

氏名(本籍)	比西正明 (福島県)
学位の種類	博士(情報科学)
学位記番号	情第2号
学位授与年月日	平成9年1月9日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
最終学歴	昭和55年3月 東北大学大学院工学研究科博士課程前期2年の課程情報工学専攻修了
学位論文題目	高速情報伝送システムの高信頼化に関する研究
論文審査委員	(主査) 東北大学教授 中村 維 男    東北大学教授 根元 義 章 東北大学教授 牧野 正 三    東北大学助教授 小林 広 明

## 論文内容要旨

### 第1章 緒 論

コンピュータネットワークでは各地の大型計算機や情報などの資源を共同利用できるが、多数の中小型計算機が接続されると伝送情報量が増加して応答に長い待ち時間が発生することがある。このような待ち時間は、コンピュータネットワーク内の情報伝送がネットワークのデータ伝送能力に制限されるようになるためと利用集中による大型計算機の処理能力低下のために発生すると考えられる。

ネットワークのデータ伝送能力の制限を解決するためには、ネットワークの物理的伝送媒体の伝送速度を上げることが直接的な方法であるが、既存のケーブルを光ファイバなどの高速伝送ケーブルに置き換えることが必要となり、主に資金面、作業面ですぐに実現できるものではない。そこで、既存のネットワークの伝送効率を向上させるために、情報伝送の単位であるパケットの誤り検査点をより有効に活用することによって信頼性を損なうことなく情報の伝送効率を向上させる方法を考え検討する。また、伝送効率をさらに向上するには伝送回線のノイズ除去が有効であると考えられる。ノイズ除去処理にはフィルタ回路が用いられるが、パルス伝送における突発的なノイズ除去は、従来の線形フィルタではノイズと本来の信号の選択的除去がうまく行えない。そのため非線形フィルタが必要となるが、既存のIIRデジタルフィルタはある周波数について共振する場合があり、不安定性を内在している。そこで安定した非線形フィルタをニューラルネットワークを用いて構成する方法を考え検討する。

一方、コンピュータネットワーク全体を通じて信頼性の高い高速情報伝送を実現するためには、ネットワークの物理的伝送媒体の有効利用の他に、ネットワークに接続される大型計算機の高速化が重要である。計算機の高速化はこれまでアーキテクチャの面から論じられることがほとんどであったが、そのようなアーキテクチャに基づいて高速な計算機を実現するには、ハードウェア実装の高密度化とともに増大する信号系のノイズを構造的に抑えて誤りのない高速信号伝送を実現することが必要であり、計算機を構成する各要素の信号伝送特性を解析することが重要である。従来は、試作品の測定値と単純化した計算機による近似値を用いて信号伝送特性を解析していた。しかし、今日の高速計算機では、各構成要素は構造が微細なため測定端子を接触することさえ困難になってきている。たとえ接触できても接触による特性への影響が無視できないため、十分な測定精度が得られない。さらに構造が複雑になってきているため、近似的な計算からも十分な計算精度が得られない。そこで、微細で複雑な構造であっても十分高精度に信号伝送特性を解析できる

方法を検討する。

## 第2章 高速情報伝送システムのための多段階誤り制御方式

コンピュータネットワークにおける情報の伝送効率を向上するために、誤り制御方式について検討した。情報はパケットというひと固まりのデータを単位として伝送される。データの品質を保つのに十分な冗長度をもたせてデータ伝送するのであれば、伝送路品質が良好な場合にはこの冗長度は過剰であり、伝送効率をもっと改善できる余地がある。そこで、伝送路品質が悪化している場合には十分必要なだけの冗長度をもった伝送符号とし、伝送路品質が良好な場合にはその冗長部分にさらに情報を重畳して、その冗長部分を情報の伝送に有効に利用する2段階誤り制御方式を提案して検討した。2段階誤り制御方式は伝送路品質に合わせて伝送符号の冗長度を切り換えるため、従来のように伝送符号を固定して使用する場合に比較して、ビット誤り率（伝送路品質）の広範囲な領域において良好なパケット伝送所要時間と伝送速度および伝送効率の特性が得られるようになり、2段階誤り制御方式が有効であることがわかった。さらに、2段階誤り制御方式を拡張した3段階誤り制御方式を提案して検討した。3段階誤り制御方式は2段階誤り制御方式と比較して、より広範囲なビット誤り率の領域において、パケット伝送所要時間と伝送速度および伝送効率の特性を改善できることがわかった。さらに、多段階誤り制御方式に拡張した場合のパケット伝送所要時間とパケット伝送速度の限界は、それぞれ伝送情報量  $Q$  と単位処理時間  $T$  の積  $Q \cdot T$ 、単位処理時間  $T$  の逆数  $\frac{1}{T}$  になることを明らかにした。

## 第3章 多段ディレーを用いたニューラルネットワークによるノイズ除去

伝送路のノイズ除去をニューラルネットワークを用いて行う方法を検討した。

まずニューラルネットワークの概要を述べた。その中で、相互結合型ニューラルネットワークとしてホップフィールド型ニューラルネットワークをとりあげ、収束条件を時定数  $\gamma$  について検討した結果、ニューロンポテンシャルの初期値が均一の場合では  $\gamma \geq 1$  であるが、一様なばらつきを与えた場合では  $\gamma$  は1より小さい領域でも収束することを解析的および定量的に明らかにした。

次に、従来のフィルタ回路ではうまく処理できないパルス波形におけるノイズ除去処理をニューラルネットワークで実現する方法を検討した。このような時系列処理を行うために、ディレー素子を同一層内で多段に用いて自己フィードバックさせるディレー素子内包型バックプロパゲーションニューラルネットワーク（BPD）を提案した。BPDは過去の複数時刻の出力を直接学習処理に利用できるため、処理能力の向上が期待できる。学習方法を検討した結果、BPDは誤差逆伝播法に基づいて学習することができ、このときの微分値は過去にさかのぼって厳密に求める必要はなく、処理時間を考慮すれば2次の項を無視した簡略形が最適であることがわかった。時系列処理の可能な他の再帰型ニューラルネットワークと比較して、BPDはSN比改善度が大きくノイズ除去をより良く行えることがわかった。BPDをさらに各層内に複数段のディレー素子を介するクロストークリンクを設けて拡張した、クロストークリンクを伴うディレー素子内包型バックプロパゲーションニューラルネットワーク（BPDC）を提案し、その処理特性を検討した。その結果、BPDCはBPDよりも矩形波におけるSN比改善度が向上し、有効であることがわかった。学習特性を改善する幾つかの手法として、確率的逆伝播法とモーメント法を検討した。確率的逆伝播法を用いた場合、処理時間は2～3倍に増加するが、学習誤差の減少に効果があり学習回数を半分に以下に節約できることがわかった。モーメント法を用いた場合、処理時間は20～30%の増加で済み、特にどの重みについても修正量に対する慣性の比率を一定に設定する独立型モーメント法は動作が安定で学習回数を半分に以下に削減できることがわかり、これらの手法はBPDCでも有効であることを示した。

## 第4章 情報伝送システムの高密度実装化における信号伝送特性の3次元解析

コンピュータネットワークに接続される計算機を高速化するうえで重要な信号伝送特性の解析方法を検討した。

高速計算機の高密度実装においては、多ピンコネクタやLSIパッケージなどの構成要素は、より高速な信号伝送を実現するために益々小型化が必要とされ構造も複雑化していき、測定値や近似計算式を用いて信号伝送特性を解析することは困難になる。そこで、導体と支持部材の3次元形状からキャパシタンスとインダクタンスおよび抵抗を計算し、それらの値から等価回路を組み立て、既存の回路解析プログラム（SPICE）を用いて回路解析して各部の信号波形を

観測することで信号伝送特性を解析する3次元信号伝送特性解析システム (TRISIM1) を提案し作製した。キャパシタンス計算にはグリーン関数積分方程式法を用いた。対象物の表面のみをセル分割すればよく、セルの形状を3角形にすることで形状近似し易くした。セル間距離がセルサイズの1.5倍以上離れていればセル間の積分値をセルの中心間での値で置き換えても計算精度にほとんど影響なく、処理時間を短縮できることがわかった。直交座標系で定式化すると、極端に接近するセルでは発散してしまうが、円筒座標交換することで導体面上のセルについては発散を回避できることがわかった。誘電体境界面上のセルについてはそれでも発散が避けられないため、計算点をセルの内側に僅かに移動することで解決した。インダクタンスと抵抗の計算には部分インダクタンス法を用いた。対象物をまず円柱または多角柱のセグメントで近似しておき、各セグメントを太さが零のフィラメントと呼ぶ線素で置き換えるため形状近似し易い。完全導体であれば、フィラメントはセグメントの外周上のみ配置すればよく、抵抗が無視できない場合にはセグメント内部にもフィラメントを配置する。フィラメントの太さを零にしたことにより、フィラメントの自己インダクタンスは無限大になってしまうが、フィラメントの十分近くに仮想フィラメントを設定してそれとの相互インダクタンスで置き換えることで解決した。

TRISIM1 を DIL 型 LSI パッケージや多層配線基板およびメインコネクタに適用して、キャパシタンス、インダクタンスおよびクロストークノイズを計算した結果は測定値と良く一致することが確認され、さまざまな構造の構成要素の高速信号伝送特性の解析に有効であることがわかった。

## 第5章 結 論

本章では、本論文を要約し、主要な成果を総括すると共に、今後の研究課題を明らかにした。

## 審査結果の要旨

高速な情報伝送システムを実現するためには、情報の高密度符号化、ビット誤りを低減させる高度なノイズ除去、そして高密度実装で実現するハードウェアシステム構築のための正確な高速信号伝送特性を解析する手法の確立が急務である。著者は、伝送路の伝送効率を向上させて高速情報伝送を行うために、パケットの誤り検査点を有効に活用する誤り制御方式と、ノイズ除去をニューラルネットワークを用いて行う方法を開発した。さらにハードウェア実装の高密度化に伴って増大する信号系のノイズを構造的に抑えた高速信号伝送を実現するために、構成要素の信号伝送特性を3次元で高精度に解析する方法を確立した。本論文はこれらをまとめたもので、全編5章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、誤り制御方式の伝送符号として広く用いられている巡回符号を情報伝送の単位であるパケットに組み込んだ場合、誤り訂正検出のための検査点が効率よく機能しないことを明らかにするとともに、伝送回線品質に応じて検査点に情報を重畳する新しい符号化手法を提案し、その有効性を理論解析により導いている。

第3章では、従来のフィルタでは適切な処理が行えないパルス伝送における突発的なノイズの除去処理のために、遅延素子を同一層内で多段に用いて自己フィードバックさせる遅延素子内包型バックプロパゲーションニューラルネットワークを提案し、時系列処理可能な従来のニューラルネットワークに比べてSN比が高く改善されることを明らかにしている。さらに本論文で提案したニューラルネットワークの学習特性を改善させる手法として確率的逆伝播法とモーメント法について検討し、それぞれの学習回数を半分以下に削減できることを明らかにしている。これらは重要な知見である。

第4章では、計算機を中心としたハードウェアシステムの信号伝送系の信号伝送特性を高精度に解析するために、高密度実装された構成要素の3次元構造からキャパシタンス、インダクタンス、抵抗の各素子値を求めて信号伝送解析が可能な3次元信号伝送特性解析システムを提案している。そして、本システムによる多層配線基板、メインコネクタ、LSIパッケージの解析を行い、キャパシタンス、インダクタンス、及びクロストークノイズの計算結果が実測値と精度良く一致することを導いている。これは実用上極めて重要な結果である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、高信頼性高速情報伝送システムの実現のために、高密度符号化、伝送路の高性能ノイズ除去、ハードウェアの高精度解析を実現する様々な新しい手法の提案を行い、その有効性を理論と実験の両面から明らかにしたものであり、計算機科学および情報基礎科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。