

ふるまいを創造する カオスチップ

(A Chaos Chip: What is it?)

カオス現象は、日常生活のいたるところで見ることができる。コーヒーから立ち登るゆげの動き、水道の蛇口から落ちる水滴の間隔などがそうである。しかし、これら自然に存在するカオス現象の発生メカニズムは複雑で、これをそのまま何かに応用することは難しい。カオスの工学的応用を考える場合、“観る”立場から“創る”立場へと移らなければならない。そこで発生のメカニズムがはっきりしたカオス、つまりふるまいがある明白な規則に基づく決定論的カオス (deterministic chaos) を用いる。

この場合、ダイナミクス (動的なふるまい) は、例えば次式のような差分方程式で記述することができる。

$$X_{n+1} = f(X_n) \quad n=0,1,2,\dots$$

ここで n は時刻を表す。 n 時刻の値 X_n をもとに写像関数 $f(\cdot)$ により、次の $n+1$ 時刻の値 X_{n+1} が決まる。 $f(\cdot)$ に非線形関数を用いた場合、上式は1次元非線形ダイナミカルシステムとなり、非線形関数の選び方によってカオスを創り出すことができる。これを利用すればカオスシステムを合目的的に設計し応用することができそうである。

そこで、このシステムに必要な構成要素をハードウェア化し、集積回路の形で実現した。それがカオスチップである。カオスチップの設計にあたり、次のことを念頭においた。

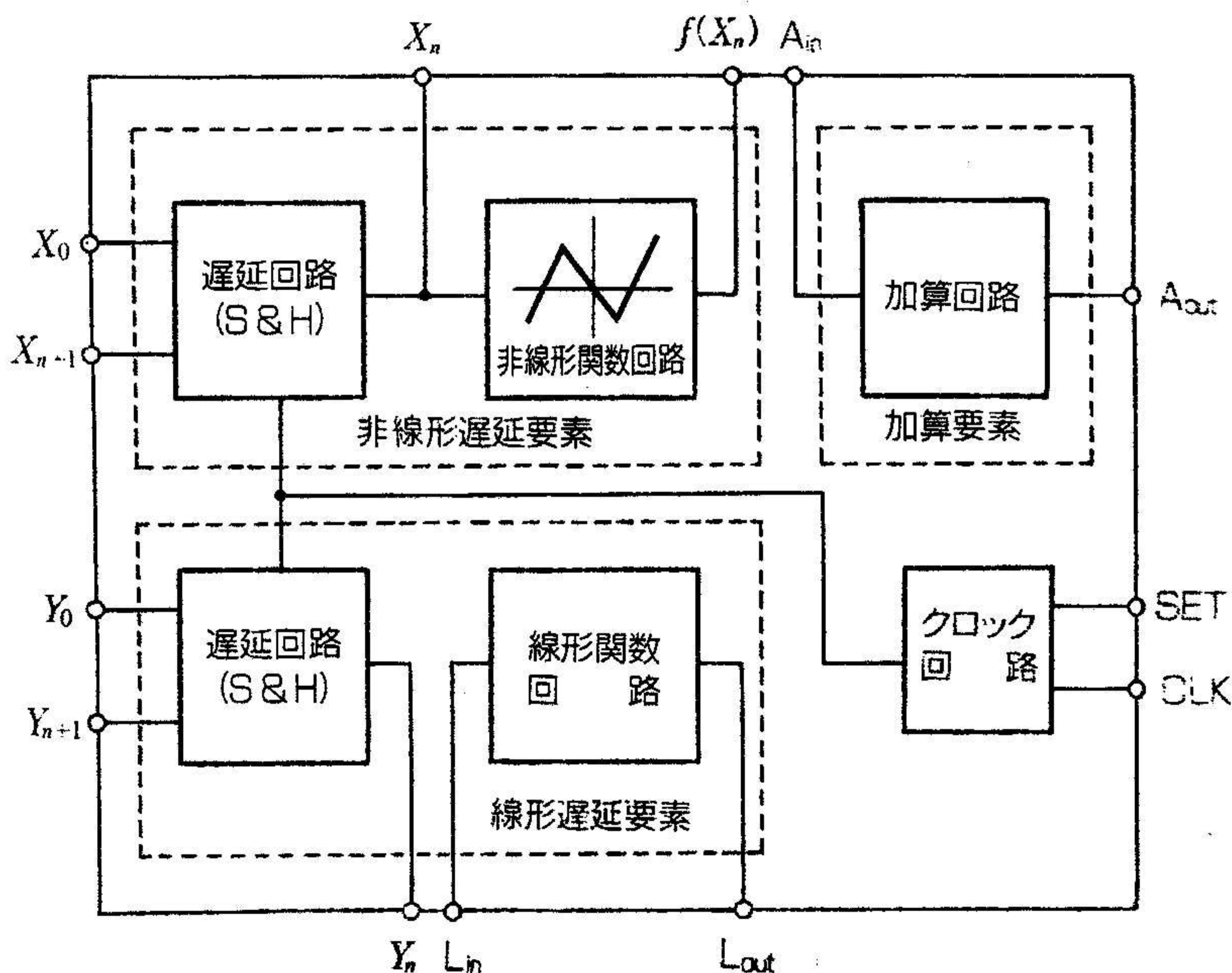
(1) 非線形パラメータが、外部から容易に且つリアルタイムで変えられること。

(2) ダイナミックな動き (時間) が容易にコントロールできること。

(3) 応用のしやすさ、システムの安定性を考えて、既存の標準的な半導体製造プロセスを用いる。

(4) システム構成に必要な最小限のユニットを、拡張性をもたせて集積化する。

(5) 使用時に高度な電子回路の知識や特殊な部品等が要らないようにする。



工学的応用の際、システムのハードウェア化が必要となってくる。そのとき問題となるのがハードウェアに使用されるデバイスの特性のバラツキや回路の誤差である。その影響の度合を調べるための検証用ツール

研究開発報告

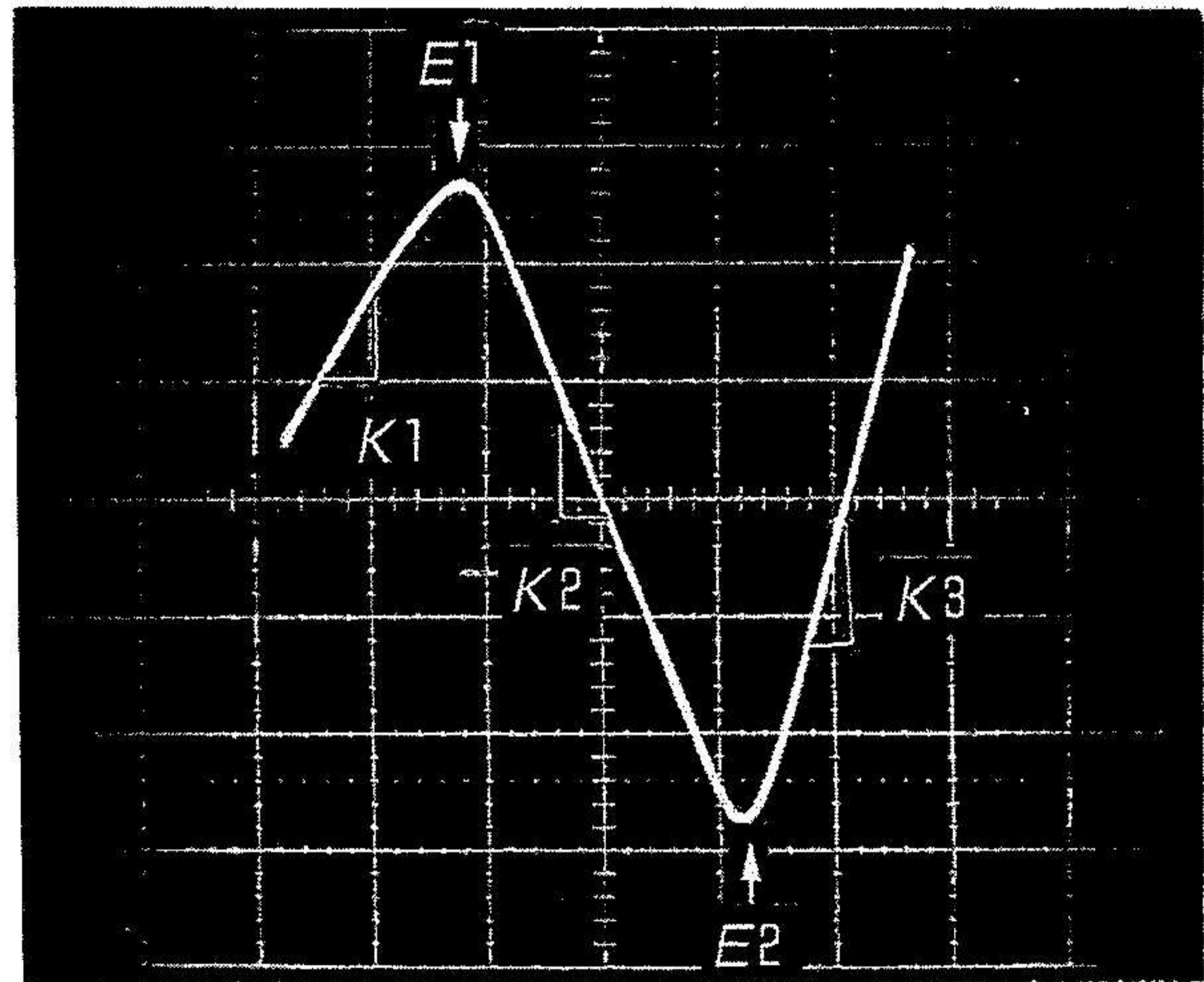
としてカオスチップは威力を発揮する。そのほか分かりにくい非線形ダイナミクスを定性的に理解するための教育的ツールとして、またコンピュータの繰り返し計算では時間がかかる大規模カオスシステム（例えばカオスネットワーク）のふるまいを瞬時にシミュレートし、その局所的な動きをプロービングによりリアルタイムに任意の箇所から取り出せるというハードウェアの利点を活かし、カオス研究を加速する研究用ツールとして活用できる。

カオスチップの中身は？

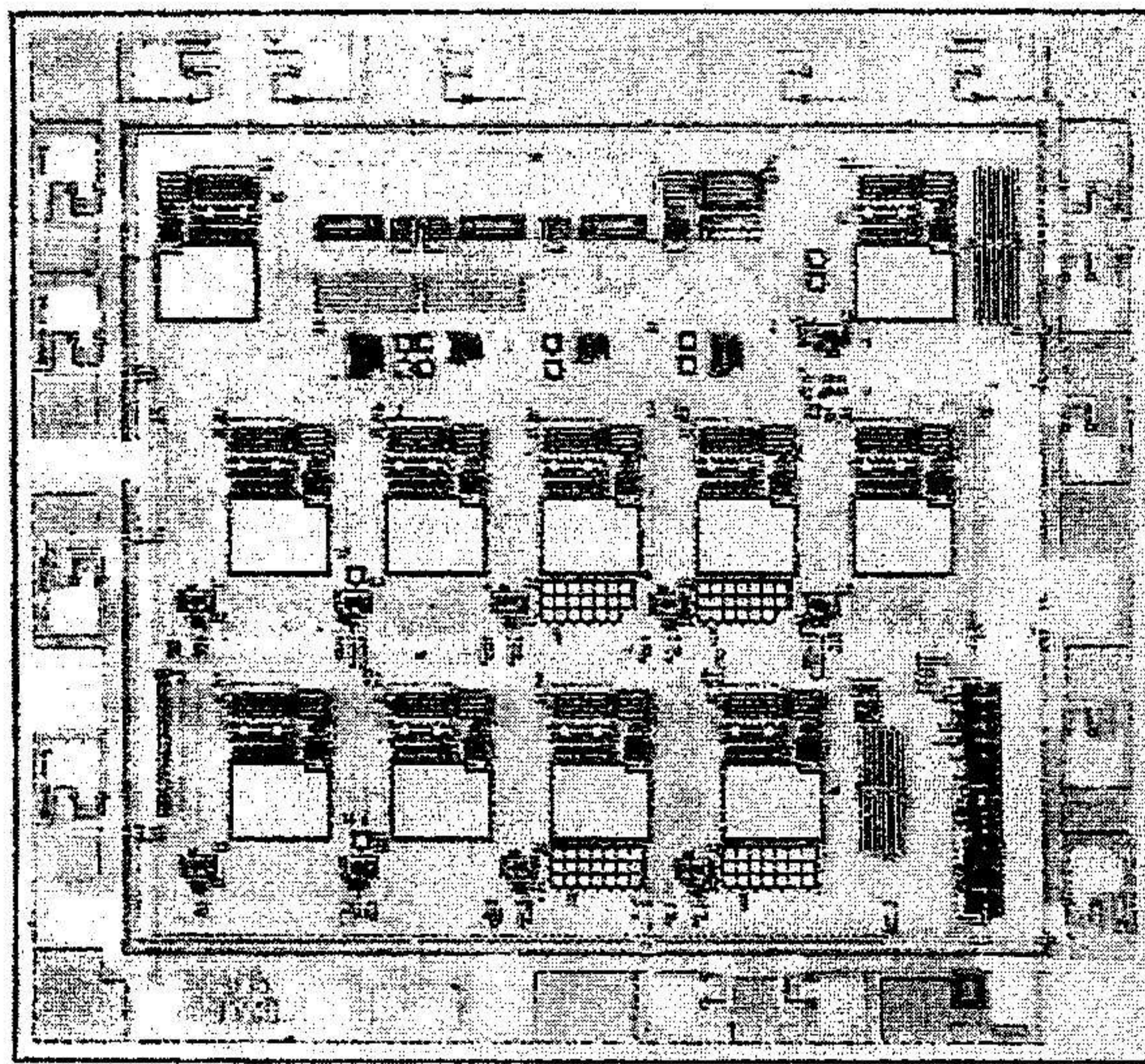
先に述べた1次元非線形ダイナミカルシステムを構成するには、1個の非線形関数回路と1個の遅延回路があればよい。さらにシステムを高次元に拡張するためには、必要に応じた個数の係数回路（線形関数回路）と加算器が必要となる。

そこでカオスチップの構成要素として(1)非線形関数回路と遅延回路で構成される非線形遅延要素、(2)線形関数回路と遅延回路で構成される線形遅延要素、および(3)加算要素を用意した。図1にカオスチップのブロック図を示す。

非線形関数として図2に示すような3つの線分からなる折れ線関数を採用し



第2図 非線形関数の入出力特性
(縦軸: $f(X_n)$, 横軸: X_n)



第3図 CMOSアナログ回路のチップ写真

の部品が入手しやすい28ピンDIP (Dual Inline Package) を使用した(図4)。実装用フラットパッケージへの対応も可能である。

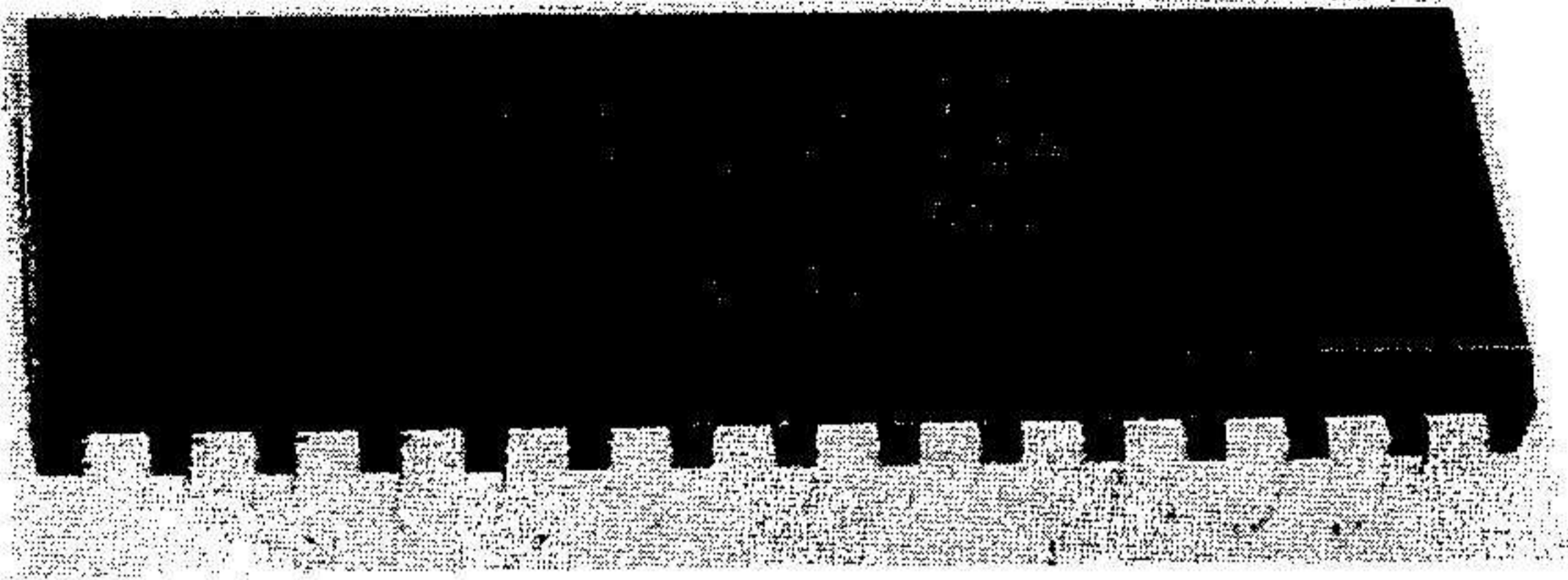
図5にピン配置を示す。電源は、+5V、-5Vの2電源方式で、システムクロックとしてグラウンド(0V)中心の±5Vの矩形波を用いる。サンプル・ホールドのタイミング・クロックはチップ内でシステムクロックを分周して作られる。有効入出力電圧範囲は-4Vから+4Vである。

た。K1, K2, K3, E1, E2の5つのパラメータで形状を規定する。これらは外付けの3つの可変抵抗と2つの直流電圧源により外部よりコントロールする。実際には、非線形関数回路の入力を正弦波もしくは三角波で掃引し、オシロスコープのブラウン管上に入出力特性を描かせ、その画面を見ながら各パラメータを調整する。

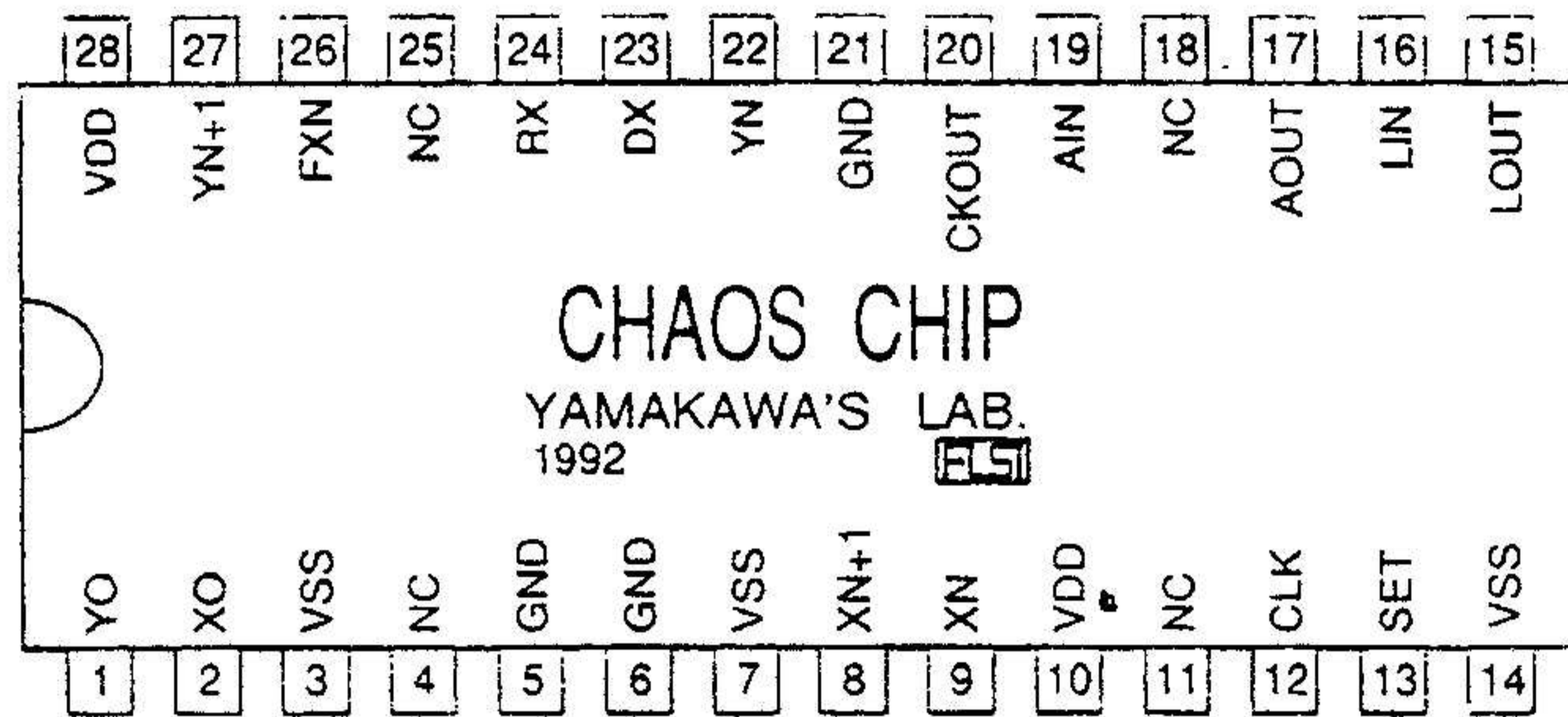
遅延回路にはサンプル・アンド・ホールド回路を採用し、サンプル・ホールドのタイミング・クロック周波数を変えることで、システムのダイナミカルな動き(時間)をコントロールする。

中心となる回路をCMOSアナログ回路で設計し、製造には技術の確立している標準的な3μm CMOSプロセスを用いた。図3にチップ写真を示す。チップサイズは3.48mm×3.77mmである。使いやすさを第1に考え、ソケット、基板等

第4図 カオスチップ外観



第5図 カオスチップのピン配置



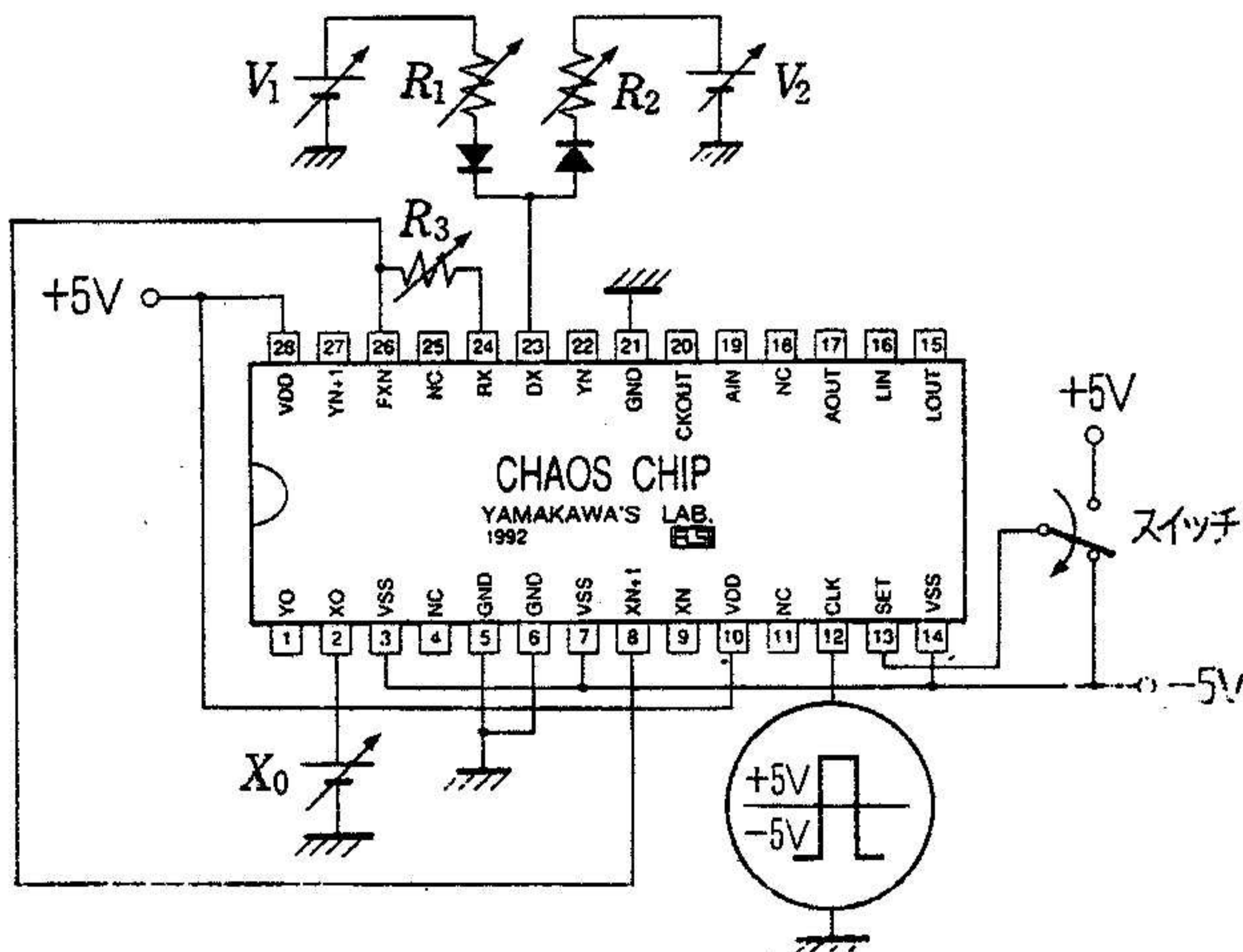
何ができるの？

カオスチップを使ってどんなことができるのか簡単な例を紹介する。

● 1次元非線形ダイナミカルシステム

1次元非線形ダイナミカルシステムは、カオスの基本である1次元カオスを作り出す。図6に接続図を示す。非線形関数を設定し、初期値 X_0 として $-4V$ から $+4V$ の範囲のある電圧を与え、

繰り返し演算（これをイタレーションという）を開始させるだけで図7のような不規則な時系列信号が作り出される。縦軸はシステムの入力 X_n 、横軸は時間である。これはランダムシグナルジェネレータとして利用できる。

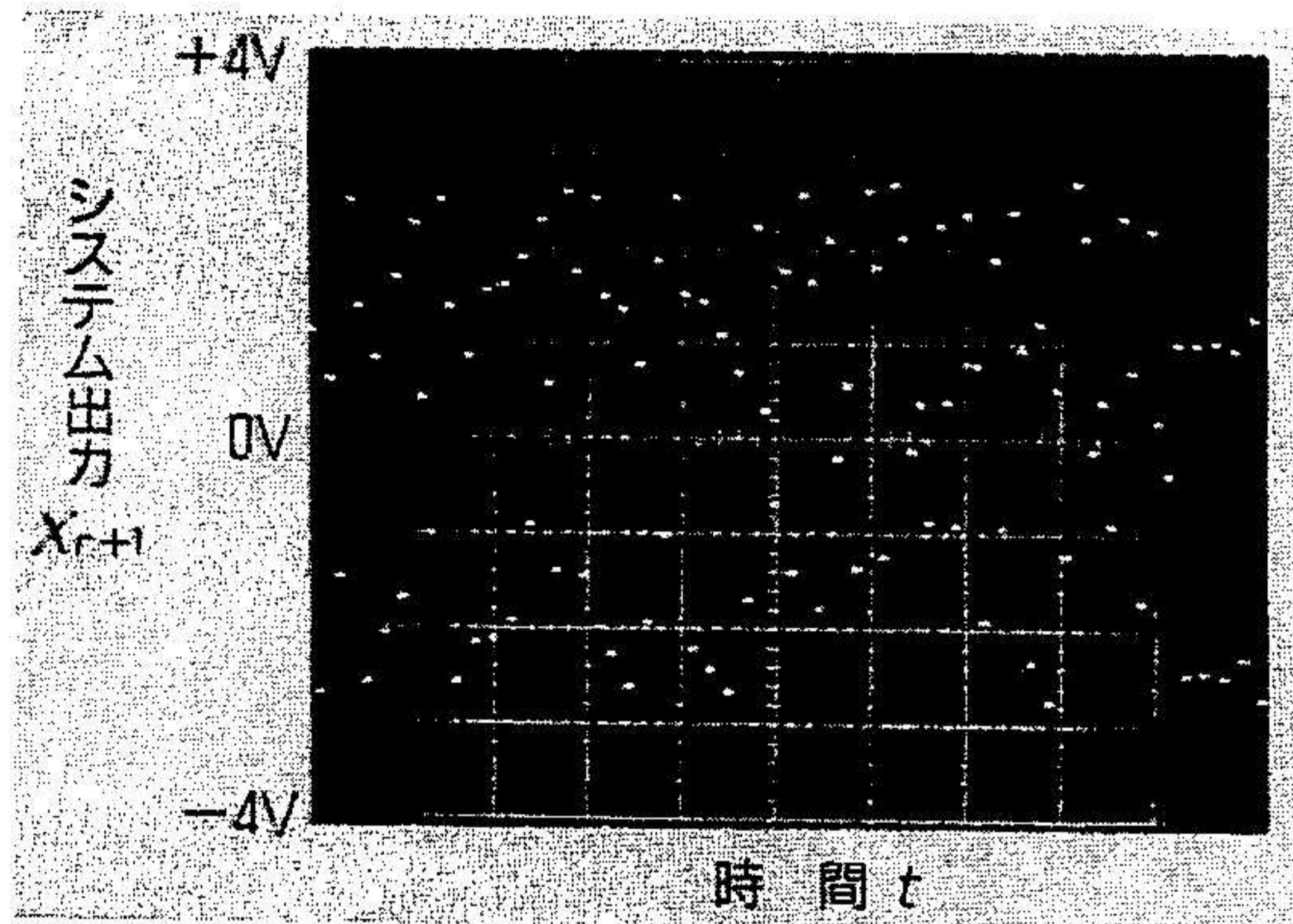


第6図 1次元非線形ダイナミカルシステム接続図

● バイファケーション・ダイアグラム

非線形パラメータの1つを変化させると図8に示すようなバイファケーション・ダイアグラム（分岐図）が簡単にみれる。ここでは、回路パラメータ R_3 を変化させている。 R_3 を 0Ω からだんだんと大きくしていくと1周期解から2周期解、2周期解から4周期解へとバイファケーションが起きる様子を見ることができる。

さらに R_3 を大きくしていくとY軸方向を塗りつぶしたようになりカオス状態へ移っていく。この写真はカメラのシャッターを開放にしておき R_3 を変化させ多重露光で撮ったものである。



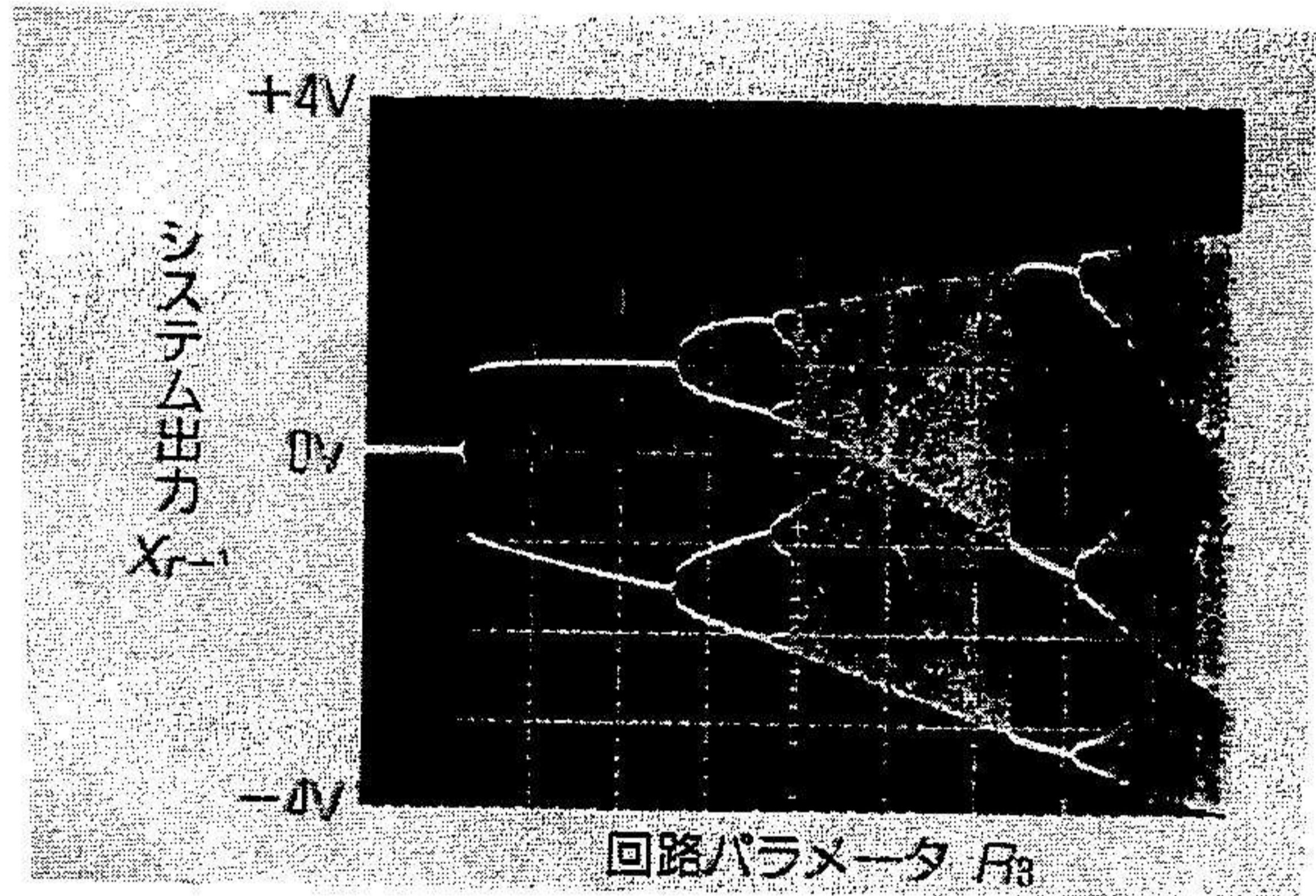
第7図 不規則な時系列信号

ンの様子を手に取るように見ることができる。(10図)

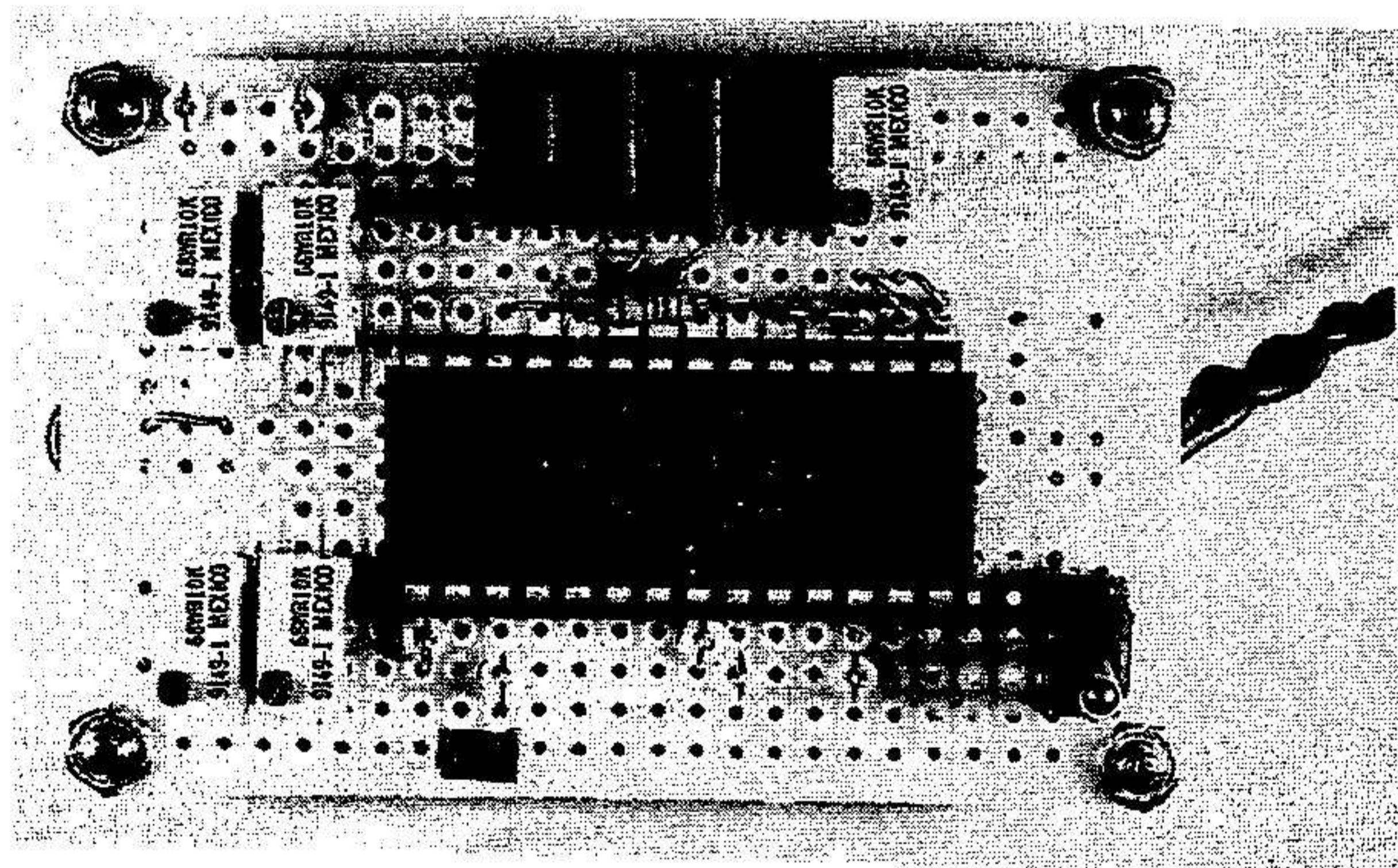
●2次元非線形ダイナミカルシステム
 次式で示されるような2次元非線形ダイナミカルシステムもカオスチップを使って簡単に組むことができる(図9)。

$$\begin{aligned} X_{n+1} &= f(X_n) - \alpha Y_n \\ Y_{n+1} &= X_n \end{aligned}$$

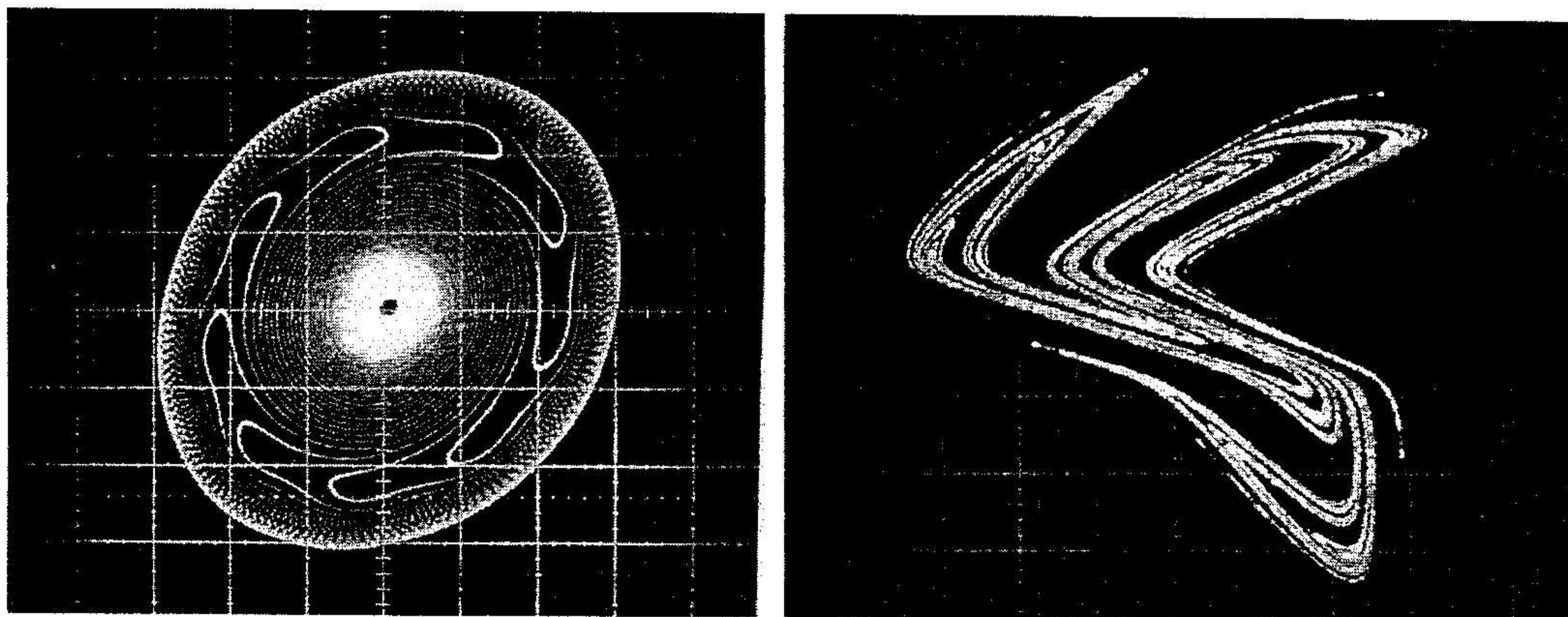
オシロスコープのX軸に X_n を、Y軸に Y_n をとり、10数kHzのクロックでイタレーションを開始させると画面上に美しい幾何学模様が瞬時に描かれる。ここでクロックを数Hzまで下げ、ゆっくりと輝点を移動させれば、イタレーション



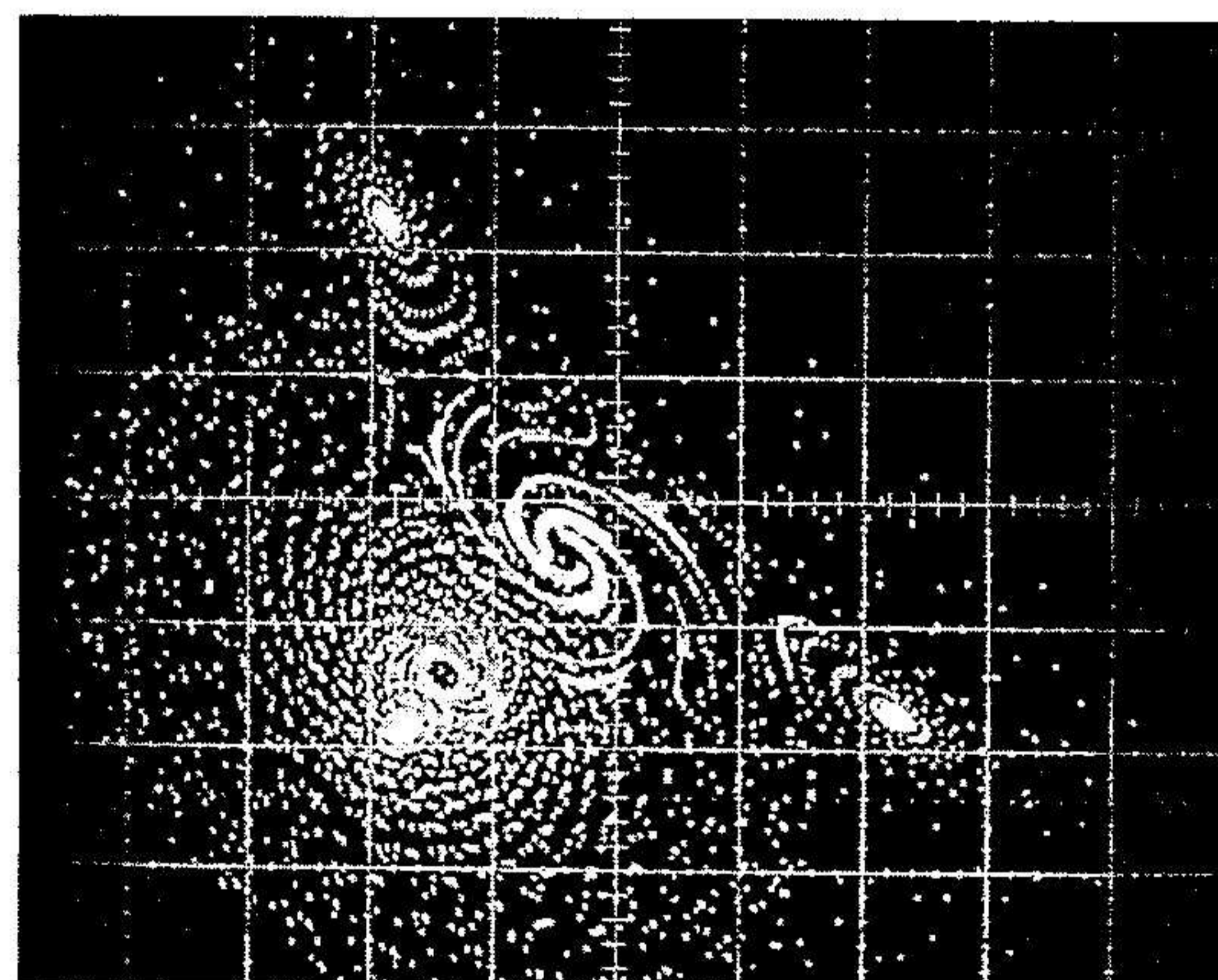
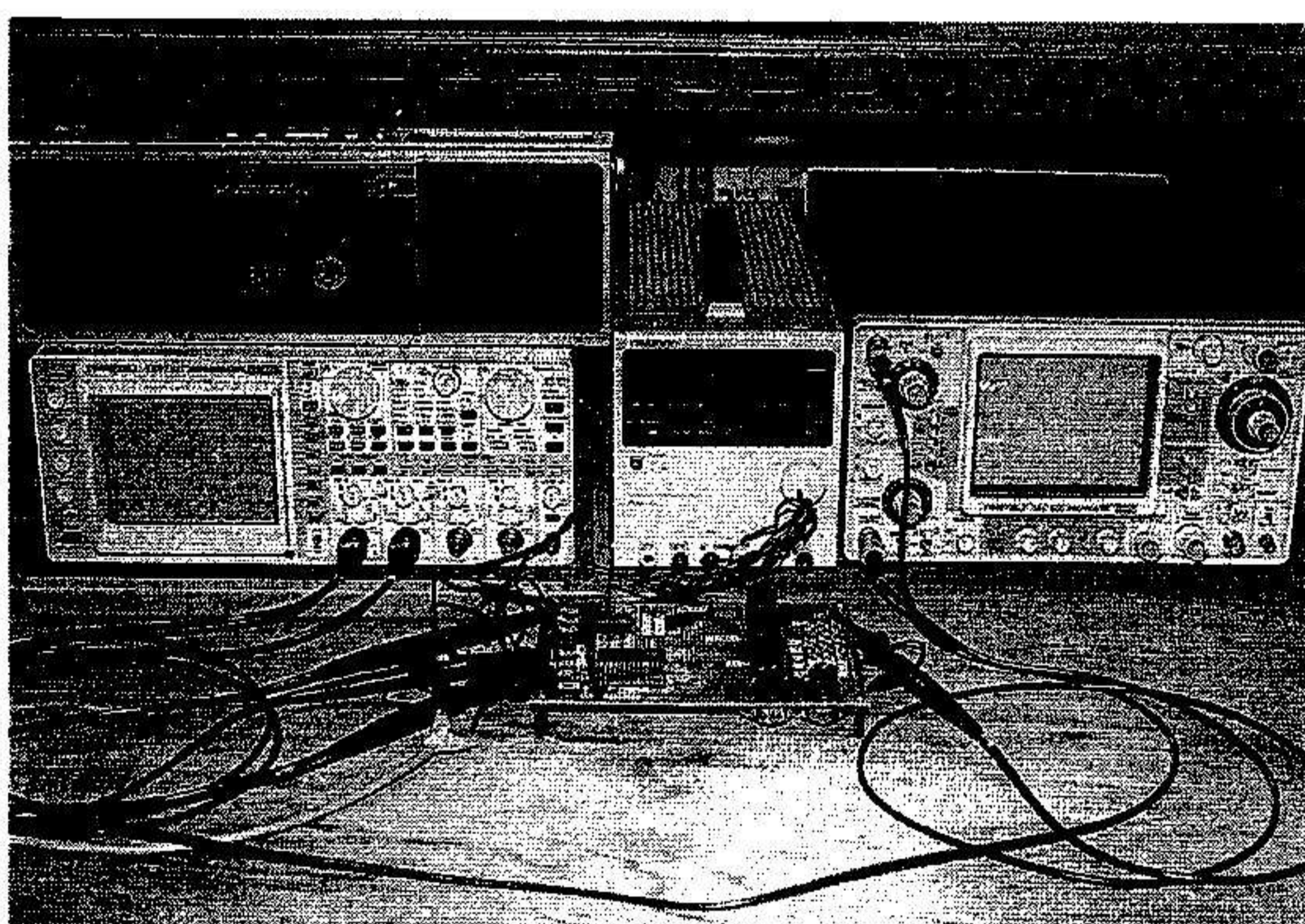
第8図 バイファケーション・ダイアグラム(分岐図)



第9図 2次元非線形ダイナミカルシステムを構成したボード



第10図 2次元非線形ダイナミカルシステムが創り出した幾何学模様 (縦軸:Yn, 横軸:Xn)



第11図 音楽信号による非線形パラメータのリアルタイムモジュレーションモデルとオシロスコープ上に描き出された幾何学模様

アミューズメントへの応用例として、非線形パラメータの1つを音楽信号で変えてみる。曲にあわせて幾何学模様がダイナミックに変化し、リズム的なパターンを楽しむことができる。ハードウェアならではのなせる技である。1992年7月に飯塚市で開催された第2回ファジィ論理と神経ネットワークに関する国際会議 (IIZUKA92) で、このデモンストレーションを行い、好評を得た。(第11図)

研究開発報告

カオス体験!?

カオスチップを使って本当にカオスを定性的に理解できるのだろうか? 電子回路の専門知識がなくても使うことが出来るのだろうか?

(財) ファジィシステム研究所主催で1992年11月にカオスチップを使ったカオス体験セミナーを行った。1日でカオスチップを使いこなしてもらおうという企画である。参加者は、回路専門のエンジニアはもちろんのこと、高校の先生、医師、数学者、メーカーの営業担当者と電子回路を専門としない方も多くみえられていた。メインの実習では、各自で実際にカオスチップを用いてシステムを組んでもらいカオスを体験していただいた。関数の設定から始まり、1次元非線形ダイナミカルシステムを組んでカオス信号を発生させ、バイファクション・



第12図 カオスチップ・セミナーの様子

ダイアグラムを描き、分岐する様子確かめてもらった。最後に2次元非線形ダイナミカルシステムを作り、多様な幾何学模様を出して楽しんでもらった。(12図)

短い時間ながらも多くの方が予定された演習をこなされていた。ただし所望の幾何学模様を出すための非線形パラメータの選定にはちょっと苦労されていた。筆者らの経験では、カオスチップの気持ち分かるようになるには、2、3日じっくりとつき合う必要があるようだ。参加者の中には、チップとの相性がとてもよかったのか、2時間たらずで、いろいろな美しい模様を出しておられた方もいらした。

応用の可能性は?

カオスはどんなものに応用できるだろう。工学的応用以外のものも含めて思い付くままに挙げてみる。

1. カオス・アート (模様デザイン)
2. ディスコの照明 (音楽にあったダイナミクス)
3. 噴水の制御
4. 大型コンピュータのテスト用ランダムベクトルジェネレータ
5. 電子ルーレット
6. 多値論理システム
7. ふるまいの中に情報を蓄えるカオスメモリ
8. 暗号器
9. 情報圧縮器
10. 高感度センサー
11. 家電 (扇風機, 洗濯機, ミキサーなど)
12. カオス音楽

研究開発報告

まずは、自分でカオスを創ってみることである。時を忘れて夢中でいじっているうちに、きっと面白いアイデアが浮かんでくるだろう。カオスはそんな魅力を持っている。

本稿は、月刊電子雑誌「エレクトロニクス」1993年2月号に掲載されました記事「カオスチップも登場した!」を、発行元の株式会社オーム社のご好意により、転載したものです。