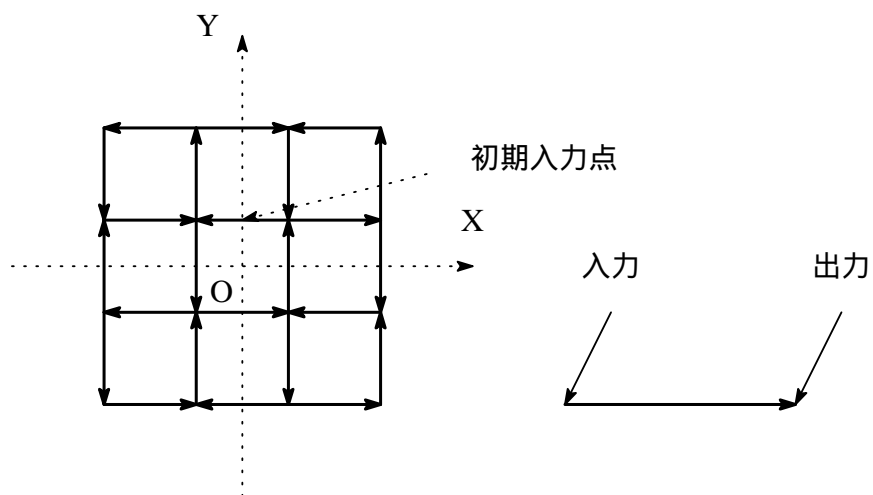


図7 実験に用いたネットワーク

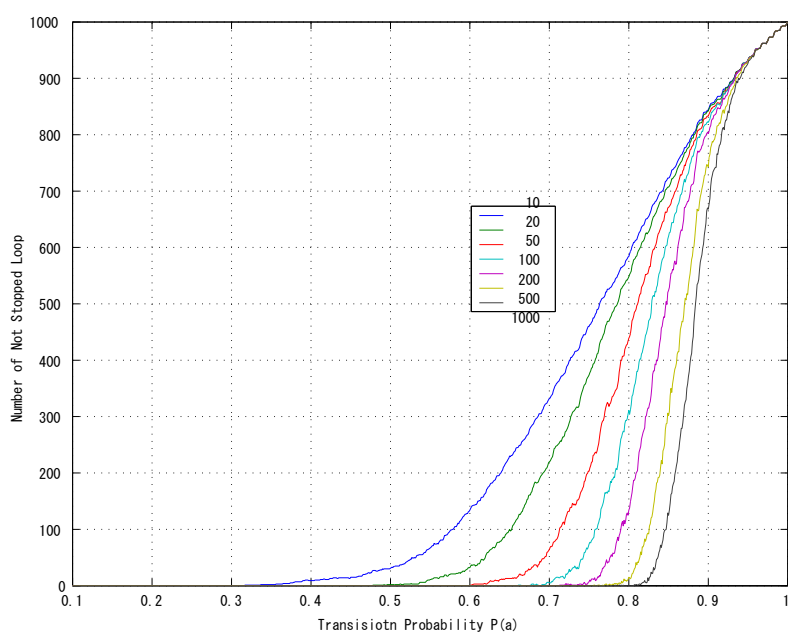


図8 相互作用の継続時間

5.2 実験 1：実験系のとりうる相互情報量

5.2.1 目的

本実験は、5.1 で設定したネットワークがとりうる平均相互情報量を計測し、平均相互情報量がオートマトンの遷移確率を変えることによってどのように変化するかを調べるために行った。また、タイムステップを変化させることによってどのように変化するかを調べた。

5.2.2 手順

1. 時刻 $t = 0$ で実験環境に初期入力を与えた。
2. 100 回目、200 回目、500 回目、1000 回目ごとに、得られた系列の時刻 $t = n$ と $t = n + 1$ の内部状態数列の平均相互情報量を計測し、平均値を求めた。
3. 上記手順を 100 回試行し、その平均値を求めた。
4. オートマトンの遷移確率は $P(a)$ を 0 から 1 まで 1000 ステップ遷移させた。

5.2.3 結果

図 9 に遷移確率と各回数ごとの相互情報量の値をプロットしたものを示す。

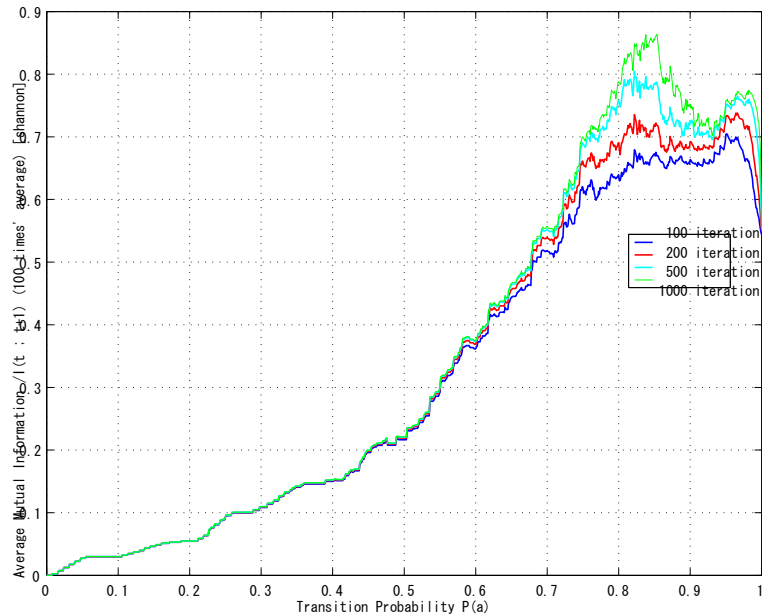


図9 実験1の結果

5.2.4 考察

4.4で、系が複雑なふるまいをするとは、平均相互情報量がより大きい状態であると述べた。実験系は結果から、複雑さがある確率でピークを持つことがわかる。

5.3 実験2：音量のふるまい

5.3.1 目的

本実験は実験1で得られた各点で1タイムステップごとに何個反応するかを計測し、そのふるまいの変化と遷移確率の関係を調べるために行った。

5.3.2 手順

遷移確率 $P(a) \geq 0.750$ の範囲で、系の変化が200回続くものについて音量の変化の差分を計測する試行を各遷移確率で10000回行い、その平均値と分散を記録した。

5.3.3 結果

図 12 に遷移確率と差分の総計の平均値，図 13 にその分散を取り正規化したものを示す。

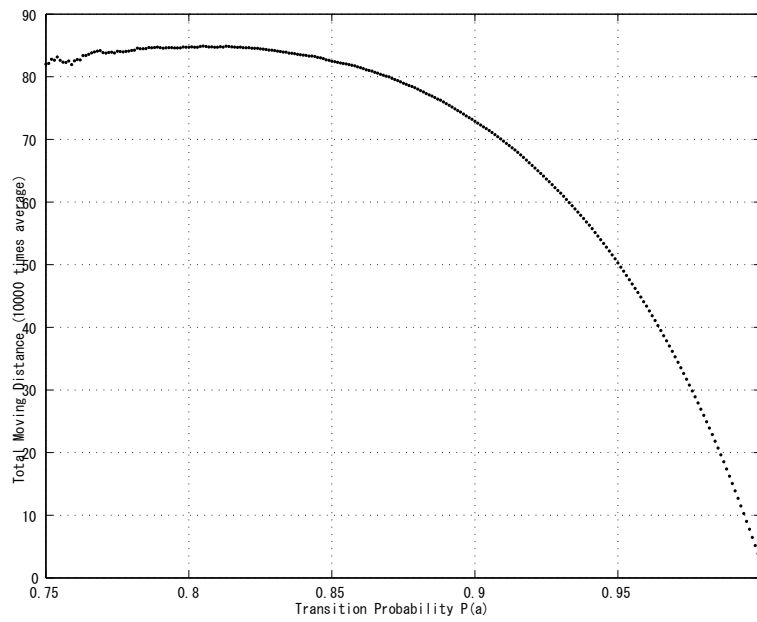


図 10 音量の変化 (平均移動距離)

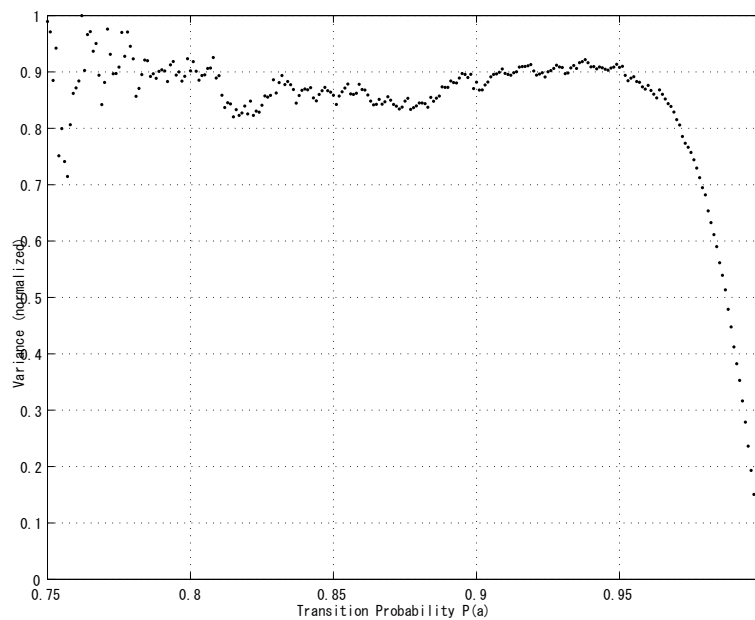


図 11 音量の変化 (分散)

5.3.4 考察

結果かから , $P(a) = 0.805$ のとき , 音量変化がもっとも大きくなることがわかった . 分散は $P(a) = 0.950$ 程度までほぼ一定であるから , 差分が最大の時に系はもっともダイナミックに音量変化をしていると判断できる .

5.4 実験 3：音の中心の移動

5.4.1 目的

本実験は実験 1 で得られた各点で 1 タイムステップごとに音の定位（全体をひとつの音源としてみた場合の中心）がどのように移動するかを計測し，そのふるまいの変化と遷移確率の関係を調べるために行った．

5.4.2 手順

遷移確率 $P(a) \geq 0.750$ の範囲で，系の変化が 200 回続くものについて移動角度を計測する試行を各遷移確率で 10000 回行い，その平均値と分散を記録した．

5.4.3 結果

図 12 に遷移確率と移動角度の総計の平均値，図 13 にその分散を取り正規化したものを示す．

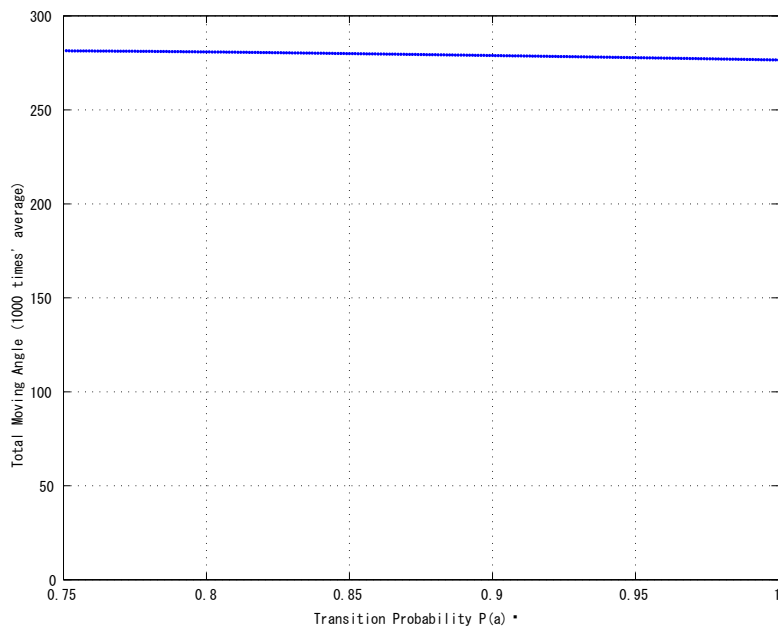


図 12 定位の変化 (平均移動角度総計)

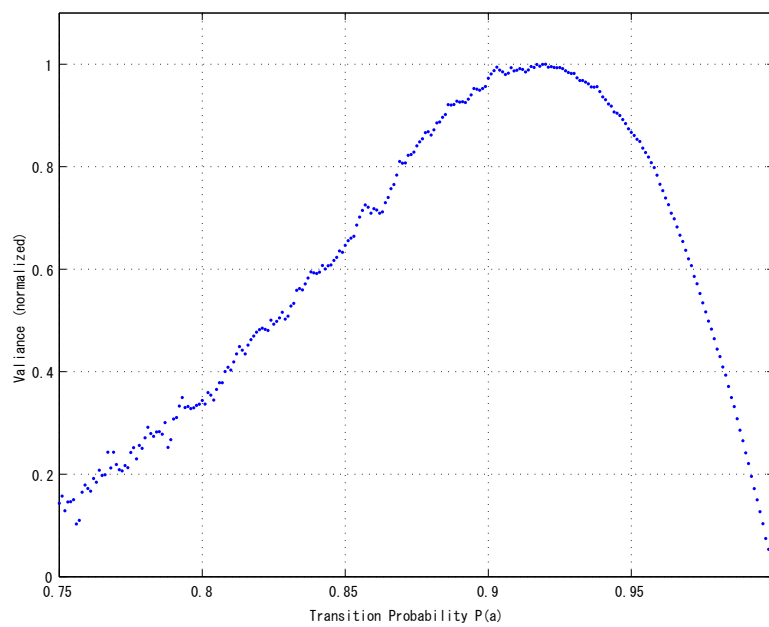


図 13 定位の変化 (移動角度総計の分散)

5.4.4 考察

結果から、 $P(a) = 0.920$ のとき、分散がもっとも大きくなることがわかった。平均移動角度の総計は全体でほぼ一定であるから、分散が最大の時に系はもっとも多くの種類の角度変化をする可能性があることがわかった。

6 結論とまとめ

6.1 音量変化と定位変化

前節の実験で見たように、音量変化と定位変化はそれぞれがピークとなる遷移確率を別々に持っている。実験 1 の結果から相互作用が続くためには遷移確率が高いほうがよいので、この実験系では定位の変化を重視した実装がよいのではないかと考えられる。

6.2 $1/f$ ゆらぎ

図 14 は、音量の変化がもっともダイナミックである $P(a) = 0.805$ の時の変化の一例を以下に示す。上のグラフは時間ステップと音量変化の関係、下のグラフはそのスペクトルを両対数プロットしたものに、最小二乗法によって近似直線を引いたものである。

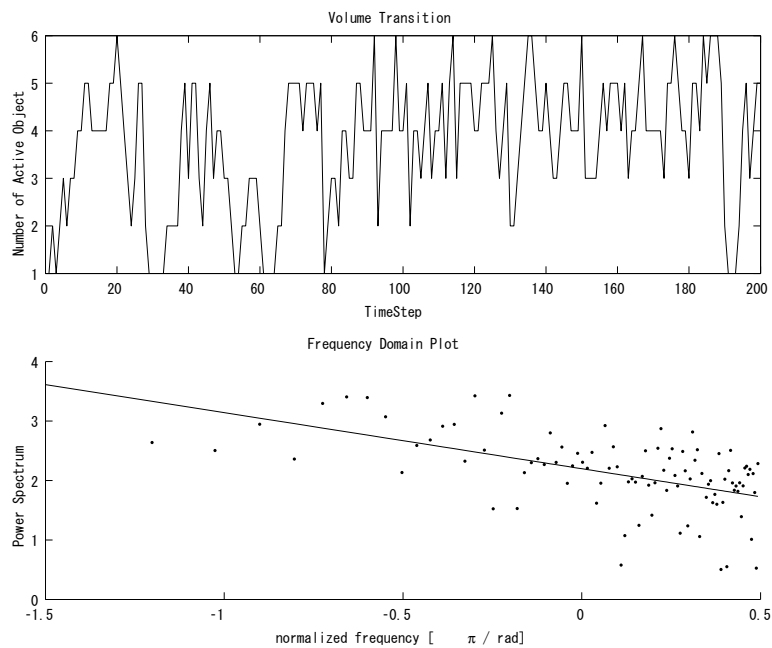


図 14 $1/f$ ゆらぎ

このように、スペクトルが負の傾きの直線がもとめられるものを $1/f$ ゆらぎといい [40]、フラクタル等の創発現象固有の性質である。この実験系では、遷移確率を適当に設定すれば、 $1/f$ ゆらぎの音量変化ダイナミクスが得られることがわかる。

6.3 制作物との関係

今回の実験系では遷移確率を 0.805 とすると音量が非周期的で複雑な動作をすることがわかった。筆者とは別の方法である定性的な設計方法によるシミュレーションをした三原は以下のように述べている。

結果、81% の反応率で反応を続けると、一つの反応から始まり約 10 分間程度、音量の疎密と音源の位置を多様に变化させます。[41]

三原の実験は、完全に構造が同じではなく、制作物そのもののシミュレーションであるが、非常に似た系を設定している。実験結果得られたことは三原の主張を定量解析の面からも支持していると考えられる。

この主張は定位よりも音量変化のほうが知覚的に有効に働くことも示している。系自体の相互作用を長く続けるには定位の変化に注目するべきだが、作品として鑑賞する場合には音量の変化に注目するべきであろう。

実際の制作物では、外部から音声を入力することもできる。このような状況では、遷移確率が低くても継続的に相互作用を続けることができる。たとえば今回の実験系では、遷移確率が 0.805 のときもっともダイナミックな音量変化をすることがわかったが、予備実験結果からこの状況を継続的に作り出すことはできず、ある時点で音響が発生しなくなってしまうことがわかる。このようなときに、外部から音声を入力したり、一部の単体が反応するようにしておけば、最良の状況を継続的に続けることができる。

今後同様のシステムを制作するにあたっては、個数や接続方法を変更できるようなシミュレーション環境を制作することで、試行錯誤がより簡単にできるのではないだろうか。

6.4 まとめ

音が入ると音がでる単純な装置を制作し、それを組み合わせによる相互作用を用いた音響生成装置を制作した。この装置について複雑さ、音量変化、定位のそれぞれを計測し、この系がもっている性質を調査した。

実験系の構造が異なる場合にも、同様の手法を使って解析することができると考えている。今回は4角形の格子状に組んだ系を設定したが、これを全体が3角形の格子状になるようにするなど、別の組み合わせ方をした場合にも同様の手順で解析ができる。今後はこのような組み合わせ方による変化も調べる必要があるだろう。

今回測定した、系がどの程度複雑であるか、1タイムステップで何個反応するか、反応の中心がどこであるか、というパラメータは、当然音響生成以外にも応用できる。自律分散協調システムとしてモデル化できる芸術作品はこれまでさまざまなものが発表されている。各作家による出力は音、光、力学的運動などさまざまである。作家の一人は以下のように課題を残している。

「芸術表現としての演算」にとって「良いルール」や「悪いルール」、あるいはアルゴリズムといった違いが存在するのだろうか。もしあるならばそれにはどのような基準があるのかということが気にかかっている。(中略)これらはさらに数学的な立場から体系的にルールをリストアップし、分類する作業をするべきだろう [42]。

現時点でこの作業を筆者が完全に成し遂げたとは考えていないが、ある程度有効なアプローチの方法を示すことができた。今後、相互情報量がもたらす系の複雑さが、実際の表現にどのように関係するかを調査する必要がある。

謝辞

(20230115 公開にあたり削除)

参考文献

- [1] 長田, 石川, 浅間, 小鍛, 坂根, 平井, 福田, 川内, 三浦, 藤田: “自律分散をめざすロボットシステム”, オーム社 (平成 7 年).
- [2] 小林: “DSP コース・ワークショップ: Physical Computing 第 1 回: 導入編”, IAMAS (2005).
<http://www.iamas.ac.jp/~mayfair/workshop/dspws2005/workshop01.pdf>.
- [3] 長嶋: “マイコン技術者スキルアップ事典”, CQ 出版 (1992).
- [4] Atmel Corporation: “ATmega8 datasheet” (2004).
http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2486.pdf.
- [5] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer: “Discrete-time Signal Processing”, Printice hall (1989).
- [6] 樋口, 川又: “デジタル信号処理 MATLAB 対応”, 昭晃堂 (2000).
- [7] 三上: “デジタル信号処理とDSP”, CQ 出版株式会社 (2004 年 2 月 1 日).
- [8] 斉田: “周波数サンプリング FIR フィルタの固定小数点 DSP への実装に関する研究”, 卒業論文 (2003). 東北大学工学部電子工学科川又研究室.
- [9] 伊庭, 福原: “複雑系入門 知のフロンティアへの冒険”, NTT 出版 (2004).
- [10] J. Liu: “Autonomous Agent and Multi-agent systems”, World Scientific (2001).
- [11] 栗原, 岡田: “自律エージェントの協調動作による自己組織化について”, レクチャーノート/ソフトウェア学 13 マルチエージェントと協調計算 IV (1995).
- [12] 伊藤, 市川, 須田 (編): “自律分散をめざすロボットシステム”, オーム社 (平成 7 年).
- [13] ニコリス: “散逸構造 自己秩序形成の物理学的基礎”, 岩波書店 (1980). 小島, 相沢訳.
- [14] 小淵: “離散情報処理とオートマトン”, 朝倉書店 (1999).
- [15] S. Wolfram: “Statistical mechanics of cellular automata”, Reviews of Modern

- Physics, **55**, (1983).
- [16] C. Gershenson: “Introduction to random boolean networks”, Workshop and Tutorial Proceedings, Ninth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems (ALife IX) (2004).
http://uk.arxiv.org/PS_cache/nlin/pdf/0408/0408006.pdf.
- [17] S. Bornholdt and T. Rohlf: “Topological evolution of dynamical networks: Global criticality from local dynamics”, PHYSICAL REVIEW LETTERS, **84**, 26 (2004).
- [18] C. Gershenson: “Phase transitions in random boolean networks with different updating schemes”, Physica D (2003).
- [19] C. Gershenson: “Updating schemes in random boolean networks: Do they really matter?” (2004).
- [20] R. V. Solé, B. Luque and S. Kauffman: “Phase transition in random networks with multiple values” (2000).
- [21] C. Gershenson: “Classification of random boolean networks”, Artificial Life VIII. Proceedings of the Eight International Conference on Artificial Life (2003).
- [22] C. Gershenson, S. A. Kauffman and I. Shmulevich: “The role of redundancy in the robustness of random boolean networks”, Artificial Life X, Proceedings of the Tenth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems (2005).
- [23] 西川, 川村, 山本, 大内: ““マルチエージェントが構成するネットワークと相互作用の分析””, Proceedings of JAWS2004 (2004).
- [24] T. Takashina, K. Tanaka and S. Watanabe: “Individual level analysis using decision making features in multiagent based simulation”, Intelligent Agents and Multi-Agent Systems : 5th Pacific Rim International Workshop on Multi Agents, Tokyo, Japan, August 19-20, 2002. Proceedings, Vol. 2413 / 2002, pp. 33–47 (2002).
- [25] C. Roads: “コンピュータ音楽 歴史・テクノロジー・アート ”, 東京電機大学出版局 (2001年6月20日). 青柳 龍也, 小坂 直敏, 後藤 真孝, 引地 孝文, 平田 圭二, 平野砂峰旅, 堀内 靖雄, 松島 俊明 訳.
- [26] C. Roads: “microsound”, Massachusetts Institute of Technology (2004).

- [27] P. Beyls: “Cellular automata mapping procedures”, Proceedings of the International Computer Music Conference, Miami, USA (2004).
- [28] 安藤, 伊庭: “人間の演奏者と音楽インタラクションを行うマルチエージェントシステムの構築”, 情報処理学会研究報告, **2005**, 129, pp. 43–48 (2005).
- [29] P. Reiners: “Cellular automata and music” (2004).
<http://www-128.ibm.com/developerworks/java/library/j-camusic/>.
- [30] isle ex: “cellular automaton music” (1998).
<http://jmge.net/camusic.htm>.
- [31] E. R. Miranda: “Camus a cellular automata music generator” (2002).
- [32] T. Blackwell and M. Young: “Self-Organised Music” (2003).
- [33] 徳井: “SONASPHERE” (平成 15 年度).
http://www.naotokui.com/blog/archives/02_projects/023_sonaspHERE.
- [34] 江渡: “Soundcreatures” (1998).
<http://eto.com/1998/SoundCreatures/index.html>.
- [35] J. Manzolli and P. F.M.J.Verschure: “Roboser: A real-world composition system”, Computer Music Journal, **29**, 3 (2005).
- [36] 瀧: “情報論 I 情報伝送の理論”, 岩波書店 (2001).
- [37] H. Gutowitz and C. Langton: “Methods for designing cellular automata with “interesting” behavior”, CNLS News Letter (1998).
<http://www.santafe.edu/~hag/interesting/interesting.html>.
- [38] 金子, 津田: “複雑系のカオスのシナリオ”, 朝倉書店 (1996).
- [39] C. Gershenson and F. Heylighen: “How can we think the complex?” (2005).
- [40] 樋口: “時系列のフラクタル解析”, 統計数理 (1989). 第 37 巻 第 2 号.
- [41] 三原: “Simulation” (2005).
<http://www.iamas.ac.jp/~mhrs04/plan06/simulation.html>.

-
- [42] 小野寺：“芸術表現としての演算”，修士論文（平成 16 年度）. 情報科学芸術大学院大学 メディア表現研究科.
- [43] P. Stang: “Procyon AVRlib” (2004).
<http://hubbard.engr.scu.edu/embedded/avr/avrlib/>.

付録

製作物の回路図

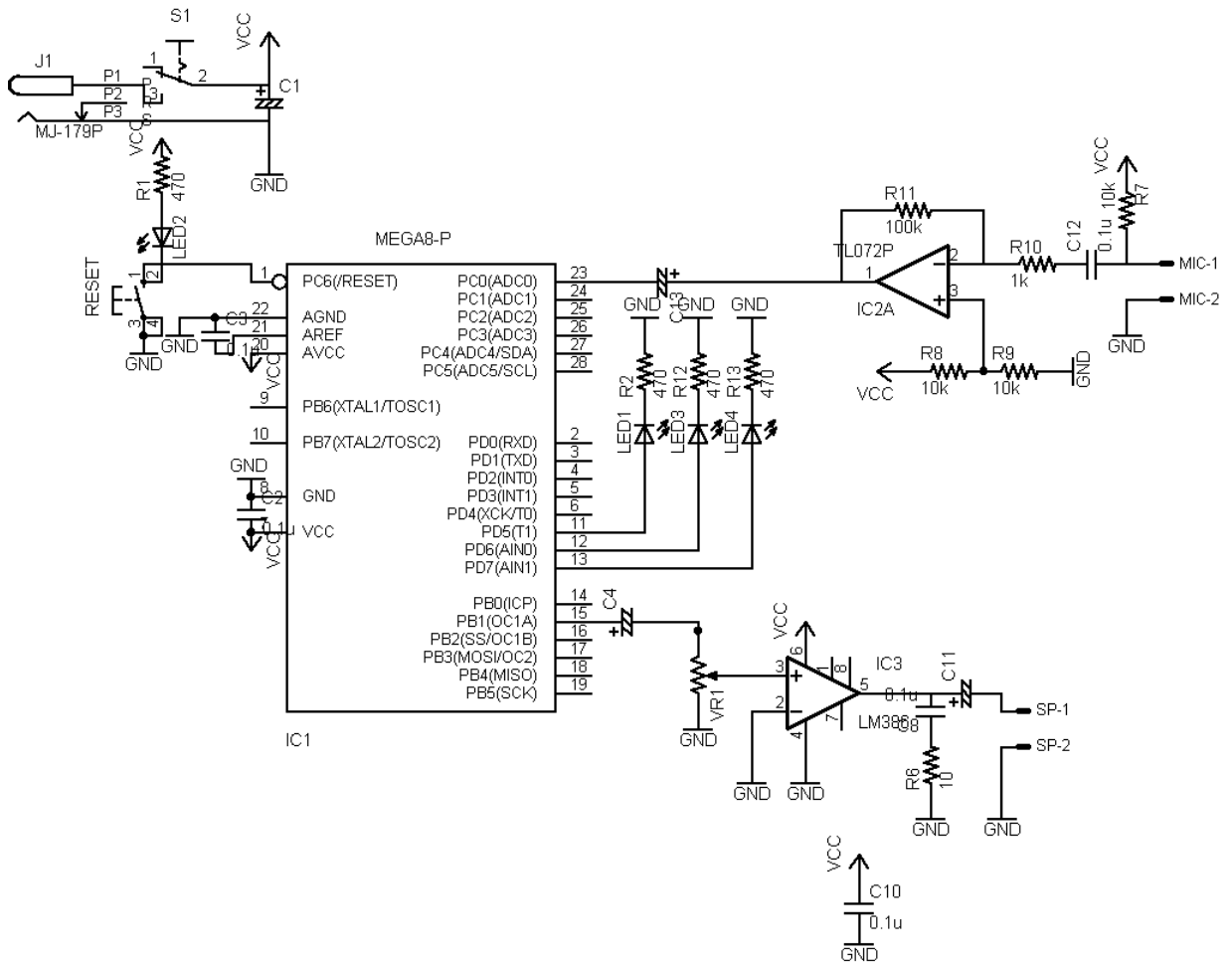


図 15 実装システムの回路図