

大規模ニューラルネットアルゴリズムの開発

Development of large-scale neural-network algorithms

代表研究者 九州工業大学情報工学部助教授 浦 浜 喜 一
Assoc. Prof., Faculty of Computer Sci. and System Engng., Kyushu
Inst. of Technol.
Kiichi URAHAMA

Neurocomputing is expected to open a new promising paradigm to drastically improve the man-machine interface of computers. Neurocomputers employ algorithms mimic to our information processing scheme performing by brains. Some small-scale prototype machines have already been developed which have proved its satisfactory performance. These experiences, however, have uncovered its weakness that its learning time grows exponentially with its scale. Thus a breakthrough for this problem has been desired for neurocomputers to be used practically.

The aim of my research was to develop some new high-speed algorithms for the learning of neural networks which are central engine of neurocomputers. First I analyzed the convergence property of numerical simulation algorithms for neural networks with the aid of massively parallel computers. Asynchronous algorithms was proven to outperform synchronous counterparts. Then I developed a new simulation algorithm based on the backward Euler formula using one-step Gauss-Seidel iteration at each timepoint. This new algorithm has proven to have a superior convergence property over the conventional algorithms. Next dealt were algorithms property over the conventional algorithms. Next dealt were algorithms developed by Hopfield for solving optimization problems. His method have been shown to output sometimes infeasible solutions particularly for large-scale problems hence it cannot be used real-time processing of such problems. I developed in this research a new scheme which always gives only feasible solutions. Furthermore I devised an electronic circuit implementing this new algorithm. This circuit enjoys some superior property such as little power dissipation, few wiring length and easy annealing process. In addition the performance of this new algorithm were analyzed theoretically. Its worst-case errors have been estimated for the maximum-cut problems which are one of NP-complete problems. Last developed was an adaptive learning algorithm for blind separation of time-varying signals mixed in an unknown fashion. A feedforward network alternative to the network proposed by Herault and Jutten was developed and its superior property has been proven.

Following these fundamental researches I have recently applied these algorithms to practical problems such as assignment problems and image reconstruction and extended these methods to develop clustering algorithms for the vector quantization and adaptive algorithms for the principal component analysis.

研究目的

社会の情報化が進むなかで、コンピュータ技術者の不足や精神的なストレスが深刻な問題となっている。その一つの要因は現在のコンピュータのマン・マシン・インターフェイスの悪さにある。例えばコンピュータに直接、音声や手書き文字でプログラムやデータを入力でき、また応答も音声

や画像などで出力されるようになり、加えて大まかな指令だけで動作するようになれば、ほとんどの人が簡単にコンピュータを使えるようになるであろう。すなわちマン・マシン・インターフェイスを我々の日常のマン・マン・インターフェイスに近づける必要がある。このようなことを可能にするコンピュータとして現在多くの研究者が注目

し、開発に力を注いでいるのがニューロコンピュータである。

ニューロコンピュータは人間の脳をモデルにしており、従来のノイマン型コンピュータとは全く情報処理様式が異なる。昨年から今年にかけて音声や画像の認識・合成やロボット制御等でニューロコンピュータのプロトタイプマシンが大学や企業から数多く発表され、その有効性が実証されている。現在は次の段階として真の実用機の開発へと移りつつあるが、それには克服すべき壁がある。すなわち実用に耐えるにはニューロコンピュータの中核であるネットワーク、すなわちニューラルネットは非常に大規模にならざるを得ないが、そうするとニューロコンピュータの中心機能を担う学習が極端に遅くなるという問題である。本研究の目的はこの大規模なニューラルネットの学習を高速に実行するアルゴリズムを開発することである。そのようなアルゴリズムが開発されれば、ニューロコンピュータの真の実用化へ大きく貢献できると考えられる。

研究経過

研究助成金を受け入れて直ちにパーソナルコンピュータとニューロコンピュータ用シミュレーションソフトを購入し、ニューラルネットアルゴリズムの開発と性能の検証を開始した。それと併行して同パーソナルコンピュータに回路シミュレーションソフトをインプリメントしてニューラルアルゴリズムを実行するアナログ電子回路の開発と動作の検証を進めた。この結果次の項目に記すような研究成果が得られたので、随時研究会で口頭発表し、また学会論文誌に論文としてまとめて発表した。

研究成果

本研究では微分方程式で記述されるアナログニューラルネットワークについて、並列計算機でシミュレーションするときの解の収束性の解析と高安定なアルゴリズムの開発、線形計画問題や組合せ最適化問題を解くのにニューラルネットを応用したときの性能の解析と高性能な解法の開発、時系列信号の混信を取り除く適応信号処理への応用とその収束性の解析等を行い、合わせてこれら

の解法をリアルタイムで実行するためのアナログ電子回路を構成した。具体的な内容を項目ごとに以下にまとめる。

1. ニューラルネットの数値シミュレーション

ニューラルネットアルゴリズムは高並列性を持つので、超並列計算機による高速シミュレーションが期待されている。ニューラルネットの微分方程式のシミュレーションではもっぱら前進オイラー法が使われる。この方法では全プロセッサの同期を必要とするので、同期が外れていてもよいとする非同期反復法という新しいアルゴリズムが提案されている。ここではまずこの非同期前進オイラー法の収束性を同期をとる場合と比較し、次に大規模なネットワークのシミュレーションでは前進オイラー法は好ましくないことを指摘し、後退オイラー法を使う新しいアルゴリズムを提案した。

まず非同期前進オイラー法について、ニューロン間の結合が弱い場合にはプロセッサ間の通信遅延がいくら長くても反復解が安定平衡解へ収束することを証明した。しかしニューロン間結合が強い場合には遅延がある値より小さくしなければ収束しないことを示した。更に収束速度について解析した結果、ニューロン間の結合の強さに関わらず非同期アルゴリズムの方が同期法よりも計算時間が短いことを理論的に示した。

次にニューラルネットの微分方程式は規模が大きくなるにつれてスティフ性が強くなることを示した。したがって前進オイラー法のような陽積分公式では時間ステップ幅を規模に逆比例して小さくしていかなければならず、計算時間が急速に長くなる。そこで大規模なネットワークをシミュレーションするのに有効なアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムは前進オイラー法に代わる数値積分公式として、LSIのCADの分野で大規模な電子回路のタイミングシミュレーションに使う方法として考案されたアルゴリズムを採用する。このアルゴリズムでは微分方程式を後退オイラー法で離散化して各時刻での代数方程式を1ステップのガウスザイデル法で解く。この方法がニューラルネットの規模の大きさによらず任意の

時間ステップ幅で収束することを理論的に証明し実験でも確認した。したがって大規模なニューラルネットのシミュレーションではこの方法を使えば前進オイラー法よりも大幅に計算時間を短縮できる。しかし並列化の容易性においては本方法は前進オイラー法よりも劣るので本方法の効率的な並列化アルゴリズムを開発するのが今後の課題である。

2. 最適化問題のニューラル解法

Hopfield がニューラルネットを使って線形計画問題や組合せ最適化問題の近似解を求める方法を考案して以来、その応用例が着実に蓄積されつつあるが、問題が複雑になると性能が著しく劣化することが実験的に示され、性能の理論的な保証がないこともあって、現状のままではこの方法は組合せ最適化問題の近似解法としてその実用性が認められそうにはない。したがってアルゴリズムを改良するとともにその性能を理論的に評価する必要があると思われる。

そこでまずここではアルゴリズムの改良を行っ

た。性能劣化の原因は非許容解を出力することにある。そこでここでは線形計画問題と組合せ最適化問題について許容解だけを出力するような新しい方法を考案した。

まず線形計画問題については、Hopfield が使ったペナルティ法ではなく、双対定理に基づく新しい方法を提案した。この方法によれば必ず最適解が求まる。またこの方法をリアルタイムで実行するために MOS トランジスタをサブスレッショルド領域で使う電流モードのアナログ電子回路を構成し、正常動作を回路シミュレータによって確認した。この回路は従来の Hopfield の回路に比べ格段に消費電力が小さい。ただし現在の LSI のプロセス技術は MOS トランジスタをサブスレッショルド領域で精度よく設計するには不十分であり今後の技術の発展が望まれる。

次に組合せ最適化問題については、まず簡単な部類に入る最短経路問題を動的計画法で解く新しいアナログ解法を考案し、この方法が必ず最適解を出力することを証明した。またこの方法につい

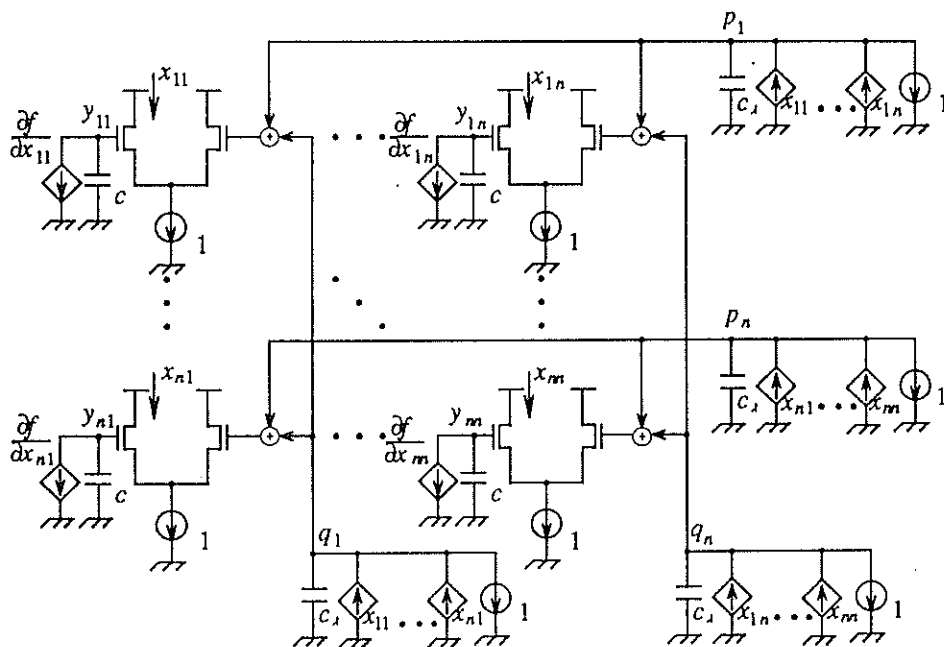


図 1. 割当問題を解く回路

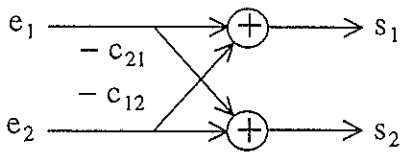


図 2. 信号を分離する回路

でもアナログ電子回路を構成した。

次に NP 困難な問題を含むような複雑な問題について考察した。なかでも広範な問題を含むクラスとして制約条件が確率ベクトルあるいは確率行列である場合について、従来のロジスティック変換を多変数に拡張した変数変換を使う方法を考案し、この方法が必ず許容解だけを出力することを示した。またこの方法についても MOS トランジスタをサブスレッショルド領域で使う電流モードのアナログ電子回路を構成し、Kirchhoff の電流則をうまく利用して自動的に制約条件が満たされるような回路を考案した。例題として割当問題、ソーティング、2 次割当問題、巡回セールスマン問題などについてのこの方法が従来の方法よりも性能が優れていることを確認した。これらの問題を解くための回路を図 1 に示す。割当問題やソーティングでは本方法は必ず最適解を出力する。2 次割当問題や巡回セールスマン問題などの NP 困難な問題では必ず許容解を出力するという点と、得られる許容解の目的関数値において従来の方法よりも本手法は優れている。しかし本方法でも当然ながらいつでも必ず最適解が出力されるとは限らない。これについてはアニーリングを導入すれば性能が更に高くなる。ハードウェアでアニーリングを実現する従来のやり方はアンプのゲインを可変とすることであったが、ここでは抵抗の値を可変とする新しい方法を提案し、この方法によればアニーリングをしない場合よりも性能が上がることをシミュレーションで確かめた。

このように NP 困難な問題ではいつでも必ず最適解が求まるとは限らず、初期値によって種々の近似解が得られる。したがって時間の余裕があれば初期値をいろいろ変えて沢山の近似解を求め、その中から最もよいものを捜すことになる。このようとき得られる近似解が最適解からどのくら

い離れているか知ることが重要である。貪欲算法や逐次改善法といった組合せ最適化の従来の近似解法については、そのような誤差が理論的に評価され、最悪誤差の保証などが与えられている。これに対してニューラル解法についてはこれまでそのような誤差の理論解析は全くされていない。そこでここでは最大カット問題という NP 困難な問題について、本研究で開発した上記の解法における誤差の理論解析を行い、グラフを m 分割する場合の相対最悪誤差が $1/m$ であることを理論的に導いた。これは従来の近似解法に対して与えられている誤差の保証と同じであり、したがって本ニューラル解法の性能は従来の方法と同等であることが保証された。

3. 適応信号処理へのニューラルネットの応用

時系列信号の観測や通信では混信が起こる。そこで観測や受信で得られた信号から混信を取り除いて元の被観測信号や送信信号を復元する手法が必要となる。観測器や通信系の特性が分かっているときにはこの操作は簡単である。しかしこれらの特性が不明の場合にこのような信号復元を行う方法はこれまで知られていなかった。最近 Heralut と Jutten がある種のニューラルネットを使ってこのような信号処理を行うシステムを考案した。実験によって彼らのシステムは高性能であることが示されたが、フィードバックを含むので安定性上問題があり、またコンピュータで実行すると計算量が多い。そこでここでは彼らのシステムを変形してフィードバックを含まない図 2 のような回路を提案した。信号の数が多の場合でも同様の回路で信号分離ができる。図 2 において e_1 と e_2 が測定あるいは受信によって得られた信号である。この回路ではこれを混合して s_1 と s_2 という信号を得る。混合の係数 c_{12} と c_{21} を正しい値に設定すれば s_1 と s_2 が独立になり混信が取り除かれたことになる。問題はこの正解が分からないことである。そこで Heralut と Jutten にならって c_{12} と c_{21} を適応的に変化させるアルゴリズムを考案した。この適応アルゴリズムについてその収束性を理論的に調べてこの回路が復元することができるような信号の条件を明らかにした。

それによればこの回路で普通に見られるほとんどの信号を復元できることが分かった。実験によってこのことを確かめた。

今後の課題と発展

これまでの研究で以上の3項目にまとめたような研究成果が得られた。現在では2番目の最適化アルゴリズムをクラスタリングに応用しアニーリングも取り入れてベクトル量子化の高速な適応アルゴリズムを開発している。またこの適応ベクトル量子化法をパターン認識やデジタル通信の適応等化器に応用する研究もしている。更に割当問題の解法をネットワークのスイッチングの制御に応用する研究も行っている。また3番目の適応信号処理アルゴリズムによく似たものとして主成分分析を適応的に行う回路を開発中である。更にこれらの適応アルゴリズムを適応的に加速する方法も考案している。このアルゴリズムによってまず主成分分析をした後ベクトル量子化をする方法をとれば画像等の高能率なデータ圧縮が可能になると思われる。

発表論文リスト

- 1) Urahama K.: "Performance evaluation of Hopfield network for simple examples", *Proc. ISCAS '91*, pp. 1412-1415 (1991年6月).
- 2) Urahama K.: "Performance evaluation of Hopfield network for simple examples", *Trans. IEICE*, E74(6), pp. 1471-1475 (1991年6月).
- 3) Urahama K. and Ueno S.: "Optimization algorithm using logit transformation", *Proc. Non-*

linear Theory Appl., pp. 51-54 (1991年7月).

- 4) 浦浜喜一: "ニューラルネットの数値解の収束性", 電子情報通信学会論文誌, J74-A(8), pp. 1216-1221 (1991年8月).
- 5) 浦浜喜一: "最大カット問題に対するニューラル解法の精度"; 電子情報通信学会研究会報告, NC-38, pp.63-66 (1991年9月).
- 6) 浦浜喜一: "最短経路問題のアナログ解法", 電子情報通信学会論文誌, J74-A(11), pp. 1680-1681 (1991年11月).
- 7) 浦浜, 上野, 西雪: "数値計画問題のアナログ解法", 電子情報通信学会研究会報告, NLP91-68, pp. 19-25 (1991年12月).
- 8) 浦浜, 安武, 大中: "盲目信号分離の適応アルゴリズム", 電子情報通信学会研究会報告, CAS91-137, NLP91-80, pp. 57-62 (1992年1月).
- 9) 浦浜喜一: "有制約組合せ最適化問題のアナログ解法", 電子情報通信学会研究会報告, CAS91-128, NLP91-71, pp. 1-6 (1992年1月).
- 10) 浦浜喜一: "線形計画問題のアナログ解法", 電子情報通信学会論文誌, J75-D-II(4), pp. 835-836 (1992年4月).
- 11) 浦浜喜一: "線形制約条件付き組合せ最適化問題のアナログ解法", 電子情報通信学会研究会報告, CAS92-21, pp. 19-24 (1992年5月).
- 12) 浦浜喜一: "WTAに基づく組合せ最適化のニューラルアルゴリズム", 電子情報通信学会論文誌, J75-D-II(5), pp. 965-970 (1992年5月).
- 13) 浦浜喜一: "確率の関数を最小化する問題のアナログ解法", 電子情報通信学会研究会報告, NC92-32, pp. 62-68 (1992年7月).
- 14) Urahama K.: "Deterministic annealing in neural networks for combinatorial optimization", *Proc. ISKIT '92*, pp. 94-97 (1992年7月).