氏名・(本籍)	上ノ原　誠二（　鹿児島県　）
学位の種類	博　士（　工　学　）
学位記番号	生工博甲第２６３号
学位授与の日付	平成２８年３月２５日
学位授与の条件	学位規則第４条第１項該当
学位論文題目	大規模非線形結合系を実現するための時間軸情報処理集積回路に関する研究
論文審査委員会	委員長　教　授　石井　和男
	〃　森江　　隆
	〃　古川　徹生
	〃　夏目　季代久
	〃　田中　啓文

学　位　論　文　内　容　の　要　旨

非線形現象を呈する複雑系は、長年の研究によりその現象の理解が進み、蓄積された知見を情報処理に役立てようという機運が高まっている。これらの系は連続値を扱うアナログシステムであるため、デジタル/アナログ変換の不要なアナログ回路で実装するのが効率的である。アナログ回路で大規模非線形結合系を実装した例としては、高いエネルギー効率で画像処理を行う振動子アレイ集積回路（LSI）や、カオス現象を利用して最適化問題を有限時間内に解くカオスニューロンシステム等があり、アナログ回路のエネルギー効率の高さと、非線形現象を利用することの重要性が示されている。

しかしながら、大規模非線形結合系をアナログ LSI 実装する際には、トランジスタの製造バラツキ等により非線形素子毎の特性がばらつくという問題がある。また、特性をハードウェア的に作りこむことで演算特性を実現するアナログ回路では、任意の非線形現象を再現することができない。任意の非線形変換を実現する方式としては、非線形電圧波形をパルス幅変調信号でキャパシタにサンプリングする電圧波形サンプリング方式が提案されている。

以上の背景のもとで、本論文では、製造バラツキ補償回路を搭載した電圧波形サンプリング方式による大規模非線形結合系 LSI を提案し、0.25 ミクロン CMOS LSI 技術で設計・試作し、試作した回路を測定・評価するとともに、試作チップを用いた実験系で様々な時空間パターンを生成できること、および各種セルオートマトンが実現できることを示している。

第１章では、研究の主旨と背景、および目的と本論文の構成について述べている。

第２章では、本論文で扱うしきい値結合写像モデルについて説明している。このモデ

ルは、複数の非線形変換素子（セル）が結合した系であり、各セル内で非線形変換した結果に対して、しきい値処理後の超過分を、結合した他のセルに受け渡す緩和処理を繰り返すことにより、様々な時空間特性を実現する。オリジナルなモデルでは非線形変換としてロジスティク関数などを用いており、超過分をそのまま受け渡すものであったが、本論文ではこれを拡張し、非線形変換特性を 2 値で適切に設定し、かつセル間の信号受け渡しを任意の重み付けで行うことで、万能チューリングマシンとして知られている 1 次元セルオートマトン・ルール 110 などを実行できることを証明し、数値実験でその振る舞いを示している。

第 3 章では、しきい値結合写像を回路実装するために適した電圧/電流波形サンプリング方式による非線形変換の原理について説明し、トランジスタのしきい値バラツキと容量値バラツキに対する両方式の頑健性を HSPICE 回路シミュレーションで評価した結果を示している。その結果、電圧サンプリング方式の方が電流サンプリング方式よりも約 30 倍頑健であることを明らかにしている。

第 4 章では、高精度な大規模非線形結合 LSI を構成するために、製造バラツキに頑健なセル回路を提案し、その試作・評価結果を示した。この回路では、CMOS トランジスタのしきい値バラツキやキャパシタの容量値バラツキ、配線容量バラツキに起因するオフセット誤差やゲイン誤差を補償することができることを示している。

第 5 章では、第 4 章で提案したセルを複数配置した LSI を設計・試作・評価した結果を述べている。設計・試作した LSI は 2 次元の格子状に配置した 400 個のセルで構成される。セルは自身の 4 近傍の結合状態を自由に変更でき、上下と左右の結合強度をそれぞれ独立に設定でき、かつバラツキ補償回路を搭載している。試作 LSI は単純なアルゴリズムで多様なダイナミクスが得られる拡張しきい値結合写像モデルを実装できる。試作した集積回路を評価した結果、セルごとの特性バラツキを 1/2 以下に低減でき、かつ非線形演算に用いる電圧波形を外部波形発生器で任意に与えることで多様なダイナミクスを実現できることを示している。

第 6 章では、考察と今後の展望について述べている。測定により得られたチップ内バラツキ分布から、補償に用いる外部入力信号の分配配線を最適化することで、より高い補償性能を実現できることを考察している。また、実数値パラメータと 2 値状態を対応付ける新しい回路動作設計法を示唆し、小面積な不揮発性メモリの利用により、本研究で示した以上の高い汎用性と複雑な処理が実現できる可能性について述べている。

最後に第 7 章で、本研究の結論を述べている。アナログ波形を用いた非線形現象から、デジタル波形を用いたセルオートマンまで実現できる汎用性の高い集積回路が他にないことを述べ、各章の結果をまとめている。

学 位 論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

本論文に関して調査委員から、バラツキ補償の回路動作および評価法、しきい値結合マップ回路におけるセルオートマトンの動作法、デジタル・アナログ双方のモデルを同時にハイブリッド的に実現できる利点やダイナミクスを生かすこと等について質問がなされたが、いずれも著者から満足な回答が得られた。また、公聴会においても多数の出席者があり、種々の質問がなされたが、いずれも著者の説明によって質問者の理解が得られた。

以上により、論文調査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が、博士（工学）の学位に十分値するものであると判断した。