

学位論文審査報告

<https://hdl.handle.net/2324/1654364>

出版情報：九州大学大学院システム情報科学紀要. 4 (2), pp.207-275, 1999-09-01. 九州大学大学院システム情報科学研究所
バージョン：
権利関係：

学位論文審査報告

氏名(本籍) 坂本 比呂志 (福岡県)
学位記番号 シ情 博甲第42号(理学)
学位授与の日附 平成10年12月28日
学位論文題名 Studies on the Learnability of
Formal Languages via Queries
(質問に基づく形式言語の機械学
習に関する研究)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 有川 節夫
(副査) " " 松尾 文碩
" " " Thomas Zeugmann
" " " 助教授 有村 博紀

論文内容の要旨

人は外部からさまざまな情報を受け取ると、それを一般化しようと試みる。例えば、幼児は両親の言葉を反芻しながら徐々に言葉の意味を理解し、文法というより一般的な概念に習熟していく。また生徒たちは学校で、算数の簡単な練習問題を解いていくうちに、抽象的な四則演算や方程式の概念を理解するようになる。このように、具体的な例を一般化することによって、未知の概念を説明する規則を推論する過程を学習と呼ぶ。

機械学習は、こうした人の推論の過程を計算機によって実現しようとする計算機科学における1つのパラダイムである。例えば、計算機プログラムは、計算を順序立てて説明する1つの概念とみなせるが、プログラムを機械学習することは、それ自身を計算機に与える以外の方法によって、そのプログラムを推論することである。Goldは1967年に、機械学習の成功基準を初めて定式化した。彼の理論によれば、学習は無限に続く推論の過程であり、極限において達成される。この機械学習の成功基準は、極限における同定と呼ばれている。

その後、1988年にAngluinによって、どのような例をどのような方法で与えるかという観点から新しい学習モデルが提案された。これは、質問に基づく機械学習(以下、質問学習)と呼ばれている。質問学習では、未知の概念に関するある種の質問に答える教師を仮定する。Angluinが定式化した質問には、さまざまなものがあるが、本研究で取り扱う質問は、所属性質問と等価性質問である。

いま、自然数上のある2項関係 $c(x,y)$ を学習対象である未知の概念とする。このとき、所属性質問に対する入力は、任意の自然数の組 (m,n) であり、それに対して、

教師は $c(m,n)$ が真であるならば yes, そうでないならば no の答を返す。すなわち、学習者は任意の例が未知の概念の正しい要素であるか否かを問う。一方、等価性質問に対する入力は、ある仮設すなわち自然数上のある2項関係 $h(x,y)$ である。教師は、 $c(x,y)$ と $h(x,y)$ がすべての自然数の組 (x,y) に対して等価であるか否かに対して答え、もしそうでないならば、その証拠となるある自然数の組 (m,n) を返す。すなわち、学習者はある仮設が未知の概念を正しく表現するか否かを問い、そうでないときは、その反例を要求する。

Angluinの定式化の後、形式言語やブール関数を目標概念とした質問学習の理論が展開されている。本研究では、以下の項目に重点をおいて、形式言語における質問学習の理論を拡張する。

1. 良い例からの学習。質問学習と良い例からの学習を組合せて、より自然な学習モデルを提案する。質問学習における等価性質問には、教師に仮定される能力が強過ぎるという難点がある。これに対して、目標概念の中からその概念の特徴的な例を選択して学習者に与えるという手法が提案されている。特徴的な例は、その目標概念のクラスに依存するため、万能的な良い例を定義することは非常に困難であるが、この手法を用いることによって、目標概念によっては等価性質問の使用を回避できることを証明する。

2. レジスタ機械によって定義される言語の質問学習。レジスタ機械は、いくつかの簡単な命令の集合と無限容量をもつ有限個のレジスタによって定義されるが、それらによって受理される言語は、広い意味で本論文の研究対象である形式言語である。Kaminskiらは1994年に、レジスタ機械の一種である有限レジスタオートマトン(finite-memory automaton)を提案し、通常の有限オートマトンとの関係を定式化した。本研究では、未解決であった有限レジスタオートマトンの計算可能性を解明し、Angluinによる有限オートマトンに関する質問学習の結果を利用して、有限レジスタオートマトンのある部分クラスが質問学習可能であることを証明する。

3. 不完全な例からの学習。1997年にBorosらによって提案されたブール関数の不完全例からの学習により、自由度の高い機械学習について議論できるようになった。本研究では、この概念をパターン言語に適用し、パターン言語における不完全例を定式化する。パターンに制限を加えた1変数パターン言語のクラスのPAC-学習可能性は、未だ解明されていない重要な問題である。また、これと密接な関係がある1変数パターンの無矛盾性問題を決定する効率的なアルゴリズムが存在するか否かということも未解決の問題である。この決定問題の難易度は、ある種の不完全例を加えても変化しないことを証明する。さらに、より一般的な不完全例が学習に及ぼす影響につ

いても研究し、そのような一般的な不完全例に対しては、この決定問題は NP-完全であることを証明する。

本論文は、6章から構成される。第1章では、一般的な概念クラスに対する機械学習を整理し、本論文で研究する問題を提示する。第2章では、以下の章の議論で必要となる機械学習と形式言語の概念クラスに関する定義を与える。第3章では、1967年に McNaughton によって導入された文脈自由言語の部分クラスである括弧付き言語に、特性例の概念を導入し、所属性質問と特性例からの学習可能性を示す。第4章ではまず、有限レジスタオートマトンの決定問題を考察し、対応する有限オートマトンの決定問題と比較する。次に、このクラスに制限を加えることにより単純決定性のクラスを定義し、所属性質問と等価性質問からの学習可能性を示す。第5章では、1変数パターンが無矛盾性問題のいくつかの変種を定義し、それらの問題の計算量を決定する。第6章では、以上の研究をまとめ、同時に本研究で解明できなかった未解決の問題について論じる。

論文調査の要旨

機械学習や機械発見の基礎理論である計算学習理論は、帰納推論、質問による学習 (MAT 学習) および確率的近似学習 (PAC 学習) という3つのパラダイムのもとで展開され、この約10年余りの間に飛躍的な進展をみせている。それぞれのパラダイムのもとで、様々な仮説空間 (クラス) を対象に、学習可能性や多項式時間学習可能性等について詳細な研究成果が得られている。また、こうした計算学習理論に基づいた、実際のドメインにおける知識発見の研究や機械発見の理論に関する研究も盛んに展開されている。しかし、学習に際しての付加的な情報の効用や質問による学習が可能であるクラスの拡大に関する問題等、重要な課題が未着手または未解決のまま数多く残されているのも事実である。

本論文は、これらの問題に関して、文脈自由言語に括弧構造という付加情報を付与した括弧付き言語やレジスタ機械の一種である有限レジスタオートマトン、計算学習理論の展開において重要な役割を果たすパターン言語等を対象にして、学習可能性やその基礎となる決定問題等を追究し、計算学習理論の新しい方向を開拓したものである。具体的には、以下のような理論的成果を得ている。

(1) まず、学習における付加情報の活用の問題を、文脈自由言語に括弧構造を付けた括弧付き文脈自由言語を対象にした、良い例からの質問による学習というモデルとして定式化している。括弧付き文脈自由文法には、特性例というある意味ですべての書換え規則の情報を保持した文字列をもつものがある。任意の括弧付き文脈自由文法は、このような特性例をもつ多項式個の部分文法に分

解できることを証明し、こうした特性例を良い例として質問学習に用いることにより、括弧付き文脈自由言語のクラスは、所属性質問のみを用いて多項式時間学習可能であることを証明している。この成果は、通常各ドメインの専門家が務める教師に課すには不自然である等価性質問を目標概念によっては回避できることを示し、同時に、その多項式時間学習可能性が未解決であった文脈自由言語のクラスは、括弧構造を付与すれば、多項式時間学習可能になることを示している。

(2) 質問学習に関する重要な研究課題として、多項式時間学習可能性が証明されている有限オートマトンによる言語のクラスを、これが未解決である文脈自由言語のクラスの方へ拡大する問題がある。オートマトン論の観点から考案された有限レジスタオートマトンは、潜在的に無限アルファベットを扱うことができ、それを有限に制限したときに、通常の有限オートマトンと一致する。この意味で、有限オートマトンの一般化になっている。まず、未解決であった決定性有限レジスタオートマトンの非等価性問題が NP 完全であることや一般の有限レジスタオートマトンの非等価性問題が少なくとも PSPACE 困難であるなどの計算量に関する重要な問題を解決している。その上で、有限レジスタオートマトンにある妥当な制限を課した単純決定性というクラスを導入して、それが多項式回の等価性質問によって学習可能であることを証明している。

(3) パターン言語は、計算学習理論における様々なパラダイムにおいて重要な働きをすることが知られている。こうしたパターン言語の学習に関して、まず、1変数パターン言語を対象にして、計算学習理論のもう一つの重要な問題である不完全例からの学習問題を定式化している。1変数パターン言語のクラスの PAC 学習可能性およびこれに関連の深い1変数パターンの無矛盾性を判定する効率的なアルゴリズムの存否は、未解決の重要な問題であるが、これらの問題の難しさは、ある種の不完全例を加えても変化しないことを証明している。また、より一般的な不完全例が学習に及ぼす影響について研究し、特に、この問題が NP 完全であることを証明している。

以上要するに、本研究は計算学習理論の主要なパラダイムである質問による学習を扱い、付加的な情報の活用という問題に一つの解決を与え、また、単純決定性有限レジスタオートマトンという学習可能な新しいクラスを提示し、さらに、パターン言語を対象にした不完全例からの学習問題を定式化し、その基礎となる決定問題に関して重要な成果を得たもので、情報理学上寄与するところが大きい。よって本論文は、博士 (理学) の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 大塚 信也(福岡県)
 学位記番号 シ情 博甲第43号(工学)
 学位授与の日附 平成10年12月28日
 学位論文題名 NbTi 機械式永久電流スイッチの
 クエンチ特性と超伝導接点接続形
 成機構に関する基礎研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 原 雅 則
 (副査) // // 竹 尾 正 勝
 // // // 船 木 和 夫

論文内容の要旨

電力貯蔵による負荷平準化は、新規電源設備を形成することなくピーク負荷に対応でき、電力設備の稼働率向上と供給コスト低減によって、今後も顕著な増加が予想される電力需要に対処するための最も有効な手段と考えられる。特に、国土が狭く新規電力設備の立地取得が困難な我が国の電力システムにおいては、その有用性が高いことから、電力貯蔵技術の早期の確立が望まれているが、現在、唯一実用化されている電力貯蔵装置である揚水発電は、貯蔵効率が70%程度と低く、建設立地が著しく制限されるため、これらの問題を解決する大容量電力貯蔵技術の開発が急務となっている。このため、近年の超伝導技術の進展を背景に、需要地に近接して設置でき、90%以上の高い貯蔵効率と大容量化によるスケールメリットを有する超伝導電力貯蔵装置(SMES)の開発研究が鋭意進められている。SMESシステムでの電力の貯蔵・放出は、超伝導コイルの両端をスイッチで短絡(オン)・開放(オフ)することで行われ、このときスイッチには、スイッチ抵抗による損失を低減するために、「オン抵抗は小さく、オフ抵抗は大きく」することが要求される。特に、オン抵抗を零とできるスイッチは、永久電流モードを構成でき無損失での電力貯蔵を可能にするため、永久電流スイッチ(PCS)と呼ばれる。これまで、永久電流スイッチとして、超伝導-常伝導間の相転移を利用することでオン抵抗を零とできる超伝導スイッチの適用が検討されてきたが、同スイッチは、十分大きなオフ抵抗が得られないことや大電流通電が困難なことから、これに代わるスイッチの開発が望まれていた。

本研究では、以上のような状況に鑑みて、機械式スイッチは、オフ抵抗を無限大とでき、大電流通電が可能であることから、接点の超伝導化、即ち接触抵抗を零まで低減できればこれらの問題を解決し得る理想的な永久電流スイッチとなることに着目し、機械式永久電流スイッチ開発のための基礎研究として、接触子に超伝導体 NbTi を用いた機械式スイッチ接点の超伝導化の実現を実験により確認し、そのクエンチ特性の詳細を体系的に検討すると同時に超伝導接点接続の形成機構の解明を行った。

更に、同スイッチの実用化の際に不可欠な、電流遮断を伴うスイッチ開放時のアーク放電特性とその影響、ならびに並列接続によるスイッチの大容量化に関する検討も行った。本論文は、これらの研究の成果をまとめたものであり、以下の7章から構成される。

第1章は序論であり、我が国の電力システムの将来動向と超伝導電力貯蔵技術開発の必要性を述べると共に、これまで SMES システムの永久電流スイッチとして適用が検討されている各種スイッチング方式の特徴をまとめ、機械式永久電流スイッチ開発のための技術課題とそれに関する従来の研究結果を整理することによって、本研究の意義と検討課題を明確にした。

第2章では、SMES システムにおける永久電流スイッチの持つべきオン・オフ抵抗特性を明らかにするため、永久電流スイッチとして適用が検討されている機械式スイッチと超伝導スイッチの抵抗特性を考慮し、SMES システムの規模別のケーススタディを通して励磁と貯蔵時の両スイッチの抵抗特性による損失を定量的に比較検討した。更に、機械式スイッチの損失に、第5章で論じる機械式 PCS 開放時に発生するアーク放電特性を考慮して評価したアーク損失を含め、両スイッチの損失を検討した。その結果、大規模 SMES システムでは、機械式スイッチの損失はアーク損失を考慮してもオン抵抗を $10^{-8} \Omega$ 以下にできれば、超伝導スイッチのオフ抵抗による励磁時の損失より低減されることを指摘し、負荷平準化を目的とする大規模 SMES システムにおける機械式 PCS の必要性を示した。

第3章では、本研究で開発した NbTi 機械式 PCS の構造を、接触子駆動機構と接触子の形状及び接触面性状等の仕様を中心に述べた。更に、機械式 PCS を液体ヘリウム中に浸漬し、外部磁界やアーク放電等の影響も検討することができるように考慮して開発した2種類のクライオスタット装置の仕様と特徴について説明した。

第4章では、第3章で説明した実験装置で、機械式スイッチ接点の超伝導化を接触抵抗特性の測定による接点のクエンチ現象とそのクエンチ特性の磁界依存性に注目して調べ、接点の超伝導化が可能であること、即ち機械式 PCS の実現を確認した。更に、接触子の形状や接触面性状、ならびにスイッチ開閉回数やスイッチ荷重等のスイッチ駆動条件などがクエンチ特性に及ぼす影響を体系的に検討し、超伝導接点接続の形成は、主としてスイッチ閉時の接触子同士の機械的摩擦により形成される融着部(ブリッジ)によることを解明した。また、ブリッジ形成が促進されると共にクエンチ電流は増加し、その実現には接触子形状としてはテーパ形状が、一方、駆動条件としては大きな荷重でスイッチ開閉を繰り返すことが有効であることを指摘し、これらの方法で200A以上のクエンチ電流を達成した。更に、超伝導接点接続の形成

機構を説明するブリッジモデルを提案し、同モデルに従いクエンチ特性に関する実験結果は定量的に解析できることを示すと共に、クエンチ電流の磁界依存性はブリッジ、即ち接触子材料 NbTi の磁界依存性に起因していることを解明した。

第5章では、第4章で論じた機械式 PCS を超伝導コイルと負荷抵抗に接続し、SMES システムの基本構成を模擬した回路として PCS 開放時に発生するアーク放電特性を調べ、電気絶縁の観点から超伝導コイルに及ぼす影響を検討した。その結果、アーク放電特性は、基本的には既に明らかにされている接触子に Cu を用いた場合と同様であるが、アーク維持電圧は12V と Cu の場合(15~25V)より低下することを見いだした。次に、アーク放電が超伝導接点接続とクエンチ電流特性に及ぼす影響を調べ、アーク放電が発生しても超伝導接点接続は形成され、しかもクエンチ電流特性の著しい低下はなく、むしろ開閉回数に対して飽和を示していたクエンチ電流はアークを伴う開閉と共に増加することを明らかにした。この原因は、第4章で提案したブリッジモデルに基づく解析から、アーク放電による真実接触面積の増加に起因したブリッジ形成の促進によることを解明した。更に、アーク放電は接触面上に形成された酸化膜等の不純物を除去するコンディショニング効果を有することを指摘し、この点でアーク放電の発生は超伝導接点接続形成に有効であることを示した。

第6章では、スイッチの大容量化を目的として、2組の NbTi 機械式 PCS を並列接続した回路でスイッチ容量とクエンチ特性を検討した。その結果、並列 PCS 回路のスイッチ容量は、使用する各 PCS の容量と分流比に基づき評価でき、同一容量を持つ PCS を使用した場合、均等分流が行われるときに並列接続数倍の最大容量が得られることを指摘すると同時に、並列接続による大容量化の有効性を明らかにした。更に、一方の PCS がクエンチし分流比が変化すると、もう一方の PCS に臨界電流以上の電流が転流する場合に後者も連続してクエンチすることを明らかにした。この連続するクエンチ機構は、各 PCS の電流分布をクエンチ特性、及びパルス電流を通電して詳細に検討したクエンチ遅れ時間特性を考慮することで定量的に予測できることを示した。

最後に、第7章では、本研究で得られた成果を要約し、本論文の総括とすると共に、機械式永久電流スイッチの実用化における今後の検討課題を整理した。

論文調査の要旨

我が国の長期電力需要予測によると、2050年頃の電力需要は現在の2~3倍となり、民生需要の増加により夏季のピーク負荷の増加は益々著しくなるとされている。これに対処するために、現在は種々の需要制御と揚水発

電による電力貯蔵などの手段を講じているが、揚水発電所までの電力輸送を考慮した電力貯蔵効率は70%程度と低く、また長期的には揚水発電所の立地が次第に厳しくなるため、この2つの問題を解決する大容量電力貯蔵技術の開発が待たれている。超伝導電力貯蔵装置(SMES)は、貯蔵効率が高く、需要地の近くに設置できると同時に、電力システムの安定化にも役立つことから、有望な次世代の電力貯蔵技術として注目されている。この SMES では、電力貯蔵は超伝導コイルを励磁した後にコイル端のスイッチを短絡して行い、電力放出はそのスイッチを負荷側に切り替えて行う。SMES 用スイッチには、エネルギー貯蔵時に大電流が流れるので装置効率向上の面からオン抵抗の低減が要求される。特に、オン抵抗を零にできるスイッチは、永久電流スイッチ(PCS)と呼ばれ、永久電流モードで無損失の電力貯蔵を可能にする。これまで、PCS として超伝導材料の超伝導状態における零抵抗とクエンチ時の抵抗成長を利用する超伝導スイッチが検討されてきたが、オフ抵抗を大きくすることが困難なことから、大容量 SMES への適用が難しく、これに代わるスイッチの開発が望まれていた。

著者は、機械式 PCS を開発できれば、オフ抵抗の大きな大容量 SMES 用スイッチに道が開けることに着目し、NbTi 機械式接点における超伝導化達成の確認、そのクエンチ特性と超伝導接点接続形成機構の検討、接点開放時におけるアークの放電特性と超伝導接点接続に対する影響の解明ならびに機械式 PCS の大容量化に関する検討を行い、新しい知見を得ている。本論文は、それらの成果をまとめたもので、次の諸点で評価できる。

第一に、NbTi バルクを接触子とする機械式スイッチ接点の接触抵抗がある電流値において 10^6 倍以上に急変することを見だし、この電流値の外部磁界依存性および抵抗急変時における発熱などからクエンチ前の接触が超伝導状態になっていることを確認し、機械式 PCS の可能性を示している。

第二に、接触子のクエンチ特性に対する接触子形状、表面性状、スイッチ開閉回数およびスイッチへの荷重等の影響を測定し、これらの実験結果の解析と従来の接点理論を基に新しく超伝導接点接続機構のモデルを提案し、同モデルによって実験結果の定量的説明に成功している。

第三に、提案した機械式 PCS 開放時のアーク放電がスイッチ特性に与える影響を実験で調べている。アークは超伝導接点接続形成に対して接点表面の溶融による粗面形成の悪影響と酸化膜等の不純物の除去の好影響の2面性を持つが、実際には後者が顕著に現れて、アーク放電の発生は超伝導接点接続形成に有効に作用し、機械式 PCS の繰り返し開閉が可能であることを示している。

第四に、SMES におけるスイッチのオン・オフ抵抗とエネルギー貯蔵効率の関係を SMES 容量をパラメータ

にして解析し、実用面から機械式 PCS の適用可能な SMES 規模およびアーク特性を考慮した機械式 PCS に要求されるオン・オフ抵抗特性を明らかにしている。

第五に、機械式 PCS の大容量化を目的として、NbTi 機械式スイッチを並列接続したときのスイッチ容量とクエンチ特性を実験とシミュレーションにより検討し、並列接続による大容量化の有効性と大容量化を効果的にするための外部回路条件を明らかにしている。

以上要するに、本研究は、NbTi 接触子で超伝導接点接続が形成されることを確認して機械式 PCS の実現が可能であることを示すとともに、超伝導接点接続機構のモデルを提案してその有効性を確認している。さらに、PCS 閉閉操作時のアーク現象の特性解明および機械式 PCS の適用範囲と大容量化に必要な機械式 PCS の並列接続条件を明らかにしている。本論文は、それらの成果をまとめたもので、電力工学上価値ある業績である。よって、博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 堤 豊 (福岡県)
 学位記番号 シ情 博甲第44号(情報科学)
 学位授与の日附 平成11年3月25日
 学位論文題名 自然言語文データベースのための類似文検索アルゴリズムとその応用に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 牛島 和夫
 (副査) 〃 〃 廣川 佐千男
 〃 〃 〃 日高 達

論文内容の要旨

従来、大規模に収集した自然言語文データベースに関する研究は盛んに行われてきた。特に科学技術文献については、大規模なデータベースの作成手段とそれを検索する手段が用意されている。しかし、個人レベルで収集した自然言語文データベースに対する簡単でかつ柔軟な検索方式はあまり提案されていない。個人レベルのデータベースでは、大規模商用データベースのように個々の文に対して検索キーを付けたり、文を分類する作業を手動で行うことはコスト的に引き合わない。

本研究は、自然言語文データベースを簡単に検索する方法として、抽象化戦略をパラメータとするアルゴリズムを提案し、3つの応用システムを構築し実用化実験を行ったものをまとめたもので、全7章から成る。

第1章では、本研究の目的、背景、本研究の立場、主な研究成果および本論文の構成について述べている。

第2章では、従来のキーワード検索を中心としたテキストデータベース検索法と入力文と似た文をデータベー

スから検索する類似文検索の違いについて述べている。

第3章で、抽象化戦略をパラメータとするアルゴリズムについて説明した。抽象化戦略とは、文と文の照合が失敗したとき、どの構文要素を重視して、文を抽象化するかを決定するものである。名詞、動詞などの内容語を先に抽象化すれば、構文的に類似した文が検索される。逆に付属語などの機能語を先に抽象化すれば、意味的に類似した文が検索される。

この方法では、抽象化の各段階ごとに何度もデータベースの全文検索を行うことになり非効率的である。そこで早見表と呼ぶデータ構造を導入した。早見表は、データベース中に出現するすべての単語と出現した文のデータベース中での文番号との対をハッシュ表に登録したものである。文番号のリストは、昇順にソートされている。検索したい文が与えられると、それに含まれる単語 n 個の組み合わせにより、早見表から $O(n)$ の時間で該当する文を検索することが可能である。早見表の作成および追加は、自動で行われ、作成時、更新時ともに負荷は小さい。

第4章から第6章までは、応用システムである。翻訳支援システム、映画字幕データベースを用いた英会話教育支援システム、電子メールによる質問の自動返送システムについて述べたものである。

第4章では、翻訳支援システムについて述べている。翻訳支援システムは、翻訳したい日本語文と良く似た構文の文とその対訳英語文を例示することにより、人手による翻訳の支援をするシステムである。このため、抽象化戦略は、代名詞、名詞、動詞など内容語を先に抽象化し、構文的要素を残すように設計し、システムを構築した。結果として、日本語文と対訳英語文の対を約5万文のデータベースから類似文検索により、パソコン上で約5秒(クロック33MHz, 主記憶16MBの場合)で検索を行うことを確認した。また、結果として得られる用例も翻訳のために役に立つことを確認した。さらに、この翻訳支援システムの類似検索部分と自然言語文データベースをそのまま利用した、留学生のための日本語教育支援システムを作成した。

第5章で、映画字幕(クローズド・キャプション)のテキストをコンピュータ上に取り込み、英会話教育に利用するシステムについて述べた。クローズド・キャプションとは、英語の映画に付けられた英語の字幕のことで、本来は聴覚障害者のために開発されたものである。これを英会話教育に応用することで、現実に近い英会話を教育に利用することができる。このシステムの中で、英語文の類似検索をし、同じ構文が使われている場面をレーザーディスクを用いて即座に再生することで、教師が授業中に学生に例示したり、あるいは試験問題を作成する場合に利用することができる。このシステムにおいては、

英語用の形態素を重視し、内容語である名詞、動詞などを先に抽象化し、構文を残すような抽象化戦略を考え、実現した。

第6章で、電子メールによる質問に対して回答を自動的に返送するシステムの試作について述べた。ここでは、意味的に似た文を検索する必要があるため、抽象化戦略は内容語とそのつながりを重視し、また機能語を先に抽象化するようにした。このシステムでは、情報処理演習科目を対象とし、電子メールによる学生の質問をデータベース化し、過去に回答された質問が類似検索により見つかった場合には自動的に質問と回答の対が返送される。これにより、約半数の質問について、自動返送できることが分かった。このシステムを有効に利用することで、教師の負担を減らすことができる。また学生側にも、教師がいないときでも質問できる、あるいは直接話すことができな場合でも質問することができるなどのメリットが期待できる。

第7章で結論と関連研究、および今後の課題について述べた。

論文調査の要旨

電子メールの発信やワードプロセッサの利用、OCRによる読み取り等を通して電子化された自然言語文が急激に増加している。これらを一定の基準で集めた自然言語文データベースは知識の宝庫である。これらのデータベースからできるだけ容易に所要のデータを取り出す方法が求められている。また次々と発生する自然言語文を検索が容易なように追加していく作業にはそれなりの手間がかかる。本論文は自然言語文データベース中から入力文にできるだけ類似した文を容易に効率的に探す方法を与えその応用を示して有効性を確認したものである。

文の類似性は検索の目的によって異なる。例えば、和文と英文の対訳一覧データベースから和文を検索し、その対訳英文を参考にして翻訳を支援するシステムを構築しようとするれば、同じ構文を有する和文が見つければよい。一方、質問・回答の対を記録しておいて与えられた質問が過去の質問と同じであればそれに対応する回答をそのまま返すシステムでは質問文の意味が似ていることが重要である。

著者はまず、このように構文優先とするか意味優先とするかの戦略を柔軟に選んで類似文を検索するアルゴリズムを提示した。データベース中に入力文と同じものがなければ入力文中の適当な構文要素を検索が成功しやすいように変換する。この作業を抽象化と呼ぶ。変換した文で改めて検索する。どのような順序で抽象化を行うか決めることを抽象化戦略と呼ぶ。著者は抽象化戦略を実現するために抽象化原始規則群を用意した。原始規則とは日本文の場合例えば具体的な名詞を名詞という品詞に

置き換えたり、活用を削除したり、自立語を削除したり、補助語を削除したりする単位規則を指す。これらの規則の適用順序の入れ替えをシステム構築者に開放することによって構造優先から意味優先までの各段階を利用目的に応じて細かく指定すること可能とした。単純で柔軟性に富むすぐれた着想である。

入力文を変換するたびにデータベースを全文検索することになるのでこれを効率よく行うための工夫が必要である。データベースの構築に際しては自然言語文を形態素解析して文を構成する単語とその品詞情報とを組にしてデータベースに追加し個々の単語をハッシュ法を用いて早見表に登録する。これによって入力文の検索を効率よく行うことができるだけでなくデータベースの更新もほとんど形態素解析の手間だけで済む。

次に著者は、類似文検索アルゴリズムを適用して、翻訳支援システム、映画字幕データベースを用いた英会話教育支援システム、電子メールによる質問の自動返送システムを構築してその有効性を確認している。

翻訳支援システムでは和文と対訳英文の対からなる約5万文のデータベースから構文要素を残すような抽象化戦略を採用することによって85%の検索成功率をあげている。映画字幕のテキストをコンピュータ上にあらかじめ取り込んでおいて必要な構文を含む会話を検索しそれを手掛かりにレーザーディスクから即座にそれが使われている場面を再生することにより英会話教育に活用するシステムを構築している。一つの映画には約2千の字幕文がある。これらから必要構文を含む文を得る検索成功率は80%を超えている。質問自動返送システムでは、著者が担当している情報処理演習科目の受講生が発する電子メール質問に自動回答するシステムに適用を試みた。ここでは名詞や動詞など内容を重視する抽象化戦略を採用。半年の演習で約700件の質問があり、そのうち全く新しい質問を除いて70%が類似質問として検索された。

構文優先の前2者は検索速度も利用者の要求を満たしており実用の域に達している。また意味優先の質問自動返送システムについては類義語辞書の充実や形態素解析プログラムの強化によって有用なシステムに成長できる可能性を有している。

以上を要約すると、本研究は自然言語文の類似性をシステム構築者が柔軟に選ぶことのできる自然言語文データベース検索法を与え、それに基づく応用システムを構築または試作して有用性を確認したもので、情報工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(情報科学)の学位論文に値すると認める。

氏名(本籍) 内田 誠一 (福岡県)
学位記番号 シ情 博甲第45号(工学)

学位授与の日附 平成11年3月25日
 学位論文題名 動的計画法に基づく単調連続2次元ワープ法に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 迫江 博 昭
 (副査) // // 長谷川 勉
 // // // 谷 口 倫一郎

論文内容の要旨

2画像の最大一致を与える画素間のノンパラメトリックなマッピングを、本論文では2次元ワープと呼ぶ。パターン認識の立場から見れば、2次元ワープはパターンの変形に適応可能な弾性マッチング処理であり、また一方の画像を、画素をプリミティブとするモデルと考えれば一種の構造解析処理にもなっている。2次元ワープによる変形の局所的自由度は、ワープに対する制約条件によって規定される。このため対象画像の変形特性を制約条件に反映させる必要があるが、画像の位相構造を保存する変形が第一次近似となり得る場合も多い。

2次元ワープの性質は最大一致の探索手法によっても規定される。従来、この探索問題には画素あるいはブロック単位の摂動法や決定論的弛緩法が適用されてきたが、音声認識における時間歪み整合(1次元ワープ)問題の動的計画法(DP)による解決に刺激を受け、DPを2次元的に拡張して適用する試みもなされてきた。DPは1)解の最適性が保証される、2)目的関数が微分可能でなくてもよい、3)様々な制約条件を取り扱うことができる、4)演算誤差の集積による不安定性が無い、などの特徴を持つ。しかしDPに基づく従来の研究は、予想される複雑さや計算量の多さから、いずれも自由度もしくは最適性を犠牲にしており、不完全なものであった。

本論文は、2次元ワープに関して、1)位相構造を保存する一般的なワープモデルの定式化、2)最適ワープを与えるDPアルゴリズムの確立、3)計算量低減を図る場合も2次元的自由度は堅持、4)対象固有の変形特性の利用は先の問題として保留、という基本的方針に立って基礎的な検討を行ったもので、9章より構成される。

第1章では2次元ワープ問題の概要と従来の主要な研究について述べた。特にDPに基づくものに関してはワープの自由度と最適性を基準とした分類を行い、それぞれの特性を分析して問題点を指摘した。

第2章では単調連続2次元ワープ決定問題の定式化を行った。ここで定義される単調連続性とは隣接画素間の上下左右関係と近傍関係をワープ後も保存するための条件であり、これによって画像の位相構造を保存する2次元ワープが実現される。

第3章では以後の議論の準備としてDPの概要を述べた。DPと密接な関係のある多段決定過程と、DPアルゴ

リズムの計算量低減手法であるビームサーチについても言及した。

第4章では単調連続2次元ワープ決定問題の最適解を与えるDPアルゴリズムとして、カラムワイズアルゴリズムを提案した。画像サイズを $N \times N$ とすると、このアルゴリズムは画像の列を処理単位とする N 段の多段決定過程に基づいている。各列のワープに単調連続性を保証し、かつ列間の遷移に単調連続性を保証するため、段あたり $2N$ の指数オーダーの探索幅を持つ計算量的に困難な問題となる。この問題に対し、ビームサーチを適用した近似アルゴリズムを提案した。ビームサーチをDPアルゴリズムに組み込むことで最適性の保証はなくなるが、ワープの2次元的自由度を保ったまま計算量を多項式オーダーに低減できる。

第5章では最適ワープを与えるもう一つのDPアルゴリズムとして、ピクセルワイズアルゴリズムを提案した。このアルゴリズムは各画素のワープをラスタスキャン順に決定していく N^2 段の多段決定過程に基づいている。各段での決定は単調連続性制約により N 段前の決定に依存する。ピクセルワイズアルゴリズムはカラムワイズアルゴリズムを計算量の点で改良したものであるが、この N 次マルコフ性を扱っているために段あたり N の指数オーダーの探索幅を持つ。このため、前章と同様にビームサーチを適用した近似アルゴリズムを提案した。

第6章ではまずカラムワイズアルゴリズムとピクセルワイズアルゴリズムの計算量の比較を行った。具体的には、それぞれの時間計算量が $O(N^2 9^{2N})$ 、 $O(N^3 9^N)$ であり、ピクセルワイズアルゴリズムを用いた方が大幅に少ない計算量で最適ワープが求まることを示した。次にそれぞれの近似アルゴリズムに関しても計算効率の比較を行い、ピクセルワイズアルゴリズムを基にしたものの方が高い計算効率を持つことを、理論的および実験的に確認した。

第7章では単調連続性制約の局所性やビームサーチの副作用により生じる不自然なワープを回避する手法として、ペナルティおよび整合窓の適用を検討した。

第8章ではピクセルワイズアルゴリズムの近似アルゴリズムを幾つかの濃淡画像対に適用し、ワープの精度を定量的・定性的に評価した。その結果、近似解でも実用上十分な精度が得られることが確認された。また単調性のみを制約条件とする2次元ワープ法や画素単位の摂動法との比較実験により、パターン認識問題における本手法の相対的優位性を示した。

最後に第9章では本論文のまとめと今後の課題について述べた。

論文調査の要旨

二つの画像間の平面的な歪みを除去する写像決定問題

を2次元ワープと呼ぶ。残差を最小化するという最適化問題として定式化され、対象画像の性質やワープ処理の目的に応じて写像の自由度に制約が与えられる。実際の多くの問題では画像の2次元的な位相の保存が基本的な制約条件となる。この2次元ワープには文字認識問題における字形変動への対処、音声認識問題における時間方向の伸縮と周波数方向の伸縮の同時整合、動画像圧縮における動き予測等の手段としてパターン情報処理の分野で広範な応用が期待されている。歴史的には音声認識研究において時間伸縮という1次元的なパターン変動の整合問題が動的計画法によって解決された1970年代から、その原理を拡張して2次元パターンの歪み処理へ適用しようという検討が多数なされて来た。しかし、それらは処理し得る変動がきわめて特殊なものに限定されていたり、位相を保存するという基本的な要件を軽視したものであったりして、その後の発展を見たものは皆無であったと言える。これらの研究では、2次元ワープとは如何なるものであるべきかという議論さえも不十分であった。

本論文は、2次元ワープ法の具備すべき要件に関する議論を踏まえた一般的なワープモデルの定式化、動的計画法に基づく最適解アルゴリズムの導出、実装面から要請される近似解アルゴリズムの提案にわたる研究をまとめたものである。

著者はまず、従来報告されている関連研究を分析し、主として位相保存条件及びワープの自由度に関してそれらの特性を整理して問題点を指摘している。これを踏まえた上で2次元ワープのあるべき形態を論じ、位相を保存しかつ適切な自由度を確保できるワープの基本的制約として2次元的な単調連続性を具備すべきだとしている。この単調連続性条件を4近傍関係で近似したうえで、最適ワープ条件を定式化している。

次に最適ワープを求める動的計画アルゴリズムを検討している。まず、画像中の各列を単位として動的計画処理を進める形式のアルゴリズムを検討し、動的計画アルゴリズムの詳細を設計してカラムワイズアルゴリズムとして提案し、画像サイズが $N \times N$ のとき計算量が $O(N^2 \cdot 9^{2N})$ であることを明らかにしている。このアルゴリズムは単調連続性を保存する2次元ワープ問題の最初の動的計画法定式化として評価できる。さらに、高速化の目的でビームサーチを導入し、多項式オーダーの近似アルゴリズムを示し、実験により精度、処理時間、歪みへの適応能力等の諸特性を評価している。

さらに著者は、ラスタ走査の過程が N 画素の進行で元の画素の近傍に回帰することに着目し、この走査線に沿った多段決定過程が N 次元マルコフ性を有することを指摘し、この性質に基づいて画素単位に動的計画処理を進めるピクセルワイズアルゴリズムを提案している。このアルゴリズムの計算量は $O(N^3 \cdot 9^N)$ で、前のカラムワ

イズアルゴリズムに比して格段の効率化を達成したものとして評価される。また、探索空間が 9^N のオーダーで圧縮されていることから、ビームサーチを併用した場合の精度劣化が低減されるとし、これを実験により確認している。

以上要するに、本研究はパターン情報処理における基本問題の一つである2次元ワープ問題に関して、単調連続性の範囲で位相構造を保存する特性を有する動的計画アルゴリズムを示し、一つの解決を与えたもので、知能システム学上価値ある業績と言える。よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 相利民(中国)
 学位記番号 シ情博甲第46号(情報科学)
 学位授与の日附 平成11年3月25日
 学位論文題名 A Powerful Model BSR⁺ of Parallel Computation: Its Efficient Implementation and Applications(強力な並列計算モデル BSR⁺: その効率的な実現法と応用)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 牛島和夫
 (副査) // // 山下雅史
 // // // 程京徳

論文内容の要旨

計算速度を向上させることは計算機科学の主要な目的の一つである。処理速度に物理的な制約があることから並列性を求めることになり並列計算が計算機科学において重要な役割を演ずるようになっていく。

PRAM(Parallel Random Access Machine)は並列計算の最もよく知られたモデルである。PRAMには3つのモデル: EREW(Exclusive Read Exclusive Write), CREW(Concurrent Read Exclusive Write), CRCW(Concurrent Read Concurrent Write)がよく知られている。CREWはEREWより強力であり、CRCWが最も強力である。1989年 Akl と Guenther が新しい PRAM モデルを提案し BSR(Broadcasting with Selective Reduction)と名付けた。このモデルは CRCW より強力である。1994年には Akl と Stojmenovic が BSR における BROADCAST 命令の選択基準を1個から k 個に拡張して BSR _{k} を提案した。BSR _{k} では k 個の選択基準を組合せるのは AND だけである。しかし、BSRを多くの応用に対してさらに強力にするために、組合せを拡張する。本論文では BROADCAST 命令が選択の一般形、特に任意個の選択基準を任意の論理演算で結合することを

許すようにする。一般的な選択を有するBSRを BSR^+ と名付ける。かくてBSRは $BSR_k(k=1)$ であり、 BSR_k は BSR^+ の特別な場合となる。結局すべてのPRAMモデルの中で BSR_k はBSRより強力であり、 BSR^+ が最も強力である。

並列計算のモデルとして BSR^+ は二つの要求、単純性と実現可能性とを満たさねばならない。単純性によってわれわれは並列アルゴリズムを容易に書くことができ、かつ、並列計算の重要な性能指標：速度やメモリ使用量などを数学的に解析することができるようになる。実現可能性によってそのモデルのために開発された並列アルゴリズムがハードウェア(並列計算機)のレベルで容易に実現できることを保証する。

実現法は二つ層がある。一つは物理的な実現法であり、もう一つは論理的な実現法である。物理的な実現法は工業領域の問題であるが、論理的な実現法は研究領域の問題である。この論文では、 BSR^+ の実現法(論理的な実現法)は、 BSR_k における従来最良の実現法によって用いられた回路の $(1/k)$ を必要とする。

本論文は、9章から構成される。

第1章は序論であり、研究の動機、目的および成果について述べる。

第2章は3つのBSR(BSR_1 と BSR_k と BSR^+)の記述を与える。

第3章では、 BSR^+ の実現法の背景として、 BSR_1 と BSR_k の実現法について述べて分析する。

第4章では、 BSR^+ の構成(architecture)と内接続器(interconnection unit)と選択器(selection unit)を与える。

第5章では、処理装置の数量 \leq 処理装置の語の広さの条件で、 BSR^+ の実現法を討議する。新しい比較操作を定義し、新しい比較器を与える。著者が提唱したビット対応技法に基づいて BSR^+ の効率の良い実現法を得る。

第6章では、処理装置の数量 $>$ 処理装置の語の広さの条件で、 BSR^+ の実現法を討議する。二つのレジスターと六つの専門の命令を定義し、もう一つの新しい比較器を与える。その比較器に基づいて BSR^+ の効率の良い実現法を得る。

第7章では、PRAMを概観する。EREWとCREWとCRCWとBSRを比べる。 BSR_k と BSR^+ の関係を討議する。

第8章では、 BSR^+ の単純性や、能力や、エレガンスを示すためにいくつかの応用に対する定数時間解を与える。例えば、辞書式順序で、多次元空間の n 点のsorting問題に対して、 n 処理装置の BSR^+ で定数時間解が得られる。しかし、その問題より簡単な1次元空間の n 点のsorting問題に対して、 n 処理装置のCRCWの時間下界は $O(\log n)$ である。

第9章では、本論文のまとめおよび今後の課題について述べる。

論文調査の要旨

並列計算を理論的に設計・分析するための基本モデルに抽象機械PRAM(Parallel Random Access Machine)がある。PRAMは、プログラムを同期的に実行する共有メモリSIMD(Single-Instruction stream, Multiple-Data stream)並列計算モデルで、複数の処理装置がメモリアクセス装置を介して複数のメモリモジュールに接続されている。処理装置からメモリへの読み書きには排他読み排他書き(EREW)と並列読み排他書き(CREW)と並列読み並列書き(CRCW)とがある。これらの内でCRCWが最も強力なモデルである。

CRCWモデルでアルゴリズムを設計するに当たって考慮しなければならないのは並列書き(CW)における衝突回避の方法である。メモリ側から見て処理装置間に優先順位を決めておく方法や、複数の処理装置から送られてくるデータを書き込みの直前に簡単な計算で処理する方法がある。Akl達は1989年ついで1994年にBSR(Broadcasting with Selective Redution)を提案した。これは、先ず処理装置側から、メモリ側に書き込むべきデータと判定に用いる k 個のデータとを各メモリに一斉に送出する。次にメモリ側は各処理装置から送られてくる k 個の判定用データとメモリ自身が持っている k 個のデータとに対して予め決められている比較演算を行う。最後に k 個の比較が総て成立する処理装置から送られたデータのみを集めて縮約計算しメモリに書き込むというものである。1989年の提案は $k=1$ であった。1994年にそれを一般の自然数に拡張した。これを BSR_k と称している。 BSR_k を用いれば従来CRCWで定数時間解が得られなかった多くの問題に定数時間解を与えることが出来る。

本論文は、 BSR_k を拡張して BSR^+ を提案し、その効率的な実現方法を与え応用を示したものである。 BSR_k における k 個の比較演算結果に対して任意の論理演算を許すのが BSR^+ である。アルゴリズムの記述力がますので BSR^+ は BSR_k より強力となる。

BSR_k の論理的な実現に際しては、 N 台の処理装置が送られてくる判定用の k 個のデータについて N 台のメモリごとに k 個の比較演算を並列に行うためには kN^2 個のレジスターが必要である。著者は任意の論理演算結果をビットごとに計算する新たな比較器を導入することによって N^2 個のレジスタで BSR^+ の判定を実現できることを明らかにしている。

次に著者は、 BSR^+ を用いた四つの応用問題に定数時間解を与えて有効性を示している。

第一に、多次元空間の点を辞書式順序で整列させる問

題である。比較演算結果に論理和が使えることを利用して自然にアルゴリズムを記述できることを示している。

第二に、 c 個の属性を持つ関係データベースのレコードが与えられているときに各レコードに対して指定したレコードの属性とちょうど m 個 ($m \leq c$) の属性の値が等しいレコードを数え上げる問題である。これらの問題に対しても論理和を用いて簡潔にアルゴリズムを記述できることを示している。

第三に、二進木の「行きがけ順・中順」(または、中順・行きがけ順)が与えられたときに元の2進木を復元する問題である。

第四に、 n 要素の一次元配列のうち m 要素 ($m < n$) が使用されているときにこれら m 要素を前に詰める問題である。

いずれの問題もこれまでのモデルでは定数時間解が得られていなかったものである。

以上を要約すると、本研究は、並列計算の抽象機械 PRAM に新たに BSR⁺ モデルを提案し、その論理的な実現を効率的に与える方法を示し、このモデルを用いて四つの応用問題に定数時間解を示したもので、計算機科学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(情報科学)の学位論文に値すると認める。

氏名(本籍)	賈 洪 廷 (中国)
学位記番号	シ情 博甲第47号(工学)
学位授与の日附	平成11年3月25日
学位論文題名	ANALYSIS OF JUNCTION PROBLEMS IN RECTANGULAR WAVEGUIDE AND OPEN WAVEGUIDE PROBLEMS USING FOURIER TRANSFORM TECHNIQUE (フーリエ変換の技法を用いた方形導波管の接続問題及び開放型導波路問題の解析)

論文調査委員

(主 査)	九州大学 教授	安 元 清 俊
(副 査)	〃	〃 立居場 光 生
	〃	〃 竹 尾 正 勝

論文内容の要旨

方形導波管の直角バンド、E面-T分岐、H面-T分岐、E面-H面-交差分岐、マジックT分岐、スロット結合器等は、電力分配器、フィルタ、方向性結合器等のマイクロ波回路素子として広く利用されている。また、断面の一部が方形の導体で構成され一部が開放された Inset Dielectric Guide 及び Groove Guide は、マイクロ波・

ミリ波帯における低損失の伝送線路及び漏洩アンテナ素子として、将来の発展が期待されている。本論文では、方形導波管の不連続問題と方形断面の導波路構造の導波問題に対して、フーリエ変換の技法を応用した新しい解析方法を提案し、具体的な解析結果を他の解法から得られた結果と比較して、その有用性を示している。

第1章は序論である。第2章では、方形導波管の不連続問題及び方形断面の導波路構造の導波問題にフーリエ変換の技法を適用するために必要な理論的な基礎を述べている。これらの問題にフーリエ変換を適用する場合、解決すべきいくつかの課題がある。まず、変換する座標変数に関して一様な空間構造を必要とするフーリエ変換を、不連続部を持つ導波管の問題にそのまま適用することはできない。次に、Inset Dielectric Guide の電磁界をフーリエ変換すれば、開放型問題に固有の連続スペクトルに関する複雑な積分を処理しなければならない。更に、解の精度を改善するために電磁界の端点条件を考慮に入れる必要があるが、フーリエ変換を適用した場合の端点条件の取り扱いが良く知られていない。本章では、これらの課題を解決するために、イメージ導波管、3次元的な境界条件の変数分離、開放型導波管に対する完全整合境界、フーリエ変換領域における端点条件の処理などの新しい考えを提案している。

第3章では、方形導波管の直角バンド、E面-T分岐、H面-T分岐、E面-H面-交差分岐、マジックT分岐の問題を解析している。従来の解析方法では、接続部を空洞共振器の領域と分岐導波管とに分離し、複雑なダイアディック・グリーン関数を使って表現した空洞共振器内の電磁界をモード展開した分岐導波管の電磁界と整合させる方法が採用されていた。このため、解析手続きが非常に複雑になり、数値解析に多大な計算時間を要していた。これらの問題に対して、本章では分岐導波管の一つに対してイメージ導波管を導入し、フーリエ変換が可能な一様な導波管領域すなわち主導波管を形成している。フーリエ積分で表現した主導波管内の電磁界とモード展開した分岐導波管の電磁界を開口上で整合させることにより、各分岐導波管の電磁界の振幅を直接関係付ける行列方程式を解析的に閉じた形で得ている。更に、複雑な境界条件を変数分離することにより、フーリエ変換の技法を3次元的な交差分岐の問題に適用している。開口上での電磁界の整合はフーリエ変換されたスペクトル領域で行っている。本章で示している行列方程式の収束は速く、計算された散乱パラメータの値は他の文献による結果に非常に良く一致している。

第4章では、2つの方形導波管からなるスロット結合器の問題を、スロットの幅と厚みを考慮に入れて一般的に解析している。方形導波管内の電磁界をフーリエ積分で表現し、スロット内の電磁界を導波管モードで展開し

ている。しかし、これらの電磁界成分をスロット開口面上で直接整合させる方法を探らないで、開口面上の電界の端点条件を考慮に入れた直交関数系を介してフーリエ変換領域で整合させる新しい方法を提案している。その結果、スロットの幅が十分に広い場合でも、スロット結合の散乱パラメータが少ない展開項数で精度良く計算できることを示している。

第5章では、Inset Dielectric Guide及びGroove Guideを解析している。Inset Dielectric Guideに対して、標準的な解法は導波路の上部の半無限領域における電磁界をフーリエ積分で表現して、モード展開した溝の内部の電磁界と開口上で整合させる方法が考えられるが、この場合、開放型の問題に固有の複雑な連続スペクトルの処理が問題になる。本章では、半無限領域に仮想的な完全整合境界を導入し、開放型の問題を連続スペクトルを用いずに近似的に解析する方法を提案している。完全整合境界の条件は、半無限領域において電気壁及び磁気壁の条件を満たす電磁界を結合させることによって実現している。この手法を用いれば、Inset Dielectric Guideの特性方程式を解析的に閉じた形で得ることができる。数値計算の結果は、解の収束が非常に速く、完全整合境界を導体表面から1波長程度離して置くことにより、溝の内部の電磁界の展開を1~2項数だけで打ち切っても十分な精度の解が得られることを示している。また、Groove Guideに対しては、第4章で提案した方法を応用して、電界の端点条件を考慮に入れた解析を行っている。特性方程式は収束が非常に速い行列方程式を使って解析的に閉じた形で与えられている。数値計算の結果、小さな行列方程式を解くだけで、高次モードの分離に必要な解の精度が得られることを示している。第6章は結論である。

論文調査の要旨

方形導波管で構成した各種の分岐回路及びスロット結合器は、衛星通信における電力分配器、フィルタ、方向性結合器等のマイクロ波回路素子として広く利用されている。また、断面の一部が方形導体で構成され一部が開放されたIDG(Inset Dielectric Guide)は、ミリ波帯における低損失の伝送線路及び漏洩アンテナ素子として将来の発展が期待されている。このような方形導波管を基本とした導波路問題に対して、通常は、変分法、有限要素法、モーメント法、モード整合法などの数値解法が用いられている。しかし、これらの解法には、計算アルゴリズムが煩雑で、多大な計算時間を要するという難点があり、回路設計への応用を目的とした実用的な観点から、解析手法の改良が求められていた。

本論文では、方形導波管の分岐問題とIDGの導波問題に対して、フーリエ変換の技法を用いた簡明で精度の良

い解析的手法を提案し、具体的な応用例を示してその有用性を明らかにしている。導波管の不連続問題及び開放型導波路の問題にフーリエ変換を適用するためには、解決すべきいくつかの課題があった。著者は、イメージ導波管、フーリエ変換領域における端点条件の処理、開放型導波路に対する完全整合境界などの新しい考えを導入して、これらの課題を克服している。

著者は、まず、方形導波管のE面-T分岐、H面-T分岐、E面/H面-交差分岐、及びマジック-Tの問題を解析している。従来の解法では、接続部を空洞共振器の領域と分岐導波管の領域とに分離し、複雑なダイアディク・グリーン関数を使って表現した空洞共振器内の電磁界と正規モードで展開した分岐導波管の電磁界を開口上で整合させる方法が採られていた。これに対して、著者は、分岐導波管の一つに対してイメージ導波管を導入し、フーリエ変換が可能な様な導波管領域すなわち主導波管を形成して、導波管の分岐問題を主導波管上の開口問題に置き換えている。その結果、フーリエ積分で表現した主導波管内の電磁界と正規モードで展開した分岐導波管の電磁界を開口上で整合させることにより、各分岐導波管の電磁界の振幅を直接関係付ける行列方程式を得ることに成功している。電磁界の整合をフーリエ変換領域で行っているため、行列方程式の要素は留数計算で解析的に計算することができ、解の収束も非常に速い。

次に、著者は、二つの方形導波管をH面に設けた長方形のスロットにより結合させたスロット結合器を取り扱っている。スロット結合器の解析では、複雑さのため、スロットの幅と厚みを無視することが多いが、著者は、これらを考慮に入れた一般的な解析を行っている。方形導波管内の電磁界をフーリエ積分で表現し、スロット内の電磁界を導波管モードで展開している。しかし、これらの電磁界成分を開口面上で直接整合させた場合、開口面端部における電界の特異性により、スロット内の電磁界の展開に非常に多くのモードを必要とすることになる。これを避けるために、著者は、開口面上の電界の端点条件を考慮に入れた直交関数系を介してフーリエ変換領域で電磁界成分を整合させる方法を提案している。その結果、スロットの幅が十分に広い場合でも、小さな行列方程式を解くことにより、スロット結合における散乱パラメータを精度良く計算できることを明らかにしている。

著者は、最後に、IDGの解析法を考察している。標準的な解き方として、導波路の上部の半無限領域における電磁界をフーリエ積分で表現して、モード展開した溝の内部の電磁界と開口上で整合させる方法が考えられるが、この場合、開放型導波路に固有の複雑な連続スペクトルの処理が困難である。著者は、半無限領域に仮想的な完全整合境界を導入し、開放型の問題を連続スペクトルを用いずに解析する新しい方法を提案している。完全整

合境界の条件は、半無限領域において電気壁及び磁気壁の境界条件を満たす電磁界を結合させて実現している。この方法を用いれば、IDGの特性方程式を解析的に得ることができる。数値計算の結果は、解の収束が非常に速く、完全整合境界を導体表面から1波長程度離せば、溝の内部の電磁界の展開を1~2モードで打切っても十分な精度が得られることを示している。

以上、本論文は、方形導波管の分岐問題とIDGの導波問題に対して、フーリエ変換の技法を用いた簡明で精度の良い解法を提案し、具体的な応用例を示してその有用性を明らかにしたもので、情報通信工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は、博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 富山宏之(鹿児島県)
 学位記番号 シ情博甲第48号(工学)
 学位授与の日付 平成11年3月25日
 学位論文題名 Code Generation and High-Level Synthesis for Embedded Systems(組込みシステムのためのコード生成と高位合成)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 安浦寛人
 (副査) // // 荒木啓二郎
 // // // 黒木幸令

論文内容の要旨

半導体製造技術と設計技術の進歩に従い、パーソナルコンピュータなどの汎用計算機だけでなく、ビデオやファックスなど様々な家電製品や情報通信機器にもプロセッサを中心としたデジタルシステムが組み込まれるようになった。特定の処理を行う機器に組み込まれるデジタルシステムは組込み型デジタルシステム、あるいは単に組込みシステムと呼ばれる。本論文の目的は、各用途に応じて組込みシステムを性能、コスト、および消費電力に関して最適に、かつ、短期間で設計する技術を確立することである。本論文では、高級言語で記述されたソフトウェアからマシンコードを生成し、最適化するコード生成手法と、ハードウェア(プロセッサや専用回路)の動作記述からレジスタ転送レベルの構造記述を自動合成する高位合成手法を提案する。

本論文は7つの章から構成される。第1章は序論である。第2章では、本論文が対象とする組込みシステムのアーキテクチャと設計手法の概要を説明する。

第3章では、組込みシステムのプロセッサのデータパス幅を最適化するためのコード生成手法を提案する。データパス幅は組込みシステムのコストや性能に大きな

影響を与えるため、用途に応じてデータパス幅を最適に決定することは組込みシステムを設計する上で重要な問題である。用途に応じてデータパス幅を効率良く最適化するためには、プログラミング言語はデータパス幅に対して独立でなければならない。なぜなら、もしプログラミング言語の仕様がデータパス幅に依存するならば、データパス幅を変更する度にプログラムの修正が必要となるからである。本論文では、既存のプログラミングであるC言語を拡張し、各データ型のサイズを1ビット単位で指定可能とすることによりデータパス幅に対する独立性を確保したプログラミング言語Valen-Cを提案している。また、Valen-C言語で記述されたプログラムからマシンコードを生成する手法を提案し、そのコンパイラの実装について述べる。データパス幅を最適化する実験を通じて、Valen-C言語とそのコンパイラの有効性を示した。

第4章では、メモリ階層を考慮し、システムの高性能化と低消費電力化を同時に実現するコード生成手法を提案する。キャッシュミスは組込みシステムの性能の低下と消費電力の増大をもたらすため、キャッシュミスの回数を最小化することは組込みシステムを設計する上で重要な問題である。本論文では、プログラムをトレースと呼ばれるプログラム片に分割し、トレースをメモリ上に最適に配置し、命令キャッシュミスを最小化することにより、高性能化と低消費電力化を同時に実現する手法を提案する。提案手法の最も大きな特長は、トレースの配置問題を整数線形計画問題として定式化することである。整数線形計画問題の最適解を求めることにより、与えられた入力データセットについて、命令キャッシュミスを最小化するトレースの配置を決定することができる。計算機実験により、命令キャッシュミスの回数が平均30%、最大77%削減されることを示した。

第5章では、性能を犠牲にせずに低消費電力化を実現するコード生成手法を提案する。命令を並び変え、プロセッサと主記憶の間のバスの遷移確率を低減することにより、低消費電力化を実現する。命令キャッシュミス時には、バスを介して主記憶からプロセッサに複数の命令が連続して転送されるという性質を利用し、連続転送される2つの命令の2進数表現のハミング距離が最小となるように命令スケジューリングを行う。プログラムに対する入力データが未知である場合と既知である場合の2通りについて、命令スケジューリングアルゴリズムを提案する。計算機実験により、命令キャッシュミス時のバスの遷移確率が5%から29%削減されることを示した。

第6章では、製造プロセスを揺らぎを考慮し、設計マージンを最適化するハードウェアの高位合成手法を提案する。製造プロセスの揺らぎにより、設計が同じでも、製造後の回路の遅延時間は一定ではない。本論文では、各

機能ユニットの遅延時間は確率的に分布し、その確率分布が既知であると仮定する。その仮定のもとで、まず、良品チップの単価をチップ面積/歩留まりと定義し、良品チップの単価が最小となるように機能ユニットをライブラリから選択する手法を提案する。機能ユニットの選択に関する定理を2つ示し、この定理により、機能ユニットを選択する問題の最適解の探索空間が削減されることを示す。この定義に基づき、最適に機能ユニットを選択するアルゴリズムを提案する。また、各機能ユニットの遅延時間の分布が与えられた時、機能ユニットが組み合わされて構成された回路全体の遅延時間の分布を計算する手法と、遅延時間が制約条件を満たす確率を最大化する機能ユニットのバインディング手法も提案する。計算機実験により、従来手法に対する提案手法の優位性を示した。

論文調査の要旨

ビデオやファックスなど様々な家電製品や情報通信機器に組み込まれ特定の処理を行うデジタルシステムは、組込み型デジタルシステム、あるいは単に組込みシステムと呼ばれている。組込みシステムは、今後、各種の社会システムや経済システムの中核部分にも多用されると考えられる。組込みシステムは、専用のハードウェア(プロセッサ、メモリおよび専用回路)とソフトウェアの組合せとして実現されるが、従来の汎用計算機システムとは設計に課される要求や制約が異なり、組込みシステムのためのシステム設計手法の確立が緊急の課題となっている。本論文は、各用途に応じて組込みシステムの性能、コスト、および、消費電力を最適化し短期間で設計する技術を確立することを目指した研究の成果をまとめたものである。本論文では、(1)高級言語で記述されたソフトウェアプログラムから組込みシステムの特定用途向けプロセッサに対するマシンコードを生成するコード生成手法と、(2)ハードウェアの動作記述からレジスタ転送レベルの構造記述を自動合成する高位合成手法を提案している。これらの成果は、従来の汎用計算機に対するシステム設計手法との違いを吟味し、組込みシステムの性質を十分に活用した設計手法の提案であり、新しいシステム設計手法の基本的な方向性を示したものと見える。

(1)に対しては、組込みシステムのプロセッサのデータバス幅を最適化するためのコード生成手法を提案している。データバス幅はシステムのコストや性能に大きな影響を与えるため、用途に応じて最適なデータバス幅を決定することは組込みシステムを設計する上で重要な問題である。しかし、用途に応じてデータバス幅を変えるためには、プログラミング言語がデータバス幅に対して独立でなければならない。本論文では、既存のプログラミング言語であるC言語を拡張することにより、各データ

型のサイズを1ビット単位で指定可能とし、データバス幅に対する独立性を確保したプログラミング言語Valen-Cを提案している。Valen-C言語で記述されたプログラムからマシンコードを生成する手法を提案し、そのコンパイラの実装および組込みシステムの実例の設計を行い、Valen-C言語とそのコンパイラの有効性を示している。

また、メモリ階層を考慮し、システムの高性能化と低消費電力化を同時に実現するコード生成手法を提案している。具体的には、組込みシステムの性能の低下と消費電力の増大をもたらすキャッシュミスの回数を最小化する手法を提案している。プログラムをトレースと呼ばれるプログラム片に分割し、トレースをメモリ上に最適に配置し、命令キャッシュミスを最小化することにより、高性能化と低消費電力化を同時に実現する手法を提案している。トレースの配置問題を整数線形計画問題として定式化し、その最適解を求めることにより、与えられた入力データセットについて、命令キャッシュミスを最小化するトレースの配置を決定することができることを示している。実験により、命令キャッシュミスの回数が平均30%、最大77%削減されることを示している。さらに、性能を犠牲にせずに低消費電力化を実現するコード生成手法も提案している。命令を並べ換え、プロセッサと主記憶の間のバスの遷移確率を低減することにより、低消費電力化を実現する手法である。命令キャッシュミス時には、バスを介して主記憶からプロセッサに複数の命令が連続して転送されるという性質を利用し、連続転送される2つの命令の2進数表現のハミング距離が最小となるように命令スケジューリングを行うアルゴリズムを提案している。計算機実験により、命令キャッシュミス時のバスの遷移確率が5%から29%削減されることを示している。

(2)に関しては、製造プロセスの揺らぎを考慮し、設計マージンを最適化するハードウェアの高位合成手法を提案している。製造プロセスの揺らぎにより、設計が同じでも、製造後の遅延時間は回路ごとに異なるという事実に着目し、各機能ユニットの遅延時間の確率分布が既知であると仮定した高位合成手法を提案している。また、各機能ユニットの遅延時間の分布が与えられた時、機能ユニットが組み合わされて構成された回路全体の遅延時間の分布を計算する手法と、遅延時間が制約条件を満たす確率を最大化する機能ユニットのバインディング手法を提案している。種々の実例に対する実験により、従来手法に対する提案手法の優位性を示している。

以上を要約すると、本研究は、組込みシステムの設計において、ソフトウェアおよびハードウェアの性能、コスト、消費電力に関する最適化手法を提案しており、組込みシステムに対する新しいハードウェア・ソフトウェア

ア協調設計手法の方向性を示したもので、情報工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位論文に値すると認める。

氏名(本籍) 韓 卿 求 (韓国)
 学位記番号 シ情 博甲第49号(工学)
 学位授与の日付 平成11年3月25日
 学位論文題名 FVTD法による2次元トンネル内の電波伝搬特性の解析に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 安元清俊
 (副査) " " 立居場光生
 " " 赤岩芳彦

論文内容の要旨

近年、移動体通信の急速な普及に伴い、さまざまな環境のもとでの無線電波の伝搬特性の解明が求められている。この中、最近の重要な課題の一つとして、トンネル、地下街、地下鉄、建物内等、これまでに電波の不感地帯であった空間における電波伝搬の問題がある。これらのトンネル状構造物は、損失性誘電体で取り囲まれた自由空間から構成されており、電磁波論的な立場ではオーバーサイズな導波路モデルが適用できる。これまでのトンネル内の電波伝搬に関する研究では、主に一様なトンネルモデルに対する数値計算とその実験的検証が行われてきた。しかし、一般に地下街等で見られるトンネル構造の多くは伝搬方向に一様ではなく、分岐や折れ曲り等、さまざまな不連続部を伴っている。このような実際問題と係わりの深い複雑なトンネル構造内の電波伝搬特性を解明するためには、不連続部で発生する反射波と透過波の影響を考慮に入れて全体的な伝搬特性を評価することが必要である。

本論文では、トンネル内の電波伝搬の解析に、FVTD法(Finite-Volume Time-Domain Method)を応用している。FVTD法は、電磁波の散乱問題に対して開発された時間領域の数値解法である。この方法では、任意形状の不連続部を比較的簡単な手続きで取り扱うことができる利点を有している。本手法による3次元トンネル構造の解析は、計算機の記憶容量の制約のため、非常に困難である。また、方形トンネルの基本伝搬モードは TE_{10} モードであることが知られている。このことから、本論文では、対象を2次元構造に限定して、任意の折れ曲りや複数の分岐をもつ複雑な2次元トンネル内の伝搬特性を明らかにしている。

本論文は、全体を5章で構成している。第1章は序論であり、本研究の背景および従来のトンネル内電波伝搬

の問題に関する研究状況について述べ、本研究の目的と意義を示している。

第2章は、本論文の理論的な基礎を構成するもので、損失媒質を含む導波路問題に対するFVTD法の定式化を述べている。損失媒質中のマクスウェルの方程式に体積積分を施して時間領域において離散化するための新しい手続きを提案し、直角座標系における2次元および3次元FVTD表現式を導出している。また、FVTD法では媒質の境界が空間セルの分割に一致しない場合、その微小セル内の媒質定数を体積比で平均化することによって、任意形状の境界条件を近似的に満足できることを示している。さらに、FVTD法における解の安定条件を検討し、時間ステップに対する制約が伝統的なFDTD法(Finite-Difference Time-Domain Method)に比べて緩和されることを示している。FVTD法は、有限の計算領域を設定するので、解析領域の制限を行うためには終端部における吸収境界条件を必要とする。本章では、損失媒質に対するFVTD法のPML(Perfectly Matched Layer)吸収境界条件を導出している。

第3章では、FVTD法による2次元トンネル内の電波伝搬特性の解析とその実験的検証のために行ったマイクロ波帯の伝搬実験の結果について述べている。伝搬方向に不均質な代表的な構造として、L型トンネル、T型分岐、十字型分岐、および任意の折れ曲り角をもつトンネルモデル、さらに複数の分岐を連続接続した構造について数値解析を行い、その結果が、コンクリートブロックで製作した2次元トンネルモデルにおける実験結果とよく一致していることを示している。また、標準的なT型分岐および十字型分岐では、不連続部を透過する電波は急激に減衰する。本章では、その伝搬環境を改善する上で有効なトンネル構造の検討を目的とし、分岐部の壁に突起物を設ける方法、分岐部の中央に柱体を設置する方法、および分岐部の角に隅切りを設ける方法を提案している。個々の構造について数値解析を行い、このような構造的変形により透過電波の減衰が大幅に改善されることを明らかにしている。

第4章では、複数の誘電体あるいは磁性体からなる複合媒質内の電磁界を精度よく解析する方法として、適応型FVTD法を提案している。不均質媒質内の電磁界の境界値問題に通常のFVTD法を適用するとき、離散化を原因として、異なる媒質の境界において非物理的反射波が発生することがある。これは、各部分空間を占める媒質内の電磁波の速度が整合していないためである。この問題点を解決するため、適応型FVTD法では、離散化する空間セルサイズあるいは時間ステップを対象領域における電波の伝搬速度に応じて変化させる。提案した方法を用いて、1次元の伝搬問題およびT型分岐トンネルの解析を行い、その結果を通常のFVTD法による結果

と比較して、本方法の有効性を明らかにしている。

第5章は、結論であり、本研究の結果を各章ごとにとまとめるとともに、残された問題点や将来の展望について述べている。

論文調査の要旨

移动通信の急速な普及に伴い、トンネル、地下街、建物内など閉じた空間内における無線電波の伝搬特性を解明することが重要な課題となっている。これらのトンネル状構造物は損失媒質で囲まれた自由空間と見なすことができる。このため、従来は主に、伝搬方向に一樣な構造を仮定して電波の減衰定数を理論的に算出し、その結果を実験的に検証する研究が行われてきた。しかし、地下街等に見られるようにトンネル構造の多くは、一般に伝搬方向に一樣ではなく分岐や折れ曲りなど様々な不連続部を伴っている。このような複雑なトンネル内の電波環境を把握するには、不連続部で発生する反射波や散乱波の影響を考慮に入れて電波伝搬特性を全体的に評価することが必要である。

本論文は、トンネル内の電波伝搬の問題に関してFVTD法(Finite-Volume Time-Domain Method)を基にした数値解析アルゴリズムの開発と応用に関する研究をまとめたものである。FVTD法は電磁波の散乱問題に対して考案された時間領域の数値解法である。これをトンネル等の導波問題に適用する場合、計算機の記憶容量の制約により、3次元構造の解析は非常に困難になる。また、方形トンネルの主要伝搬モードの電磁界は方形導波管の TE_{10} モードに類似していることが知られている。これらのことから、著者は、応用の対象を2次元構造に限定して、折れ曲りや複数の分岐をもつ複雑な2次元トンネル内の伝搬特性を明らかにしている。

著者は、まず、損失媒質を含む導波路問題に対するFVTD法の定式化を考察している。損失媒質中のマックスウェルの方程式を時間領域において離散化するための新しい手続きを提案し、直角座標系における2次元及び3次元のFVTD表現式を与えている。FVTD法は有限の計算領域を設定するので、領域の端部において電磁界に対する吸収境界条件を必要とする。著者は、FDTD法(Finite-Difference Time-Domain Method)で使用されているPML(Perfectly Matched Layer)吸収境界条件を拡張し、損失媒質に対するFVTD法のPML吸収境界条件を導出している。また、FVTD法における解の安定条件を検討し、時間ステップに対する制約がFDTD法に比べて緩和されることを明らかにするとともに、媒質の境界が空間セルの分割に一致しないときに、媒質定数を局所的に平均化して近似する方法を示している。

次に、著者は、提案したFVTD表現式を用いて2次元トンネル内の電波伝搬特性の解析を行い、マイクロ波を

用いた模擬実験の結果と比較している。伝搬方向に不均質なトンネル構造として、L型トンネル、T型分岐、十字型分岐、及び任意の折れ曲り角を持つトンネル、更にこれらの構造を縦続接続したトンネルについて数値解析を行い、その結果がコンクリートブロックで製作したトンネル模型による測定値と良く一致することを示している。標準的なT型及び十字型分岐では、分岐トンネル部へ透過する電波は大きな減衰を受ける。著者は、この問題を解決する方法として、分岐部の壁に小さな突起部を設ける方法、分岐部の中央に柱状物体を設置する方法、及び分岐部の角に隅切りを設ける方法を提案し、このように構造の一部を変形することで透過電波の減衰を大幅に改善できることを定量的に明らかにしている。

著者は、最後に、FVTD法の計算精度を向上させる方法を考察している。複数の媒質からなる複合領域内の電磁界問題に通常のFVTD法を適用すると、異なる媒質の境界において電磁界の差分化を原因とする非物理的な反射波が発生することがある。これは、それぞれの媒質が占める領域において、電波の伝搬速度が異なるために生じる。この問題を解決するために、著者は、FVTD法における空間セルサイズと時間ステップの比を対象領域における電波の伝搬速度に比例して変化させる適応型FVTD法を提案し、T型分岐トンネルの解析に応用してその有効性を確認している。

以上、本論文は、トンネル内の電波伝搬の問題に関してFVTD法を基にした数値解析アルゴリズムを開発し、それを分岐や折れ曲りを持った複雑な2次元トンネル内の電波伝搬特性の解析に応用して有用性を示したもので、情報通信工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は、博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 池崎秀和(香川県)
 学位記番号 シ情博甲第50号(工学)
 学位授与の日付 平成11年3月25日
 学位論文題名 人工脂質膜を用いた味センサの実用化に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 都甲 潔
 (副査) // // 吉田 啓二
 // // // 松永 勝也

論文内容の要旨

味の評価は、現在でもパネラーと呼ばれる人間が実際に味わって行う官能検査に大きく依存しており、パネラーの個人差や体調等による官能データの客観性や再現性に問題があり、味センサの開発が強く望まれていた。そこで、九州大学では生体の細胞膜の有する脂質をトラ

ンスデュース部に採用した味センサが開発された。これは、バイオミメティック(生体模倣)デバイスであり、その結果、5基本味の識別を可能とし、またその応答領域は生体系ときわめて良い一致を示した。本研究は、従来型の味センサを発展させ実用化に向けて、再現性と選択性の向上及び甘味等の非電解質に対する選択性向上を目的として、測定手法と膜の開発を行ったものである。以下に、各章の内容と成果を要約する。

第2章では、食品のロット間の差のような微少な味の差の識別が行えるように、センサの再現性を高めることを目的として、測定方法の開発を行った。味センサ受容膜をあらかじめ被検液に近い組成の溶液にならし、かつ測定基準液もその溶液を用いることで、受容膜の特性変化を少なくする、いわゆるプリコン測定を提案した。加えて測定において周期的過程を取り入れた。以上の2点の改良で、ビールのロット間差といった極めて微妙な味の識別が可能となった。現在、この方法はビール、コーヒー、日本酒、味噌、牛乳といった食品へ適用され大きな成功をおさめている。また味物質の濃度変化の狭い範囲で味覚推定を行い、味センサ出力は人の味覚とよく合うという結果を示した。

第3章では、味の定量化が行えるように、センサの特異性を高め、情報量を増すことを目的として、測定方法の開発を行った。改良点は、以下の通りである。第1は、脂質膜の洗浄を可能としたことで、苦味物質やうま味物質等の脂質膜の吸着の大きい味物質を感度良く安定に測定できるようになった。第2は、被検液を測定する前後での、膜特性の変化を測定することで、膜の吸着物質のみの影響を測れるようになり、これらの吸着物質に対する特異性が向上した。この測定方法を用いて、緑茶、コーヒー、ビール、日本酒においてプリコン測定では情報量が1~2次元であったものが5~6次元に増加し、それら情報を元に官能評価値の重回帰分析を行うと高い相関が得られるようになった。つまり、味センサの持つ情報量が飛躍的に向上し、味の定量化へ向けて大きく前進した。

第4章では、緑茶に関して、第3章で述べた測定方法による味センサ出力と官能評価値及び化学分析値との関係を調べ、緑茶の味の定量化の可能性を探った。主成分分析により5次元の情報があることが分かり、このPC1~PC5を説明変数として官能評価値及び化学分析値に対して2次の重回帰分析を行った。官能評価値では滋味、香り、色と総合評価(前記3項目の平均)及び化学分析値ではテアニンとタンニンの各々に対して高い相関が得られ、数量化の可能性が得られた。しかも、高級茶葉から、本来ウーロン茶や紅茶に用いる茶葉を緑茶に加工したものでまで広範囲での適応可能性が得られた。従って、今回得られた官能評価値を推定する重回帰式は、未学習サン

プルに対して適合性が大きいと思われた。官能評価値との相関が高い理由の1つは、緑茶の評価に重要とされているタンニン(渋味)とテアニン(うま味)に味センサの感度が良い点である。さらに、タンニンとテアニンのみでは官能評価値を十分説明できないところがあり、味センサは、これら以外の緑茶中の重要な味物質にも応答していると思われる。これらの結果から、味認識装置による分析結果と官能評価値を照らし合わせた味の標準軸を作ることにより、主観的な感覚である味覚を客観的に判断することが可能になるとと思われる。

第5章では、非電解物質の選択性向上を目指して、膜の開発を行った。膜中の脂質含有量をパラメータとして各基本味に対する感度比較を行った結果、膜中の電荷密度をある程度下げ、かつプラス電荷とマイナス電荷を中和させるとショ糖に対する応答特異性が上がることが分かった。従来の脂質膜に比べると、電荷密度の低い膜は、全般に約1/10の感度であるが、繰り返し測定誤差の標準偏差は0.02mV程度であり、ショ糖の出力が数mVに対して約2%の誤差率であり、十分に大きな応答とみなせる。また、3種類の甘味物質に対して、センサ応答は官能評価とよく一致しており、甘味センサとしての可能性が高いことが分かった。また電解質の味物質への脂質高分子膜応答とショ糖への応答のメカニズムは異なると思われる。脂質高分子膜のショ糖への応答メカニズムの解明が今後の課題である。

第6章では、本研究の総括を行った。

論文調査の要旨

味の評価は、現在でもパネラーと呼ばれる人間が実際に味わって行う官能検査に大きく依存しており、パネラーの個人差や体調等による官能データの客観性や再現性に問題があり、味センサの開発が強く望まれていた。そこで、九州大学では生体の細胞膜の構成成分である脂質をトランスデュース部に採用した味センサが開発された。これは、バイオミメティック(生体模倣)デバイスであり、その結果、5基本味の識別を可能とし、またその応答領域は生体系と極めて良い一致を示した。

本研究は、従来型の味センサを発展させ実用化に向けて、再現性の向上と味の定量化及び甘味等の非電解質に対する選択性向上を目的として、測定方法と膜の開発を行ったものである。

まず、著者は、微妙な味の違いの識別が行えるように、センサの再現性を高めることを目的とした、測定方法の開発について述べている。味センサ受容膜をあらかじめ被検液に近い組成の溶液にならし、かつ測定基準液もその溶液を用いることで、受容膜の特性変化を少なくする、いわゆるプリコン測定(preconditioning measurement)を提案している。加えて測定において周期的過程

を取り入れた。以上の2点の改良で、ビールのロット(製造日,工場)間差といった極めて微妙な味の識別が可能となることを明らかにしている。現在,この方法はビール,コーヒー,日本酒,味噌,牛乳といった食品へ適用され,大きな成功をおさめている。

次に,味の定量化が行えるように,センサの特異性を高め,情報量を増すことを目的とした,測定方法の提案を行っている。改良点は,以下の通りである。第1は,脂質膜の洗浄を可能としたことで,脂質膜への吸着の大きい味物質を感度良く安定に測定できるようになった。第2は,被検液を測定する前後での,膜特性の変化を測定することで,膜の吸着物質のみの影響を測れるようになり,これらの吸着物質に対する応答特異性が向上することを指摘している。この測定方法(CPA測定:Change of Potential caused by Adsorption)により,味センサの持つ情報量が飛躍的に増加し,味の定量化へ向けて大きく前進することを明らかにしている。

さらに,CPA測定の具体的な応用例として,緑茶に関して,味センサ出力と官能評価値及び化学分析値との関係を調べ,緑茶の味の定量化の可能性について述べている。その結果,味センサ出力は5次元の独立情報を持ち,官能評価値との高い相関が得られることがわかった。これは,緑茶の評価に重要とされているタンニン(渋味)とテアニン(うま味)に味センサの感度が良いという事実に起因するものであることを指摘している。これらの結果は,味センサによる分析結果と人による官能評価値を照らし合わせた味の標準軸を作ることにより,主観的な感覚である味覚を客観的に判断することが可能となることを示している。また,プリコン測定は微妙な味の違いの識別,CPA測定は人の味覚表現の定量化に向けた測定であることを明らかにしている。

最後に,著者は,甘味物質等の非電解質の選択性向上を目指した膜の開発について論じている。膜中の脂質含有量を変え,各基本味に対する感度比較を行った結果,膜中の電荷密度をある程度下げ,かつプラス電荷とマイナス電荷を中和させるとショ糖に対する応答特異性が上がることがわかった。またセンサ応答は官能評価とよく一致しており,甘味センサとしての可能性が高いことを明らかにしている。

以上要するに,本研究は味センサを用いた測定方法について新しい提案を行い,食品のロット間差といった極めて微妙な味の識別を可能にすると同時に,人の味覚表現を定量化し,味センサの実用化に成功し,さらに脂質膜の改良を行い,甘味センサ実現の可能性も示したものであり,電子デバイス工学上寄与するところが大きい。よって,本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 山下 浩 (熊本県)
学位記番号 シ情 博甲第51号(工学)
学位授与の日附 平成11年3月25日
学位論文題名 電子ビーム部分一括露光法の実用化に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 黒木 幸 令
(副査) // // 鶴島 稔 夫
// // 吉田 啓 二

論文内容の要旨

半導体デバイスの微細化の進展を担うリソグラフィ技術は描画パターンの精度を決定するプロセスであり,その重要度は極めて高い。近年,先端デバイスのパターン寸法は光露光技術の限界解像度に近づきつつあり,高解像露光技術の開発が急務となっている。電子ビーム直接描画法は本質的に高い解像性を有しており,DRAMを代表とする最先端デバイスの開発や一部ASICの生産に用いられている。しかし,パターンを一筆描きの要領で描画するため単位時間当たりのウェハ処理能力すなわちスループットが低く,DRAM等の汎用デバイスの生産には不向きであった。現在,デバイスの繰り返しパターンの一部を予め膜厚 $20\mu\text{m}$ 程度のシリコンに開口形成したステンシルマスク(EBマスク)を用いて,大面積パターンを一度に転写する電子ビーム部分一括露光法が提案されている。これにより大幅なスループットの向上が期待され,次世代の露光技術として有望視されている。

電子ビーム部分一括露光法の実用化には高スループットの実現と同時に,益々微細化の進むデバイスパターン形成のために解像度や寸法精度のさらなる向上が必要である。これらの露光性能を制限する一つの要因として,従来考慮されていなかったマスクによる散乱電子が考えられる。その他,クーロン効果や近接効果の影響も大きいことが知られている。これらの効果はパターンが微細化するにつれさらに顕著になると考えられる。従って,これらの効果を詳細かつ総合的に研究し,高度な露光技術を確立することが実用化の鍵となる。

本研究の目的は,解像度や寸法精度に影響を与える種々の要因及び効果について解析を行い,高精度なデバイスパターン形成を実現する電子ビーム部分一括露光法の実用化を最先端デバイスの試作適用を通して図ることである。

本論文は,電子ビーム部分一括露光法の高性能化及びその実用化のために行った,マスクにおける電子散乱,電子光学系におけるクーロン効果,基板による後方散乱電子に起因する近接効果,及び同露光法のギガビットレ

ベルの高精度パターン形成への適用に関する研究をまとめたもので、7章から構成されている。

第1章は序論で、本研究の背景、目的及び本論文の構成について述べた。

第2章では、電子ビーム露光技術の現状を解析し本研究の課題を明確にした。まず、露光性能を制限すると考えられる主要効果について解析・整理し、基本露光性能と主要効果の関係を明らかにした。次に、露光技術の高性能化を図る手法として、高加速電圧化は必須であり、露光性能向上のためにマスク効果、クーロン効果、近接効果に関する研究が必要であることを示した。

第3章では、EBマスクによる電子散乱について論じている。マスク散乱電子の挙動をモンテカルロシミュレーションと実験により解析し、その露光特性に与える影響について考察した。EBマスクの開口形状、膜厚および加速電圧を変化させ電子の挙動を解析した結果、従来入射電子の侵入長以上必要であるとされていたマスクの薄膜化が可能であることを示した。この薄膜化により先端デバイス生産における要求マスク寸法精度を達成できた。また、マスク厚をグリュン飛程で規格化することにより、電子の透過率、吸収率のユニバーサル曲線を得た。規格化マスク厚の違いによりEBマスクを機能の異なる4つの領域に分類することができ、それぞれの領域での光学素子としての機能を明らかにし、マスクの適用法やカラム設計時の留意点に関する知見を得た。

第4章では、クーロン効果について研究を行い、露光性能に与える影響について論じた。電子ビーム部分一括露光法では一度に露光する面積が大きいためビーム電流が大きくなり、電子同士のクーロン反発効果がビーム形状を劣化させ解像度に最も影響を与えることを実験的に明らかにした。また、モンテカルロ法を用いたマスク散乱電子を考慮するクーロン効果シミュレータを開発し、マスク散乱電子がマスク開口部を通過し結像に寄与すべき露光電子と相互作用を起こし、ビーム本来の軌道をそらせビームだれを生じさせていることを明らかにした。

第5章では、高精度パターン形成について論じた。電子ビーム部分一括露光法ではクーロン効果がレジストパターンが設計寸法通りになる最適露光量を変化させるため寸法精度にも影響を及ぼすことを実験的に明らかにし、クーロン効果を考慮した近接効果補正法を開発した。従来の補正法では一括露光面積の大きさすなわちビーム電流によって最適露光量が変化することが考慮されていなかったため十分な寸法精度を得ることができなかった。開発した近接効果補正法は従来用いられている露光強度分布関数にクーロン効果を補正する項を導入することにより露光量を最適化した。また、マスク開口の端部に補助パターンを付加することにより、部分一括露光を接続した部分の寸法精度及び露光量マージンを大幅に改善し、

信頼性の高い電子ビーム部分一括露光を実現した。

第6章では、第3章から第5章で開発した電子ビーム部分一括露光法の要素技術を、4 G-bit DRAMの試作に適用した結果を述べている。0.15 μm 寸法のパターンに対して寸法精度、ショット接続精度とも0.02 μm を達成して本研究で開発した電子ビーム部分一括露光法の有効性の高さを実証した。最後に今後の露光性能の向上の可能性について言及し、次世代高速電子ビーム露光技術としてLarge Field Projection(LFP)のコンセプトを提案した。

第7章では、本研究の成果をまとめ統括を行うとともに、今後の展望について述べた。

論文調査の要旨

リソグラフィは超LSIの形状を決定することから非常に重要な技術である。超LSIの量産にあたっては主に光露光技術が使われているが、短波長化と高開口率化に加えて位相シフトマスクにより解像度の改善が計られるようになってきている。しかし、マスク構造が複雑であることもあり、その製造・検査に要するコストが急激に増大している。このため少量多品種の生産にはマスクを必要としない電子ビーム露光法が一部利用されている。また、光露光の開発技術項目が増えていることから、その開発は遅れ気味で、超LSIのプロトタイプ製作には微細加工性に優れる電子ビーム露光法が用いられている。

従来の光露光に代わる技術として、電子ビーム露光に対しても生産性を向上する技術開発が進められている。本研究に述べられている部分一括露光法はその一つの提案である。部分一括露光法は、露光パターンに合わせた開口部を持つ電子ビーム遮蔽マスクを使用してLSI内に繰り返し使用されるパターン・ブロックをまとめて露光し、繰り返しの少ないパターンは可変矩形方式で露光しようというもので、柔軟性に富んだ高精度露光法である。本研究は実験とシミュレーションにより、この露光マスクの最適化を行って高精度露光を可能にする幾つかの提案を行い、それを4 Gbit DRAM試作に適用してその実用性を確認したものである。

本研究により得られた成果は要約すると以下の通りである。

(1)著者は電子ビーム部分一括露光用マスク遮蔽部における電子散乱の解析をモンテカルロシミュレーションと実験により行っている。この結果、従来電子ビーム侵入長以上が必要であるとされていたマスク遮蔽部の薄膜化が可能であり、50kV加速の場合10 μm 厚のシリコンで良いことを示した。また、この薄膜化により0.15 μm 描画を可能とするマスク寸法精度を達成した。さらに、マスク厚をグリュン飛程により規格化することにより、電子透過率、吸収率及び後方散乱係数のユニバーサル曲線が存

在することを見出し、微細化に適する電子ビーム高エネルギー化への一つの指針を得た。

(2)部分一括露光法においてはビーム電流量が大きくなるため、解像度に電子のクーロン相互作用が影響することを明らかにしている。まず、ビーム電流量を最適化してクーロン相互作用によるビームだれの減少を図り、最先端デバイス試作における要求解像度を達成し、微細パターン形成に成功した。また、マスク開口部を通過した露光ビーム電子にマスク散乱電子が及ぼすクーロン相互作用を考慮したシミュレータを開発し、マスク散乱電子が露光ビーム電子の軌道に影響を及ぼすことを明らかにした。

(3)部分一括露光法に有効な、高精度露光のためのパターンデータ補正法を提案し、実験によりその有効性を確かめている。まず、ブロック内パターン間のクーロン効果を考慮した近接効果補正法を開発し、 $0.15\mu\text{m}$ 級の先端デバイス試作における要求寸法精度を達成した。また、部分一括露光パターン接続部に鋭角の三角形補助パターンを付加する手法を開発して、接続部の寸法精度及び露光量マージンを大幅に改善し、信頼性の高い電子ビーム部分一括露光を実現した。

(4)最後にこれらの研究成果を、 $0.15\mu\text{m}$ ルールの4 Gbit DRAMの試作に適用して、要求精度を満足する高精度パターン形成に成功し、電子ビーム部分一括露光法の実用性を実証した。

以上要するに、本研究は、マスク部での電子散乱現象についてシミュレーションと実験により詳細な検討を行ってマスク構造を最適化するとともに、クーロン相互作用を考慮した近接効果補正法と最適なブロック接続パターン形状を提案して、高精度電子ビーム部分一括露光法の実用化に成功したもので、電子デバイス工学上価値ある業績である。よって本論文は博士(工学)の学位に値するものと認める。

氏名(本籍) 吉澤弘泰(長崎県)
学位記番号 シ情博甲第52号(工学)
学位授与の日付 平成11年3月25日
学位論文題名 クロック生成用PLLの高性能化とダイナミックCMOS回路による構成法に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 松山公秀
(副査) " " 黒木幸令
" " " 二宮保

論文内容の要旨

集積回路において位相同期グループ(PLL)はクロック

信号の生成・分担を担うデバイスとして広く用いられている。また、近年の半導体製造技術、集積回路設計技術の発達に伴い、数百万トランジスタに及ぶ回路集積化によって多数の機能、システムを1チップ上に実現するシステムオンチップ化が注目されるようになってきている。これら大規模に集積化されたチップのクロック信号を供給するPLLに対しては、電源電圧の低減、クロック周波数の増加、低ジッタ化等が要求されている。また、クロックの高速化や駆動するゲート規模の増大に伴い、複数のPLLを用いた新しいクロック分配方式等も検討されており、同方式において重要となるタイミング再生用PLL, その中でも特に重要な構成要素である位相比較回路の高速化、低ジッタ化に対する要求も強まっている。

本論文は、クロック生成・分配用PLL及びタイミング再生用位相比較器に対して、新しい回路構成や設計法を提案することにより、電源電圧の低減と高速化、低ジッタ化、アナログフィルタ専有面積の削減等を実現した結果と、それらを実現する過程において考案したダイナミックCMOS回路の構成方法に関してまとめたものであり、6章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的ならびに本論文の各章の概要について述べた。

第2章では新しい回路構成や設計法を提案してPLLの高速化と電源電圧の低減を図っている。PLLの構成要素の内、電源電圧低減の影響を著しく受ける電圧制御発振器と位相周波数比較器についてそれぞれ、NMOS/PMOS電流源のソース結合を用いたリング発振器、フィードフォワード制御を適用したダイナミックCMOS位相周波数比較器を提案し、SPICEシミュレーションと試作チップによる動作特性評価により、速度特性を劣化させることなく5Vの電源電圧を3V程度に低減できることを確認している。また、提案した2種類のフィードフォワード制御形位相周波数比較器の内の一つが、通常の位相比較器では困難なランダムReturn to Zero信号からのクロック抽出にも適用可能であることを明らかにしている。

第3章では回路規模の増大、クロック速度の高速化、マルチPLLを用いたクロック分配構造等によりますます要求が厳しくなるPLLの低ジッタ化要請に対応するための回路構成法や設計法について論じている。電圧制御発振器におけるジッタの発生要因を分析し、その対策法を検討した結果、オンチップ安定化電源回路とバイパス容量の付加による電源電圧揺らぎ低減法を提案している。また、位相周波数比較器の位相比較特性の劣化によるジッタ抑圧効果の低減について考察し、低ジッタ化を実現するための位相比較器の最適化設計手法に関する知見をまとめている。SPICEシミュレーションにより、提案する回路構成や最適化設計手法を用いることにより、

クロック周期の1.3%という低ジッタ PLL(周波数320 MHz に対し約40psの揺らぎ幅)が実現できることを明らかにしている。

第4章では、マルチ PLL クロック分配システムにおけるモジュール間でのデータ授受で重要となるタイミング再生用位相比較器を取り上げ、その高速化や低ジッタ化を実現する回路を提案しその効果を論じている。具体的には、フリップフロップの伝搬遅延やセットアップ時間等による位相比較特性の劣化を補正する方法及び、ジッタの発生を抑制する新しい位相比較方式及び同方式を実現するための具体的回路の提案を行い、400MHz 以上の高速動作とクロック周期の約1.6%の低ジッタ特性を SPICE シミュレーションにより実現している。また同章では、PLL のマクロセル化を行う上で重要なアナログフィルタに関して論じている。ここではフィルタ抵抗とキャパシタに流れるチャージポンプ電流の比により等価的にキャパシタンスを変化させるフィルタ回路を提案して、大容量のキャパシタを用いた場合と等価なフィルタ効果をバッファと数 pF の固定小容量キャパシタを用いて実現させ、大幅なチップ面積削減を達成している。また、PLL の特性パラメータの設定や有効動作範囲に係わる電圧制御発振器の周波数特性の向上についても考察を行い、発振周波数が制御電圧に応答しない領域を除去できる NMOS/PMOS の相補性を利用したバイアス回路を提案し、その有効性を確認している。

第5章では大規模デジタル回路の消費電力やゲート数の低減に有効なダイナミック CMOS 回路について、PLL、中でも位相周波数比較器を設計する過程で考案した回路構成方法をまとめ、その有効性を論じている。回路の構成単位であるダイナミック CMOS ゲートについて、出力容量(次段のゲート容量や配線容量等)の充電電圧を状態変数として利用する論理式とその論理式を用いたゲートの構成拡張方法を提案した。また、ダイナミック CMOS ゲートを構成単位として系統的に回路を構成する方法やダイナミック回路の有効利用法、活用上の留意点とその対策等を提案し、その有効性を SPICE シミュレーションと試作チップでの評価実験により実証した。

第6章では、本研究の総括をまとめるとともに、今後の課題について述べた。

論文調査の要旨

半導体製造技術、回路設計技術の発達により数百万個に及ぶトランジスタを高密度に集積することが可能となり、多数の機能、システムを1チップ上に実現するシステムオンチップ化の検討が進められている。このような大規模集積回路におけるクロック信号の生成・分配を担う位相同期ループ(PLL)についてはこれまでも多く

の研究が行われてきたが、近年における素子の超高集積化と回路規模の増大に際し、電源電圧の低減、クロックの高速化、信号位相揺らぎ(ジッタ)の低減等が新たな技術的課題となっている。システムオンチップにおける各機能要素を所定の時系列に従い高速で動作させるためには、複数の PLL をチップ上に配し各回路ブロックへのクロック分配を行うマルチ PLL 方式が有効である。しかしながら、その主要な構成要素であるタイミング再生用位相比較器については、動作の高速化に伴う特性の劣化等の問題があり、回路構成、回路設計指針に関する研究の進展が期待されている。このようなオンチップ PLL の構成回路としては、所要トランジスタ数が少なく高速化に適したダイナミック CMOS 回路が有望であるが、まだその具体的な構成法が明確にされていない。

本研究では、クロック生成用 PLL 及びタイミング再生用位相比較器に係わる上記の課題に対して、新しい回路方式とそのダイナミック CMOS 回路による構成法を提案し、その有効性を検証したものであり、以下の点で評価できる。

第一に、PLL を構成する電圧制御発振器(VCO)と位相周波数比較器(PFD)に対して、NMOS/PMOS 電流源のソース結合回路、フィードフォワード制御ダイナミック CMOS 回路等の新しい回路方式を提案し、計算機シミュレーションにより設計の最適化を図った試作チップにおいて、高速動作性能を損なうことなく電源電圧の大幅な低減が可能であることを実証している。また、フィードフォワード制御を適用した位相周波数比較器の信号リセット回路を工夫することにより、通常の位相比較器では困難なランダム性の強い信号からのクロック抽出に成功し、本方式がタイミング再生用途にも有効であることを明らかにしている。

第二に、PLL におけるジッタの発生要因を詳細に分析し、その対策法を考案し効果を検証している。すなわち、VCO に関してはオンチップ安定化電源回路とバイパス容量を併用することにより、広い周波数領域に亘り電源電圧揺らぎに起因するジッタを抑制している。また、PFD については微小位相誤差に対するデッドゾーン幅やパルスオーバーラップ量を適正化することにより、ジッタを大幅に低減できることを示している。

第三に、タイミング再生用位相比較器の信号伝播遅延に起因する高速動作特性の劣化を回避するための新しい回路方式と、これを実現するための具体的回路の提案を行い、400MHz 以上の高速動作下においても位相ゆらぎ幅を40ps 以下に抑制できることを計算機シミュレーションにより確認している。また、ライブラリ化に適したアナログフィルタ回路として、フィルタ抵抗とフィルタ容量を流れるチャージポンプ電流比を変えることにより等価的にキャパシタンスを変化させるコンパクトなオ

ンチップフィルタ回路を考案し、大幅なチップ面積の削減に寄与している。さらに、NMOS/PMOS回路における動作特性の相補性を利用した新しい電流バイアス回路を提案しVCOの周波数特性を改善している。

第四に、ダイナミックCMOS回路によるPLLの構成方法に関して、出力容量の充電電圧を状態変数として用いる独自の論理表現を体系化し、これに基づくゲートの構成拡張手法を提案している。さらに、本手法を用いてラッチ回路、フリップフロップ回路等の汎用論理回路を設計・試作し、計算機シミュレーションと動作実験によりその有効性を確認している。

以上、要するに本研究は、大規模集積回路におけるクロック生成用オンチップPLL及びタイミング再生用位相比較器に対し、新しい回路方式とそのダイナミックCMOS回路による構成法を提案し、電源電圧の低減、クロックの高速化、ジッタの低減等の効果を計算機シミュレーションと試作チップによる動作実験により検証したものであり、電子デバイス工学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 葛目 幸一 (高知県)
 学位記番号 シ情 博甲第53号(理学)
 学位授与の日付 平成11年3月25日
 学位論文題名 Design Theory of Wavelets with Free Parameters(自由パラメータを含むウェーブレットの設計理論)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 新島 耕一
 (副査) // // 松尾 文碩
 // // // 有川 節夫

論文内容の要旨

ウェーブレット変換は音声、生体信号、画像処理等さまざまな応用に優れた特徴をもっている。ウェーブレット変換を用いた信号処理に関する研究は、すでに多くの研究が行われており、処理能力は用いるウェーブレット関数に大きく依存することが知られている。これまでウェーブレット関数の性能は、線形位相特性、分解・合成フィルタの減衰特性、Vanishing momentの数、フィルタ長等のパラメータを用いて評価されてきたが、それぞれの信号処理に最適なウェーブレット関数の設計法は未だ確立されていない。これは、ウェーブレット関数の構成条件に厳しい制約が課せられ、設計の自由度が著しく制限されていることに起因している。

本論文は、自由パラメータを有する新しい双直交

ウェーブレットフィルタの設計法ならびにそれらを初期フィルタとするリフティングウェーブレットフィルタの構成法について論じる。前者の研究では、Daubechiesが考案した正規直交ウェーブレットの構成理論に自由パラメータを導入して、直交条件を緩和することによりウェーブレットフィルタの設計の自由度を大きく改善し、さまざまなウェーブレットフィルタを構築することを可能にした。後者の研究では、先に設計したウェーブレットフィルタをもとに、短いサポート長をもつリフティングウェーブレットフィルタの設計理論を確立した。設計したフィルタは、信号に適応してフィルタ係数が変化する信号適応型時変フィルタである。応用では、開発した設計理論をもとに心電図信号のデータ圧縮やノイズ除去に適したフィルタを設計し、データ処理性能が著しく改善されることを示した。本論文は以下の6章より構成される。

第1章では、研究の目的、背景、および本論文の構成について述べた。

第2章では、合成積型の直交条件を有するウェーブレット関数の構成法に関する一般理論について述べた。ここでは、ウェーブレットフィルタの設計の自由度を大きくするために、スケーリング係数と自由パラメータの合成積を用いて双対スケーリング関数を定義し、Daubechiesが考案したウェーブレット関数の直交条件を拡張する。次にMallatの多重解像度解析の概念を用いて分析・復元公式を導出し、デジタルフィルタを用いたマルチレート信号処理によりウェーブレット分解・復元が可能であることを示した。また自由パラメータを含むデジタルフィルタの構成法を定式化した。

第3章では、第2章の理論をもとに、自由パラメータが3個でスケーリング係数が5個の場合にはウェーブレットフィルタが解析的に設計可能であることを示し、Daubechiesのウェーブレットを含むさまざまなウェーブレットフィルタを設計した。そして、4つの線形位相特性を有するウェーブレットフィルタを見出し、その一つをノイズや疾患を含む心電図信号に適用して原信号の完全復元性とフィルタ長との関係を実験的に調べた。

第4章では、リフティングスキームを用いた信号適応型ウェーブレットフィルタの設計法について論じた。リフティングスキームは、双直交ウェーブレットフィルタをもとにして、制御可能な設計パラメータを含む新しい双直交ウェーブレットフィルタを構築する手法である。リフティングスキームを用いると、信号に適応してフィルタ係数が変わる信号適応型リフティングウェーブレットフィルタを設計することができる。この論文では、ウェーブレットフィルタの構成条件と信号に適応してウェーブレット変換係数をゼロにする制約条件のもとで、あるコスト関数を最小にすることにより自由パラメータ

を決める手法を提案した。この最小化問題は、Lagrangeの未定乗数法によって導き出される連立一次方程式を解くことに帰着され、さらに、先に設計した合成積型ウェーブレットフィルタを初期フィルタに選べば、この方程式の解は2つの成分以外はすべて0であり、残りの2つの成分も陽的に計算でき、リアルタイムで信号適応型リフティングウェーブレットフィルタが設計できることを示した。

第5章では、このような信号適応型フィルタを心電図信号に応用して、Holter心電計で記録された膨大な心電図データを著しく圧縮できることを示し、また、診断の妨げになる筋電ノイズも除去できることを示した。

第6章では、本研究を総括し、今後の研究課題を示した。

論文調査の要旨

ウェーブレット変換は音声、生体信号、画像処理等さまざまな応用に優れた特徴をもっている。ウェーブレット変換を用いた信号処理に関する研究はこれまで数多くなされておられ、信号処理の能力は用いるウェーブレット関数に大きく依存することが知られている。これまでウェーブレット関数の性能は、線形位相特性、分解・復元フィルタの減衰特性、Vanishing momentの数、フィルタ長等のパラメータを用いて評価されてきたが、それぞれの信号処理に最適なウェーブレット関数の設計法は未だ確立されていない。これは、ウェーブレット関数の構成条件に厳しい制約が課せられ、設計の自由度が著しく制限されていることに起因している。

本論文は、自由パラメータを含む新しい双直交ウェーブレット関数の設計法ならびに、この関数から導かれる双直交ウェーブレットフィルタを初期フィルタとする信号適応型リフティングウェーブレットフィルタの構成法について論じている。前者では、Daubechiesが考案した正規直交ウェーブレット関数の構成理論に自由パラメータを導入して直交条件を緩和することにより、ウェーブレット関数の設計の自由度を大きく改善し、さまざまな双直交ウェーブレット関数の構築を可能にしている。後者の研究では、このような関数から導かれる双直交ウェーブレットフィルタをもとに、短いサポート長をもち、信号に適応してフィルタ係数が変化するリフティングウェーブレットフィルタの設計理論を確立している。応用では、開発した設計理論をもとに心電図信号のデータ圧縮やノイズ除去に適したフィルタを設計し、データ処理性能が著しく改善されることを示している。

著者はまず、研究の目的、背景について述べ、現在までに報告されている関連研究を分析し、ウェーブレット関数を設計する際の問題点を指摘している。この問題点を踏まえて、ウェーブレット関数の設計の自由度を大き

くするために、スケーリング関数が満たすツースケーリング関係の係数と自由パラメータとの合成積を用いて双対スケーリング関数を定義し、スケーリング関数との間に合成積型という新しい双直交条件を導入することにより双直交ウェーブレット関数を構成している。また、このような関数をもとに、Mallatの多重解像度解析を用いて、与えられた信号を低周波成分と高周波成分に分解する分解公式ならびに、低周波成分と高周波成分からもとの信号を復元する復元公式を導き、デジタルフィルタを用いたマルチレート信号処理によりウェーブレット分解・復元が可能であることを示している。さらに先に導出した設計理論を用いて、自由パラメータが3個でスケーリング係数が5個の場合には、解析的に双直交ウェーブレット関数を構成できることを示している。そして、4つの線形位相特性を有する双直交ウェーブレット関数を見出し、その一つから導かれる双直交ウェーブレットフィルタを、疾患を含む心電図信号に適用して原信号の完全復元性とフィルタ長との関係を実験的に調べている。

著者は、信号適応型リフティングウェーブレットフィルタの設計法についても論じている。実際には、ウェーブレットフィルタの構成条件と、信号に適応してすべてのウェーブレット変換係数を0にする制約条件のもとで、あるコスト関数を最小にすることにより自由パラメータを決める手法を提案している。この最小化問題は、Lagrangeの未定乗数法によって導き出される連立一次方程式を解くことに帰着され、先に構成した双直交ウェーブレット関数から導かれる双直交ウェーブレットフィルタを初期フィルタに用いれば、この方程式の解は2つの成分以外はすべて0であり、残りの2つの成分も陽的に計算でき、実時間で信号適応型リフティングウェーブレットフィルタを設計できることを示している。応用では、このフィルタを用いれば、Holter心電計で常時記録される膨大な心電図データを著しく圧縮できることを示し、これまで困難であったピーク性ノイズの除去も可能であることを示している。

以上のように、本研究は、自由パラメータを含む新しい双直交ウェーブレット関数の設計法を確立し、また、その関数から導かれる双直交ウェーブレットフィルタを初期フィルタとする信号適応型リフティングウェーブレットフィルタの設計法について論じており、さらに、応用では膨大な心電図信号にこのようなフィルタを適用して、高いデータ圧縮率が実現できることを示し、診断の妨げになるピーク性ノイズの除去も可能であることを示したものであり、情報理学上価値ある業績である。よって本論文は博士(理学)の学位論文に値するものと認める。



氏名(本籍) 南 俊 朗 (鹿児島県)
学位記番号 シ情 博甲第54号(理学)
学位授与の日附 平成11年3月25日
学位論文題名 General-Purpose Reasoning
Assistant System(汎用論証支援
システム)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 有 川 節 夫
(副 査) // // 松 尾 文 碩
// // 廣 川 佐 千 男

論文内容の要旨

近年、論理学および論理的手法は、従来からの哲学や数学に限らず計算機科学や人工知能をはじめ様々な分野において科学的理論構築や形式的問題解決に広く用いられるようになった。このような状況を受けて、論理系に対する証明構築を計算機によって支援する様々なシステムが研究・開発されてきた。しかし、その多くは取り扱う論理系を固定し、それに特化した支援を行っているため柔軟性に乏しく、既存の形式的体系を統一的に取り扱うことや新たな形式的体系の開発に用いることは著しく困難であった。

本論文の目的は、多種多様な形式的体系を統一的に取り扱う汎用性を備え、しかも形式的体系そのものを新たに開発するための支援システムとしても有用な論証支援システムを実現することである。本システムの構築にあたり、形式的手法による問題解決支援なる概念を明らかにするために、まず論証過程のモデル化を行い、つぎにそれに基づいて論証過程に対する支援システムの構成法を与えた。さらに、実装および実験を通じてその有用性を示した。

本システム実現のために2つの課題を解決した。第1の課題は、十分な表現力を備え、しかも利用者にとって自然な記述が可能な形式的体系記述法の実現である。形式的体系は言語系と導出系により構成した。利用者に応じた表現を用いて、問題領域における対象や概念を取り扱うことを可能とするために、言語系は新記号定義および論理式等の文字列表現を定める構文定義により与えた。導出系は自然演繹法に準じた記法に基づき、公理、推論規則、書き換え規則を任意に組み合わせることで与えた。本記述法によると、論理学における典型的な定式化スタイルである Hilbert 型, Sequent 型, 自然演繹法のいずれの記述法も可能であり、また古典論理, 直観論理等の良く知られた論理的体系のみならず、組み合わせ論理, 等式論理等の広範囲な体系の定式化が可能である。これらの方式により、十分に記述力を備え、しかも平易かつ自然な記述をも可能とする形式的体系記述法を実現した。

第2の課題は、柔軟性に富む証明支援環境の構築であ

る。新たな問題領域に対する形式的体系の構築支援機能は、既存の形式的体系に対する証明支援機能とともに、汎用論証支援システムにとり極めて重要である。利用者は論証を通じて自らの体系への理解を深め、それに基づき改善を加えることにより、その目的に合った形式的体系を完成させる。この過程への支援を行うためには、利用者が証明の状況を容易に、かつ的確に理解することができ、同時に利用者の思考の流れに適合できる柔軟な証明構築支援環境の構築が重要である。証明断片の木構造表示、仮定の使用、導出方向の自由な選択、および証明断片の結合操作等の機能により、仮定や公理等の小さな証明断片から始め、証明断片への導出規則適用や証明断片の結合によって、より大きな証明断片を試行錯誤的に作り上げていく論証スタイルにおける利用者の自然な発想法に適合できる十分な柔軟性を備えた証明支援環境を構築した。

本論文は10章からなる。

第1章では、研究の目的、背景、論文の構成について述べた。

第2章では、証明支援システムにおける支援形態の比較により汎用論証支援システム概念の特徴を明らかにした。

第3章では、まず人間の論証過程を、対象領域の観察、定式化、および妥当性の検証の3段階により構成されるものとしてモデル化した。定式化および妥当性検証段階への支援を行うことは、汎用論証支援システムの大きな役割である。つぎに、本モデルに基づき、汎用論証支援システムの基本的構成法を与えた。本構成法に従うことにより、異なるプラットフォームにおいて実装されたシステム上で共通の操作性を実現することができる。

第4章では、本システムにとって重要な役割を果たす言語系に関して、理解が容易であり、しかも負担の少ない記述法として、確定節文法に構成子宣言を追加した DCGo 記法を確立し、その記述法および処理手続きを示した。

第5章では、対象領域の論理的構造を規定するための導出系記述法を与えた。本記法においては、導出系は、自然演繹法スタイルに基づく、公理、推論規則、書き換え規則の組み合わせにより与えられ、木構造表示される。本記法の採用により、仮定の使用ならびに形式的体系の様々な記述法への対応が可能となった。

第6章では、人間の行う多様な論証スタイルに適合可能な証明支援機能を構築した。人間の自然な発想を支援するために、仮定の利用、導出規則の適用方向の自由な設定、証明の合成等の極めて柔軟な証明編集機能を実現した。

第7章では、一階述語論理、高階論理、様相論理、内包論理、組み合わせ論理等の様々な構造体系への適用実

験を通じて、本論文の方式が極めて多様な形式的体系の記述および論証に有効であることを確認した。

第8章では、論証支援システムの有用な適用例として、ネットワーク環境における形式的知識の獲得、流通、共有をエージェント機構との協調により実現する方式を提案した。

第9章では、他の類似システムとの比較を通じて本システムの独自性を示した。

第10章では、本論文の総括ならびに重要性の高い今後の展開に関する見通しを述べた。

論文調査の要旨

数理論理学は、主として数学の基礎付けと哲学の観点から研究され発展してきた学問分野であるが、その基本である言語や公理は、情報や知識、計算機プログラム等を表現する言語として、また推論の規則は、そうした表現の人間または計算機による処理系として、情報科学の様々な領域で広く活用されている。このように論理的な手法は、情報科学の基礎分野として定着している。そのため、これまでに様々な論理系や推論の計算機による自動化等に関する情報科学的な深い研究が展開され、特に、定理の自動証明に関する重要な成果が得られ、各種のブルーバや証明支援システムの研究開発が盛んに行われている。しかし、その多くは論理系を固定し、それに特化されたものであり、異なった論理系や新しい論理系に関しては、効力を発揮しにくい状況にあった。

本論文は、この問題に正面から取り組み、様々な論理系を統一的に扱え、しかも論理系そのものの新規開発にも使える汎用性の高い論証支援システムの研究開発を指向したものである。具体的には、以下のような研究成果を得ている。

(1)まず、人間による論証過程は、対象領域の観察、定式化、その妥当性の検証という3つの段階で構成されるものとしてモデル化を行い、形式的手法による問題解決支援という概念を導入し、それに基づいた論証支援システムの基本的な構成法を示している。

(2)具体的な論証支援システムを実現するためには、十分な記述力を持ち、しかも平易で自然な記述を可能にする形式的体系記述法を提供する必要があるが、これを言語系と導出系により構成している。言語系としては、新しい記号の定義や論理式等の文字列表現を可能にする構文定義法を、確定節文法に構成子宣言を追加した形で与え、その処理手続きを実現している。これにより、ユーザは自分の好みに応じた形で問題領域における対象や概念を取り扱うことができるようにしている。また、導出系としては、自然演繹法に似た記法に基づいて、公理や推論規則、書き換え規則等を任意に組み合わせることのできる方法を考案し、これにより、論理学における代表的

な型であるヒルベルト型やシークエント型、自然演繹型の記述法を一様に可能にし、さらに古典論理や直観論理等を始めとして、組合せ論理や等式論理等に至るまで、広範な論理体系の定式化を可能にしている。

(3)汎用性のある論証支援システムの構築に際しては、快適な証明支援環境が不可欠であり、こうした環境としては、与えられた形式体系における証明支援機能に加えて新しい形式的体系の構築支援機能を具備していることが要請される。この機能により、ユーザは構築しようとしている体系の理解を深め、改善を行いながら最終的な形式的体系を完成させることができる。本論文では、証明の断片を木構造により表示し、仮定の使用や導出方向の自由な選択、証明断片の結合を可能にする証明編集機能を実現し、仮定や公理等の小さな証明断片から始めて、より大きな証明断片を試行錯誤的に作り上げていくという論証スタイルを支援する柔軟性の高い証明支援環境を構築している。

(4)研究開発した論証支援システムを1階述語論理や高階論理、様相論理、内包論理、組合せ論理等の様々な論理体系へ適用し、実験を通じてその有効性を確認している。また、この論証支援システムの有用な適用例として、ネットワーク環境における知識の獲得や流通、共有等をエージェント機構との協調により実現する方式も提案している。なお、システムは、異なる2つのプラットフォームで実装され、可搬性の保証された完成度の高いものとして実現されている。

以上要するに、本研究は論証過程のモデル化を行い、形式的手法による問題解決支援という概念を明確にし、それに基づく論証支援システムの構築法を与え、システム実装と多くの論理系を対象にした実験を行い、システムの有効性を示し、表現力が強く自然な記述が可能な論理系の記述法を提案し、柔軟性の高い論証支援環境の構築に成功したもので、情報理学上寄与するところが大きい。よって本論文は、博士(理学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 大月 美佳 (福岡県)
 学位記番号 シ情 博甲第55号(工学)
 学位授与の日付 平成11年3月25日
 学位論文題名 Management of Object-Oriented Software Components in Distributed Environments(分散環境におけるオブジェクト指向ソフトウェア部品管理に関する研究)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 牧之内 顕 文
 (副 査) " " 長谷川 隆 三

(副査) 九州大学 教授 荒木 啓二郎
〃 長崎大学 〃 吉田 紀彦

論文内容の要旨

近年のネットワークの普及およびオブジェクト指向パラダイムの普及に伴い、分散環境でのソフトウェアの分散協同開発が可能になってきている。すなわち、ネットワークに分散した開発者がオブジェクト指向パラダイムによって作成された部品を共有・再利用しながら応用プログラムの開発を行うことが可能になってきている。しかし、このような分散環境でのオブジェクト指向ソフトウェア部品の共有と再利用は期待されたほどには行われていない。これは、オブジェクト指向ソフトウェア部品の構造や振舞いが複雑で部品の性質を理解しにくいことと、分散環境での部品取得を支援する機構が確立されていないためである。部品としては、ソースコード、仕様書、クラス、デザインパターンなど多様なものが存在する。これらの部品を統一的な形態で、かつ物理的な位置を意識させることなく、すなわち分散透過に利用できることが必要である。また、開発の過程で生成・参照・変更されることにより部品間に生じるさまざまな関連を相互参照の形で保存して、部品自身や応用プログラムの理解を支援する必要がある。

本研究ではオブジェクト指向ソフトウェア部品を分散環境において統一的な形態かつ分散透過に取得でき、部品間の関連をたどれるような部品管理機構を提供することを目指した。そのためにまずオブジェクト指向ソフトウェア部品の基本構成要素となるクラスを対象として、分散部品管理機構を提案、プロトタイプを構築した。この機構をわれわれは分散部品リポジトリと呼んでいる。さらに、部品の理解支援においてデザインパターンのような設計のための知識と関連づけることが有効であることから、デザインパターンを部品としてこの分散部品リポジトリに組み込むことを目指した。しかし、デザインパターンを部品として扱うための枠組みはまだ確立されてはいない。このため、本研究ではまず部品としてデザインパターンを扱う枠組みを提案・実現することを考えた。そして、部品化されたデザインパターンからソースコードの生成支援を行うことにより、設計支援を可能にするとともに、クラス部品の生成と関連づけの自動化を目指した。

第2章は基盤となる分散部品リポジトリについて論じている。従来の部品管理においては、ソースコードに管理の重点があり部品の多様性やその間の関連を重視したものは少ない。また、部品の関連を実現したのもでもオブジェクト指向の抽象的な部品や分散環境での利用を考えてはいない。そこで我々は、まず多様な部品の分散環境における相互参照を実現するために、分散ハイパーテ

キストであるWWW(World Wide Web)の機構を利用した。そして、ノードを分散透過的に管理するために、部品識別子-部品位置変換を行う名前管理サーバのプロトタイプを構築し、分散透過な部品相互参照を実現した。この名前管理サーバとWWWの連携による部品格納管理システムが分散部品リポジトリである。

第3章は、この分散リポジトリで取り扱うもっとも基本的な部品としてクラスを組み込む手法について扱っている。従来の部品管理でのクラスはソースコードと等価であるが、本研究ではインターフェースを抽出した抽象的な単位でのクラスを取り扱う。インターフェースについても、公開インターフェースノードと非公開実装ノードを用意することで、公開と非公開の区別を可能にした。さらに、従来資源の本機構への登録を簡便にするため、ソースコード情報を自動抽出する機構を用意した。そして、実際のプログラミングライブラリーの一部に適用して、情報抽出と分散部品リポジトリの機能を確認した。

第4章は、デザインパターンを部品化する枠組みの提案である。デザインパターンとは、様々な応用プログラムによく現れるが、個々の問題とは独立であるような典型的なプログラムパターンを記述したものである。デザインパターンは、再利用しやすい構造の設計を行う指針となるだけでなく、デザインパターンに基づいて設計された構造に対する説明として用いることができれば再利用を促進することが可能である。しかし、現状においてはデザインパターンは主に文書として取り扱われており、カタログ化して計算機で管理するための統一された枠組みはまだない。そこで本研究では上記リポジトリに統合した形でカタログ化することを考え、デザインパターンを構成する文章・図・疑似コードを統合的に扱うためのSGML(Standard Generalized Markup Language)に基づく構造記述言語を提案・作成した。この言語をPIML(Pattern Information Markup Language)と呼んでいる。このPIMLでデザインパターンを一括して記述することにより、意味の一貫性管理やソースコードとの対応付けなどの支援が容易になる。本章では、さらにこのPIMLで記述されたパターンをHTML文書として表示するための機構を提案し、プロトタイプの試作を行った。これにより、デザインパターンの閲覧を容易にするとともに、分散部品リポジトリとの連携の基盤を提供している。本プロトタイプは、実際のデザインパターンの登録・閲覧に適用して、その効果を確認した。

第5章は、PIML文書からのソースコード生成支援機構の構築について述べている。従来の研究としては、マクロによりソースコードを展開するものやテンプレートのオブジェクトを複製するものなどがあるが、本研究では、デザインパターンの束縛条件もPIMLの記述に組み込むことにより、生成されるソースコードが束縛条件を

満たすことを保証する。構造と擬似コードとして記述された情報が自動的に補われるので、デザインパターン利用者の作業の軽減が図られる。閲覧機構に加えて、ソースコード生成支援機構を用意することにより、デザインパターンによる設計を支援している。実際にいくつかのパターンからのソースコードの生成を行い、その効果を確認している。

この分散部品リポジトリは従来のリポジトリと置き換わるものではなく、むしろ協調することにより分散環境での部品共有を支援することができる。ただし、そのためには従来のリポジトリとの部品の共有機構について考える必要がある。また、現在はクラス部品だけを取り扱っている所以他の部品を扱えるようにする必要がある。

デザインパターンの分散部品リポジトリへの統合とクラス部品との関連づけは今後の課題である。クラス部品との関連づけの支援については、現在はデザインパターンからの生成によるものを考えているが、クラス群からの関連づけを支援するリバースエンジニアリングについても考える必要がある。

分散環境でのオブジェクト指向部品の共有を支援するためには、クラスやデザインパターンに加えてその他のオブジェクト指向ソフトウェア部品や、さらに従来のソフトウェア部品との連携も図っていく必要がある。分散部品リポジトリを実用的に運用するためのキャッシュ機能やバージョン管理などの機能の充実も将来の課題である。

論文調査の要旨

ソフトウェア開発に於ける生産性向上の手段の1つとして、ソフトウェアの部品化とその再利用が期待されている。その実現のため、ソフトウェア部品の管理機構であるソフトウェア部品リポジトリ構築の試みがなされてきた。しかし、ソフトウェアのどの部分をソフトウェア部品とするのかの一般的な指針がなく、部品化そのものが困難であることから、部品再利用によるソフトウェア開発は一般に普及していない。近年、オブジェクト指向ソフトウェアに於けるクラス、およびそれを抽象化したデザインパターン概念がソフトウェアの部品化とその再利用への道を開いた。一方、ネットワークの著しい発展により、地理的に分散した複数のチームがソフトウェアを共同開発できる環境が整ってきた。本研究はそのような状況を踏まえて、オブジェクト指向ソフトウェア部品を分散環境で共有し再利用するために必要な分散部品管理機構とデザインパターンの部品化法を提案するとともに、そのプロトタイプを実装したものである。

著者はまず、分散部品管理機構である分散部品リポジトリを提案している。部品リポジトリに格納されるソフ

トウェア部品としては、ソースコード、クラス、デザインパターン、さらには仕様書など多様なものが考えられる。又、分散開発環境では、これら部品は地理的に分散したりポジトリに格納される。このように多様でかつ分散している部品を相互に関連づけながら管理するのは、従来の集中型リポジトリの単なる延長では難しい。そこで、本研究では、分散ハイパーテキストを利用した新しい分散部品管理機構を提案している。具体的には、分散ハイパーテキストであるWWWに部品の識別子と位置との関連を管理するサーバプログラムを補うことにより、分散部品リポジトリを実現した。多様な部品の相互関係は、部品を分散ハイパーテキストのノードである文書とし、それらの間をリンクで結ぶことにより可能とした。さらに、ノードの位置情報を隠蔽することにより、分散透過性を実現している。これによりユーザは、部品をその在り場所を意識せず取り扱えるようになった。

次に著者は、オブジェクト指向ソフトウェア部品の基本要素であるクラス部品をリポジトリへ格納する新しい機構を提案している。従来ではクラス定義をテキストとして格納しているが、本研究では、インターフェーステキストと分離し、各々を互に関連づけられたノードとして格納している。インターフェースについても、公開ノードと非公開ノードを用意することにより、公開と非公開の区別を可能にしている。又、ソースコードからクラス部品を自動抽出生成する機構を用意し、既開発のプログラムからのクラス部品収集を容易にしている。

さらに著者は、デザインパターンの部品化について考察し、構造化文書による記述を提案している。デザインパターンは、再利用可能なプログラム構造の設計指針や構造に対する説明として用いることにより再利用を促進することが可能である。しかし、現状においてはデザインパターンは主に印刷された文書として流通しているのみで、カタログ化して計算機で管理するための統一された枠組みはまだない。そこで本研究では、上記リポジトリに統合した形でカタログ化することを目的にして、デザインパターンを構成する文章・図・疑似コードを統一的に扱うためにSGML(Standard Generalized Markup Language)に基づく構造記述言語PIML(Patten Information Markup Language)を提案した。さらに、このPIMLで記述されたパターンをHTML文書として閲覧するための機構を考案し、プロトタイプの試作を行っている。本プロトタイプは、実際のデザインパターンの登録・閲覧に適用して、その効果を確認している。又、構造化文書として記述されたデザインパターンから、ソースコードを半自動的に生成するプログラムを実装している。PIMLはデザインパターンから生成されるクラス群が満たすべき条件も記述できる。この記述が可能となったことで、コード生成の自動化率が向上した。

以上要約するに、本研究は、ソフトウェアの分散開発環境におけるオブジェクト指向ソフトウェア部品の再利用のために必要な分散部品リポジトリを提案するとともに、デザインパターンの部品化のための構造化文書による記述法を提案し、さらにそれらを計算機上に実装してその有効性を明らかにしたもので、ソフトウェア工学上価値ある業績と言える。以上のことから、本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 慎 重 弼 (韓国)
 学位記番号 シ情 博甲第56号(工学)
 学位授与の日付 平成11年3月25日
 学位論文題名 オンライン文字認識のための画対応決定法に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 迫 江 博 昭
 (副査) // // 日 高 達
 // // 谷 口 倫 一 郎

論文内容の要旨

手書き漢字のオンライン認識には、長い研究の歴史にもかかわらず、まだ未解決の問題が残されている。特に、筆順変動や続け書きに対してロバストな認識アルゴリズムの実現が求められている。一方、近年のプロセッサやメモリの発達にともなって、従来実現不可能と考えられていた、複雑なアルゴリズムを検討する余地が生じた。本研究はこのような背景の下に、漢字認識の高度化を追求し、筆順自由・画数自由型の新しい高精度認識アルゴリズムを検討したものである。筆順自由・画数自由認識アルゴリズムの研究が、この10年間ほとんど停滞し、リソースの発展にそぐわなくなっていると見たのがこの研究の発端である。

オンライン文字認識において、筆順自由性・画数自由性を目指す場合、入力パターンと標準パターンとの間の画対応を最適に定めるという方法が有力なアプローチとなる。これは、「画間距離(画の形状・位置に関する評価値)の総和を最小にする画対応」を求める組み合わせ最適化問題として定式化される。画数固定の条件での筆順自由化は「1対1」画対応決定問題であり、画数自由に拡張したものは「1対多」画対応決定問題となる。漢字のような多画文字の場合、これらの問題の厳密解を得ることは、計算量が膨大になるため、非現実的であると考えられていた。本論文では、画対応決定問題の厳密解を得ることができる新たな手法を提案し、あわせてその実装面を検討した。

本論文は6章より構成される。

第1章では、漢字認識研究の現状と背景、本研究の位

置づけ、その概要について述べた。

第2章では、本研究の出発点として、基礎的な準備と画対応問題の定義をした。まず、オンライン文字認識の原理について説明した。続いて、オンライン文字認識において、筆順自由・画数自由を実現するために生じる画対応決定問題について説明し、これに関する過去の研究について述べた。それらの研究においては、画対応決定問題の厳密解を得ることは不可能であると考え、近似解を求める種々の工夫を試みているが、それぞれ特性上、実用上の問題があることを指摘した。

第3章では、筆順自由性を実現するため、「1対1」画対応が保証される対応づけアルゴリズムを検討した。この問題は従来、画数の階乗オーダの問題と考えられていたが、この探索問題のツリー表現から冗長性を除去することによってキューブ状の探索グラフを導出し、これによって指数オーダの探索問題に還元できることを示した。このグラフ上での探索問題を動的計画法(DP)によって計算するアルゴリズムを示した。更に、ビームサーチを組み込んだアルゴリズムを提案し、実験により高い画対応決定能力と認識性能、及び実時間認識の実現性を確認した。

第4章では画接続と画対応を同時に処理するため、第3章で示したキューブサーチグラフを多層型の探索グラフに拡張してDPで処理するアルゴリズムを提案し、「1対多」画対応決定問題を解決した。更に、「画形状の例外的大幅な変形」をグラフ中のエッジの分岐として追加した。これによって、「筆順変動」、「画数変動」、「画形状の例外的大幅な変形」をとまなう入力文字に対する画対応問題を、DPによってシステムチックに計算することを可能とした。実行に当たっては速度面の要請からビームサーチを併用した。実験によって、ほぼ厳密性を損なうことなく現実的なりソースで計算できることを示した。教育漢字882種、25017データを対象とした認識実験ではクローズドデータ実験ながら相違度の単純比較によって99%超の認識率を得、アルゴリズムの妥当性を確認した。

第5章では、高精度化を目的とし、個々の画の形状等の評価情報である画間距離にくわえて、画の間の相対的な関係の評価情報(画間相互情報)を利用する筆順自由文字認識アルゴリズムを検討した。まず画間相互情報を用いた過去の研究とそれらの問題点について述べた。続いて、画間相互情報を用いる方法を説明した。予備実験によって、筆順上で隣接する2~3個の画の画間相互情報の利用により、認識性能に顕著な改善が見られ、ほぼ十分であることを示した。これを受けて実装面を検討し、画間相互情報を評価にくわえて画対応サーチを効率よく行う2次及び3次マルコフ型のキューブ状探索グラフに基づくアルゴリズムを提案し、現実的なりソースで実行できることを示した。

最後に第6章では、本論文のまとめと今後の課題について述べた。

論文調査の要旨

多画文字である漢字のオンライン認識においては画をプリミティブとした形状の類似性評価値を文字全体で統合するという構造解析の手法が有力視されているが、筆順変動と、続け書きによる画数変動への対処が重要な問題となる。これら进行处理する問題は入力パターンの各画と標準パターンの各画の間の対応付けを決定するという組合せ問題となる。筆順変動のみを扱う問題は全単射の決定問題であり、これに画数変動処理が加わった問題は、標準パターン中での画接続の組合せと、接続された画パターンと入力パターン画との全単射決定とが複合した問題になる。これらの組合せ問題をツリー探索を用いて計算すると、画数の階乗オーダーの処理時間を必要とする。この問題に対して、局所的な画対応決定を積み重ねて近似的な全単射解を求めるという方法が採られ、20年近くわたって、ほとんど唯一の解法とされてきた。より近似度の高い全単射性の実現を志向して、発見的手法に基づく改良が試みられたが、限界があった。

本研究は、この筆順変動、画数変動の問題に対して、効率のよい探索グラフと動的計画法に基づく解法を検討したもので、画数に関して指数オーダーの画対応アルゴリズムを与え、高精度認識と実用的処理速度の実現が可能なことを示したものである。

著者はまず、画数固定の条件で筆順変動の処理に関して考察し、従来定式化されていたツリー型の探索グラフに冗長な部分グラフが含まれていることを指摘し、冗長性を除去することにより、ノードが画対応状態に、エッジが1対の画間の対応付け処理に、それぞれ対応するキューブ状の探索グラフを導出し、画対応問題を画数に対して指数オーダーの問題に還元した。このグラフ上で探索を行う動的計画法アルゴリズムを示し、さらにビームサーチを組み合わせた高速アルゴリズムを提案している。一部の漢字を対象とした予備実験によって高精度な画対応付けの能力と高い認識性および計算量的実現可能性を確認している。

次いで著者は、画数変動問題を検討している。音声認識における時間伸縮の処理の考えを取り入れ、上記のキューブ状のグラフを多層化したうえで層間の遷移によって画接続を探索する手法を提案し、筆順変動と画数変動への統一的な対処を可能としている。加えて、グラフ中に補助的なエッジを付加することにより、非正規筆順での画接続、接続による字形変動等への対処を実現し、教育漢字を対象とした実験で、高い認識率と実用的な処理速度を達成できることを示している。筆順問題と画接続問題を統一して系統的に処理する新しい有効な解法を

与えたものと言える。

さらに著者は、これまでの認識手法ではほとんど用いられていなかった各画の文字中における相対的關係(画間相互情報:相対的長短,相対的位置等)の情報を利用することの有効性を指摘し、画間相互情報の評価をとりいれた画対応決定アルゴリズムを示している。予備実験によって、画間相互情報利用の効果と、入力パターンの筆順上で隣接する3個の画の画間相互情報を利用するのが認識性能と処理量の最適妥協点であることを示し、これを受けてキューブグラフに3画を単位として対応付けを探索するための3次マルコフ性を処理する構造を与え、これにより実時間処理が可能であることを示している。

以上要するに本論文は、オンライン文字認識における画対応決定法に関し、動的計画法に基づく新たな画対応アルゴリズムを提示し、筆順変動問題と画数変動問題に対する一つの解決を与えたもので、知能システム学上価値ある業績と言える。よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 河原崎 徳之 (神奈川県)
 学位記番号 シ情 博甲第57号(工学)
 学位授与の日附 平成11年3月25日
 学位論文題名 多指ハンドを有するロボットアームの把握計画に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 長谷川 勉
 (副査) " " 谷口 倫一郎
 " " " 平澤 宏太郎

論文内容の要旨

近年、ロボットは工場などの生産現場で飛躍的な発展を遂げてきたが、今後は医療や福祉そして日常生活において人と協調して作業することが期待される。従来の工場ラインのような画一した環境における単純な作業ではグリップ型の平行指ハンドにより物体を挟み込む把持で充分であった。しかし、人の日常生活においてロボットが人と協調して作業を行うためには、多様な形態での物体把持や把握した物体の操り機能がロボットに必要とされる。このような複雑な作業は、人間の手指に似た多指ハンドを備えたロボットアームでなければ実現できない。多指ハンドに関しては、把持や操りなどの理論的解析に関する研究がこれまで盛んに行われてきた。しかしその一方で、具体的な応用方法についての研究は、あまり着手されていないのが現状である。多指ハンドのもつ冗長な自由度の多さをどのように作業に用いるかについては、ほとんど研究がなされていない。

本研究では、多指ハンドを有するロボットアームの把

握計画を主なテーマとする。このような把握計画は、多指ハンドの把握形状を生成する問題とロボットアームの動作経路を生成する問題を含んでいる。把握形状生成に関しては、多指ハンドの構造の特徴や把握対象物周囲の空領域構造の特徴を利用したヒューリスティクスを用いることで、効率よく短時間のうちに一つの把握形状を求める手法を開発した。また、ロボットアームの動作経路生成に関しては、新しく経路拘束曲面を定義し、この曲面上で経路を求める手法を開発した。本論文は、以下の6章より構成される。

第1章では、従来の多指ハンドに関する研究とその問題点について述べ、本研究の目的を明らかにした。

第2章では、多指ハンドに関して、対象物を安定に把握する形状の生成手法について述べた。本手法では、「把握平面の設定」「指先接触点の設定」および「手首位置の設定」の3つの段階に問題を分割することにより、効率よく把握形状を求めている。また、指先接触点を設定する場合には、摩擦条件などのいくつかの安定把握条件を考慮する必要がある、これらの条件について明らかにした。最後に、本手法を用いた把握形状生成例を示した。

第3章では、多指ハンドを有するロボットアームに関して、障害物との干渉を考慮した把握形状生成手法について述べた。把握形状を生成する場合、ハンドとアームのどちらから形状を決定するかが解算出の効率に影響を与える。一般的に拘束の厳しい方から優先的に決定した方が無駄な計算を避けることができ、短時間のうちに解が求められる。そこで、アーム形状から先に求める方法(アーム形状優先方法)とハンド形状から先に求める方法(ハンド形状優先方法)の2つの方法を設け、障害物の配置状況を評価した結果に応じて、これらの方法を選択的に用いた。また、両方法とも把握対象物周囲の空領域を調べ、それに基づいた評価により指先接触点や手首位置を決定している。最後に、いくつかのシミュレーション例により、提案した手法の有効性およびヒューリスティクスを用いた効果を示した。

第4章では、ロボットアームの障害物回避経路生成手法について述べた。ロボットアームの障害物回避経路生成問題に対する解法は、コンフィギュレーション空間(C空間)を利用した方法が有効である。しかし、実際に適用する場合には、マニピュレータの自由度の増加と共に膨大な計算と記憶領域を必要とすることが問題となる。そこで、C空間中に2次元の自由曲面から成る経路拘束曲面を生成し、この曲面上での測地線を経路とした。ロボットアームの動作自由度の増加に伴いC空間の次元が増えても、経路拘束曲面の設定という大局的な段階を経るため、経路が存在する可能性に関して見通しの良い手法である。また、測地線は曲面上での最短経路であるため、得られる経路は関節角度変化量が少ない経路となる。

最後に、いくつかの経路生成例により、本手法の有効性を示した。

第5章では、提案したロボットアームの把握形状生成手法と障害物回避経路生成手法を組み合わせ、多指ハンドを有するロボットアームが初期形状から把握形状に至るまでの動作経路を生成する一連の把握計画手法について述べた。ロボットアームの動作経路は、経路拘束曲面を生成できれば、その曲面上の測地線として求められる。しかし、測地線は繰り返しの数値計算で求めているため、経路拘束曲面の形状が複雑な場合には、解がなかなか収束せず計算時間がかかるという問題がある。そこで、複数の把握形状候補について、経路拘束曲面の形状の複雑さを評価したヒューリスティクスにより、アーム動作経路生成の優先度を設定した。この優先度の設定により、測地線算出の計算時間がかからず比較的早くアーム動作経路を生成できる。最後に、把握動作生成例により、本手法の有効性を示した。

最後に、第6章では本論文の結論について述べた。

論文調査の要旨

多関節多指ロボットハンドは、人間の手に類似した構造を有することから、器用な手作業能力を工学的に実現しうるものと期待され、研究されてきた。ロボットアームの先端にこの多指ハンドを装備することにより、多様な物体形状に適応した安定な把握能力と広い作業範囲が確保でき、ロボットの適用範囲を飛躍的に拡大できると考えられる。しかし、このような構成のロボットは運動自由度数がきわめて大きいため、人間の意図する作業を実行するうえで各関節をどのように動かせばよいかを決定するのは容易ではない。各部の動きを人間が詳細にプログラムするのは困難で時間もかかり、環境の変化や作業の変更に対応できない。ロボット動作の自動計画機能は、この問題を解決するためのものである。

多関節ロボットアームの障害物回避動作計画は、ロボットアームの幾何モデル、運動学モデル、および作業環境モデルに基づいた探索過程として定式化され、すでに多くの研究があるが、関節数が多くなると計算量が膨大になるという問題を残している。多指ハンドを有するロボットアームでは、その把握動作の計画にあたり、各指の障害物回避条件に加えて、指先の接触モデル、把握対象物体形状、摩擦係数に基づく安定把握条件を満たす必要がある、問題をいっそう困難にしている。

本研究は、多指ハンドを有するロボットアームに関し、障害物との衝突を避けつつ所望の作業対象を把握するためのハンド形状と、そのときのハンドの位置と姿勢を実現するアームの動作を自動的に計画する手法を開発したもので、以下の点で評価できる。

第一は、3本の3関節指で構成されるロボットハンド

について、その指先のみを物体に接触させて把握するときの指関節角度の決定手法を開発したことである。多面体で近似しうる任意形状の操作対象物体を安定に把持するため、まず物体と指先との接触点を探索し、ついで得られた指先接触点を実現しうる手掌部の位置と姿勢の探索を行う。この過程で、把握対象物体周囲の空間構造と多指ハンドの占有空間形状とに基づいた把握可能性評価を導入し、この評価の高いものを優先して探索することにより安定把握の可能な指関節角度を効率よく決定している。

第二は、作業環境内に置かれた把握対象物体を、障害物と干渉することなく把握するための多指ハンドの位置およびアームの関節角度を計画する手法を開発したことである。障害物の配置が、手首より先のハンド部と基部から手首までのアーム部のどちらの運動をより強く制約しているかを評価したうえで、制約の大きい部分から先に関節角度を決定することにより無駄な探索を抑制する手法を考案し、シミュレーションでその効果を明らかにしている。

第三は、多指ハンド部を除いたアームに関し、作業空間内の動作開始点から動作目標点まで障害物を回避しつつ移動する動作を計画する新しい手法を開発したことである。この手法では、まず関節角度で表現したコンフィギュレーション空間内で、動作開始点と動作目標点を結ぶ平面を連続的に変形して障害物と干渉しない曲面を生成する。ついでこの曲面上で動作開始点と動作目標点を結ぶ最短測地線を数値計算により求める。これにより滑らかな準最適曲線として障害物回避経路を計画することに成功している。

以上要するに本論文は、多指ハンドを有するロボットアームに関し、作業環境内の物体形状と空間配置に起因する動作制約を評価し、障害物を回避しつつ安定に物体を把握する手法を考案したうえで、アームの準最適障害物回避軌道を計画する手法を開発したもので、ロボット工学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。



氏名(本籍) 松岡 毅 (福岡県)
 学位記番号 シ情 博甲第58号(工学)
 学位授与の日附 平成11年3月25日
 学位論文題名 多関節多指ロボットハンドの指先を用いた物体操作の研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 長谷川 勉
 (副査) " " 谷口 倫一郎
 " " " 平澤 宏太郎

論文内容の要旨

宇宙のような極限環境、あるいは人間社会のような非構造化環境に進出し、人間の仕事を代行するロボットの開発が要請されるようになってきている。このようなロボットには、対象形状に適応して安定に把持を行う機能や器用に対象を操作する機能が要求される。これに適したハンド機構として、多関節多指ハンドが挙げられる。多関節多指ハンドは多様な形態で対象に接触し、安定に把持を行うことができる。また、各指の運動によって任意の多自由度の操作を施すことができる。さらに、指先リンクに接触センサや力センサを装備して、ハンド自身の重量の影響を受けることなく対象直近での精密な接触点検出や力検出を行うことができる。

多関節多指ハンドに関するこれまでの研究は、モデルを用いたシミュレーションによるものが多く、実際のハンド機構によって作業を行わせた例は少ない。この理由として、ハンドと操作対象の接触状態の制御によって操作対象と環境の接触状態を制御するために制御に誤差が混入しやすいこと、また、予期できない摩擦や衝突等の外乱が対象操作に影響を与えやすく、これを検出することも困難であることが挙げられる。実際のハンドによって作業を行わせるためには、誤差が混入しにくい動作計画と、外乱の影響の確実な検出および補償とが必要である。

本論文では、多関節多指ハンドによる器用な作業を実現することを目的とする。そのために、不確定要因となる滑りを制御した転がり接触を用いて指先で対象を操作する手法を開発した。また、プログラムの負担を軽減するために動作プリミティブを用いて作業を記述する手法を開発し、さらに、作業中にエラーが発生した場合にそれを発見してリカバリする手法を開発した。本論文はこれらの成果をとりまとめたもので、7章から構成される。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的と本論文の概要を述べた。

第2章では、多関節多指ハンド機構の特徴を述べ、ついで転がり接触による対象操作の運動学的定式化および対象把持の力学的定式化を行った。その結果をもとに多関節多指ハンドによる対象操作の制御則を導いた。

第3章では、転がり接触による対象操作の計画手法を開発した。関節回転角度制限、関節出力トルク制限および摩擦コーン制約にもとづいて対象操作のシミュレーションを行い、条件が満たされない場合にはヒューリスティックによって初期把握および各関節の動作を変更する。これを繰り返すことにより所望の物体運動を実現し得る初期把握および各関節の動作を得る。

第4章では、多関節多指ハンドシステムを製作し、転がり接触による対象操作の手法を実装した。接触点位置

や把持内力等のパラメータは、対象と指先の幾何形状モデルおよび力センサ出力、ロータリーエンコーダ出力をもとに計算される。実時間処理を実現するため、対象操作を行うための個々の要素はモジュール化され、マルチCPU上で処理される。また、対象位置姿勢予測の誤差をビジョンシステムによって補償する手法を開発した。

第5章では、多関節多指ハンドのための動作プリミティブにもとづく作業システムを開発した。多関節多指ハンドは過剰な自由度を持ち、組立を行う際の各リンクの動きを直接プログラムすることは困難である。そこで、基本的な対象操作である動作プリミティブを定義し、組立作業の流れを動作プリミティブの系列として実現した。これによって、プログラミングを容易に行うことができるようになった。

第6章では、作業観測と作業状態評価にもとづいてエラー回復を行う手法を開発した。動作プリミティブの目標状態達成の認識は力覚の変化を閾値処理することによって行われる。しかし、予期できない摩擦や衝突などが存在する環境において、この閾値をあらかじめ適切に設定しておくことは難しい。閾値が不適切であった場合、システムは状態認識に失敗し、作業エラーが発生する。そこで、作業状態を観測するモジュールをハンドの制御ループの上位に配置した。そして観測結果をもとに作業状態評価を行い、エラーが検出された場合には、エラー発生前の状態への復帰と制御パラメータを変更した動作プリミティブの再実行を行うこととした。これによって、ロボットの作業を達成することが可能になった。

第7章はまとめであり、本研究で得られた結果を総括するとともに、今後の研究課題について述べた。

論文調査の要旨

多関節多指ロボットハンドは、人間の手に類似した構造と運動自由度を有することから、器用な作業の実現可能性を有するものとして期待され、研究がなされてきた。その機能は、対象の形状に適応した安定把握、手探りやなぞり動作に見られる能動的触覚計測、および把握中の物体に対する操作の3つに大別でき、前の2者については活発な研究がなされているが、物体操作については実際に多関節多指ハンドを用いた研究例はきわめて少ない。一般に三次元物体の運動自由度数は位置と姿勢の6であるのに対し、指の1本あたりの関節数は3から4程度である。このため操作対象の運動制御には、複数の指の協調動作が必要で、しかも指と物体のそれぞれの表面において接触点を転がりや滑りにより移動させなければならない。このとき操作中の物体と環境との接触に伴う力学的作用に加えて、指先と操作物体との接触点での相互作用があり、種々の計測誤差や制御運動誤差も加わるため不安定な制御系になってしまうことが、これまで研究を

困難にしてきた大きな理由である。

本研究は、多関節多指ロボットハンドによる物体操作システムに関し、操作対象に過大な力をかけることなく所望の運動を実現する実時間制御法と、摩擦を代表とする種々の不確定誤差の存在下で確実に作業を実行しうるシステム構成とを考慮し、組立作業に適用してその有効性を実験により検証したもので以下の点で評価できる。

第一は、操作対象と指先との接触を転がり接触に限定し不安定要因である滑りを制御した物体操作の定式化を行い、これに加えて位置と力の混成制御を実行する実時間システムを開発したことである。指先力センサ、関節エンコーダ、および実時間ステレオ視覚を用いたフィードバックにより安定把握を維持しつつ操作対象に所望の運動を実現することに成功している。

第二は、組立作業を対象物間の接触による運動自由度の拘束過程にとらえ、接触状態の遷移を実現する作業プリミティブを定義して、上記の指制御システム上に実装したことである。このシステムでは、多数の指関節の複雑な動きを意識することなく、対象の動きのみを記述すれば作業実行が可能になる。さらにプリミティブ中では、操作対象の運動軌跡や力学パラメータと作業目標との関係が明確化できているので、センサ情報の単純なしきい値処理に基づく目標接触状態の達成判定の信頼性を高めることができています。

第三は、組立作業におけるエラーの検出とエラーからの回復を実現するシステム構成法を開発したことである。滑りを制御した指先制御と目標接触状態の達成能力の高いプリミティブを用いても、組立中の部品間の接触に伴う摩擦抗力や衝突など予測できない不安定要因により作業エラーを起こすことがある。これに対し、プリミティブ実行により生じうる状態遷移をオフラインで解析したうえで、エラーが生じた場合の回復と再実行の戦略を用意しておく。作業中は、操作対象の位置姿勢変化を視覚を用いてプリミティブ開始時点から観測し、状態遷移解析結果と対照することによりエラーを検出でき、回復および再実行を試みる。この過程で目標達成判定のしきい値が適応的に修正され、作業達成能力を高めることに成功している。

以上要するに本論文は、多関節多指ロボットハンドによる物体操作に関し、指先での転がり接触を維持して滑りを抑制しつつ所望の操作を実現する制御システムを開発し、さらに組立作業の実行に伴うエラーの検出手法と回復戦略を考案して、繊細で器用な作業能力を実現できることを明らかにしたもので、ロボット工学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。



氏名(本籍) 宮谷 徹彦 (宮城県)
 学位記番号 シ情 博甲第59号(工学)
 学位授与の日附 平成11年3月25日
 学位論文題名 移動通信用スペクトル拡散通信方式の研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 赤岩 芳彦
 (副査) // // 立居場 光生
 // // // 香田 徹

論文内容の要旨

スペクトル拡散(SS)方式を用いた移動通信システムは、原理的に優れた特徴を有するものの、その実用化においては、移動通信特有の種々の課題が存在する。本論文ではまず、信号伝達品質を損なう周波数選択性フェージングの問題を取り上げる。この問題には、RAKE受信が有効である。従来のRAKE受信方式においては参照信号を必要とする為に周波数の利用効率が低下する問題があった。本論文では、参照信号を用いない方式を提案する。次に、SS通信の基本となるチップ同期の検出と保持を取り上げる。これは、移動多重電波伝搬環境において、特に低い信号対雑音電力比の場合において困難になる。この問題を解決する為に、従来方式では、同相加算平均を用いた高速遅延プロファイル推定を用いているが、回路規模が増大する。本論文では回路の小型化に適した方式を提案する。最後にセルラー方式において高速ハンドオフに不可欠となる基地局識別符号の検出法について検討する。従来方式に比べて簡単な回路アルゴリズムを提案する。

本論文の構成は、以下の通りである。

第一章は序論であり、現状の移動通信事情および将来像を述べ、本研究にいたった背景を説明する。次に、本研究の目的、本論の構成を示す。

第二章はSS通信方式の原理を述べている。SSの変復調方式について説明し、SSの特徴、技術的検討課題の指摘を行う。

第三章は、フェージング回線用スペクトル拡散通信方式を提案している。提案方式は、RAKE受信で必要となる伝送路推定のための参照信号を使用しない為に周波数の有効利用ができ、かつ、従来方式よりも誤り率が優れている事を示す。

第四章は、チップ同期に関する研究である。同期捕捉方式としてアナログ相關器の使用も可能な小規模パス検出方式、保持方式として同相化誤差補償3値DLL方式をそれぞれ提案している。両方式とも、ハードウェア規模及び同期特性が優れている事を示す。

第五章は、基地局識別符号同定に関し、高速同定を可能にする回路アルゴリズムを提案する。提案方式は、整

合フィルタのシフトレジスタへ受信入力信号を蓄積し、任意位相の拡散符号を生成可能な拡散符号生成器を用いて、高速同定を可能とした。また、提案方式の室内実験結果を報告する。

第六章は、本研究をまとめた結論である。

論文調査の要旨

移動通信需要の急速な増大にともない、システム容量を高めるために次世代方式の研究開発が活発に進められている。最も有望な方式はスペクトル拡散通信を用いるものである。移動通信用スペクトル拡散方式の歴史は浅く、次世代システムとして実現するためには、数多くの課題が残っている。例えば、移動通信回線の特徴づける周波数選択性高速フェージング環境下で安定でかつ周波数利用効率に優れたデジタル伝送方式が求められる。また、スペクトル拡散信号の受信回路を小型化、低消費電力化するための受信方式の実現は、携帯端末の実用化における重要な課題である。

本論文は上にあげた課題に関する研究をまとめたものである。スペクトル拡散信号はその高い時間分析能力を利用するいわゆるRAKE受信を用いることにより、周波数選択性高速フェージング下において優れた特性を示す。RAKE受信のためには時変伝送路の特性を推定しなければならず、そのため、従来、定められた試験信号を周期的に情報信号に付加して送信していた。高速フェージングに対処するためには試験信号送信間隔を短くしなければならず、これによりチャネルの利用効率が低下する問題が生じる。

受信回路の小型化、低消費電力化を実現するためにはスペクトル拡散符号の同期捕捉と保持に関わる回路、および基地局毎に異なるロングコードの同定に関わる回路が重要である。具体的には、拡散符号に対する整合フィルタの出力信号から同期捕捉のためのパス検出をできるだけ精度よく行いながら、また、同期保持におけるジッタ特性を軽減しながら、回路の小型化、低消費電力化が可能となる方式を必要とする。ロングコード同定においては、高速同定を可能にしつつ回路の単純化を計らなければならない。

本論文は以下の点で評価できる。

著者はまず、伝送路特性推定のための試験信号を必要とせず、したがって、チャネルの利用効率が低下しない方式を提案し、その有効性を検証している。この方式は異なる二つのデータに対して異なる拡散符号を割り当てることで実現されている。さらに、拡散符号間の相關値を平均伝送路推定値から差し引く手法を取り入れることにより、誤り率においても従来方式よりも優れた特性を得ている。

次に、スペクトル拡散符号の同期捕捉のためのパス検

出の新しい回路方式を提案している。整合フィルタの出力を2値判定することにより、整合フィルタの構成がアナログおよびデジタルの双方に対応できるインターフェースを実現するとともに、回路の小型化を可能にしている。同期保持方式としては、位相制御を3値化するとともに、同相化演算を工夫することにより、制御ジッタの低減を計り、低い信号対雑音電力条件下でも同期保持を可能としている。

最後に、ロングコード同定回路としては、符号同定に関して新たな相関器を必要としない新しい方式を提案して回路の小型化を達成している。また、その同定時間はパス検出を含めて770msec程度と短く、周波数ドリフトに対する特性も規格化周波数ドリフトが $\pm 0.5\text{ppm}$ 以内であれば90%の高い確率でロングコードの同定を可能としている。

以上を要約すると、本論文は移動通信用途のスペクトル拡散通信方式において、周波数選択性フェージングのもとでチャンネルの利用効率を損なうことなく安定なデジタル伝送を達成する方式を提案し、スペクトル拡散符号の同期と保持およびロングコード同定を行うための小型・低消費電力の受信回路を提案したものであり、情報通信工学の発展に寄与する。よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。



氏名(本籍)	Canchi Radhakrishna (インド)
学位記番号	シ情 博甲第60号(工学)
学位授与の日附	平成11年3月25日
学位論文題名	MEDIA ACCESS AND TRANSMISSION TECHNIQUES FOR WIRELESS HIGH SPEED DATA COMMUNICATION SYSTEM(高速無線データ通信システムのためのメディアアクセスと伝送技術)

論文調査委員

(主査)	九州大学 教授 赤岩 芳彦
(副査)	〃 〃 安元 清俊
	〃 〃 立居場 光生

論文内容の要旨

デジタル移動音声通信の実現と有線インターネットサービスの到来とともに、無線データ通信の要求が急速に高まっている。携帯端末でのデータサービスを実現するのに重要となる点は、性能、費用、電力消費量である。これらの要求に対し、音声サービスに加えてデータサービスを提供する方法、データ伝送速度を速くする方法、電池の電力を浪費しない方法を検討することが本研究の

目的である。本論文では、スペクトル効率が良く、少ない電力消費量で高速で正確なデータ伝送を実現する新たな無線データ伝送方式を提案する。

高いスペクトル効率を得る方法の一つは、システムの能力、すなわち、無線サービスでの品質低下を起こすことなく、与えられたスペクトル帯域に対し、より多くのユーザーを収容する能力を高めることである。現在のデジタルセルラーシステムでは、音声チャンネルは有音区間と無音区間が存在するために、40-50パーセントの空き時間が存在する。本研究では、音声・データ総合サービス環境において、音声の無音区間にデータを有効に伝送する手法として、データ端末に対して送信禁止・許可を与える多重アクセス方式(Inhibit and Random Multiple Access: IRMA)を検討する。

電波の多重波伝搬現象はフェージングと伝送信号の歪みを起こす。伝送速度を制限する要因となるのは歪みである。高速で正確なデータ伝送を行うために、これまで、誤り復号または消失シンボル復号を用いた符号化マルチキャリア伝送に関する多数の研究がなされている。もし消失シンボル生成が効果的になされれば、誤り復号よりも消失シンボル復号が望ましい。判定誤差と受信電力に基づく2つの閾値無しの消失シンボル生成技術を提案し、この方式がチャンネル符号化マルチキャリア伝送の性能を向上させることを示す。

移動無線通信において、携帯端末の電池の電力を節約することは重要な問題である。電力消費量を低減するために、無線伝搬路のレイリーフェージング特性を利用した適応送信電力制御を提案する。

本論文は、以下の5章からなる。

1章では、無線通信とその現状について述べる。無線ローカルデータ通信に対する新たな方式に関して簡単に述べ、その基本的な考えと手法を簡単に紹介する。システムモデルと関連した話題もこの章で述べる。

2章では、提案するMACプロトコル、つまり、データ通信のためのIRMAに関して述べる。データ端末の数を有限と無限にした場合を仮定し、データ送出の禁止確率がデータの伝送特性、すなわちスループットや伝搬遅延に与える影響を見積もる理論式を導出する。

3章では、判定誤差と受信電力に基づく閾値無し消失シンボル復号法に関して述べる。それらの手法を適用することにより、消失シンボル復号化 $\pi/4$ シフトDQPSKマルチキャリア方式の特性を計算機シミュレーションによって評価する。

4章では、レイリーフェージング環境下で同期検波と遅延検波を行う場合の移動無線伝送における $\pi/4$ シフト差動符号化QPSKに対する適応送信電力制御を検討し、理論解析を行う。

5章では、無線高速ローカルデータ通信システムに関

して論文の要約を行い、今後の展望について述べる。

論文調査の要旨

デジタル通信の発展とともに、音声に加えてデータ・画像などを含む信号の伝送、いわゆるマルチメディア無線通信が今後、その重要性を増すものと思われる。マルチメディア無線通信システムを実現するためには、数々の課題が残されている。そのなかでも、画像データなどの大容量信号を即時または短時間に伝送するための高速無線伝送技術、異なる信号メディアに対応でき、また無線チャネルを有効に利用するための通信回線アクセス技術、および携帯端末の電池の長寿命化につながる低消費電力化を可能にする通信方式の実現は重要な課題である。

本論文は上に掲げた三つの課題に関する研究をまとめたものである。高速伝送においては伝送路歪みが無視できなくなる。これに対処する技術として適応自動等化とマルチキャリア伝送が知られている。数10Mbpsもの高い伝送速度になるとマルチキャリア伝送が周波数選択性フェージングの特長を生かした誤り訂正方式との整合性と信号処理量の観点から有利である。本論文ではマルチキャリア伝送における誤り訂正方式において消失シンボルを検出する新しい手法を開発している。マルチメディア通信アクセス技術としては、音声などの即時性を必要とする信号とデータなどの非即時性信号を効率的に統合できるパケット多重アクセス方式が有効である。本論文ではこの一方式を検討し、その特性を理論的に解析している。低消費電力化においては、送信電力の低減が最も効果的である。そのための方式として送信電力制御を取り上げ、フェージング環境下における理論式を導くとともに、その特性を明らかにしている。

本論文は以下の点で評価できる。

著者はまず、音声の即時性を保証できるパケット多重アクセス方式を検討している。この方式では、定められた数のスロットからなるフレームを形成しており、パケット衝突が生じるたびに、次のフレームのスロットにおけるデータ伝送を禁止することにより音声の即時性を保っている。著者はこのシステムにおけるデータ伝送について、マルコフモデルを用いることによりスループットおよび平均伝送遅延時間特性の理論式を導くことに成功している。さらに、この理論式から、音声の即時性を保ちながらもデータ伝送特性が実用域においてはほとんど劣化しないことを定量的に明らかにしている。

次に、マルチキャリア伝送における誤り訂正方式として消失シンボル復号化を検討している。消失シンボル復号を用いれば誤り訂正能力を2倍に高めることができるので、誤り率が高いフェージング回線に適している。ただし、その能力は消失シンボルを特定する正確性に大き

く依存する。従来の固定しきい値を用いる方式は、その最適値の設定が困難であった。著者は相対的な評価基準値を用いる新しい方法を提案している。種々のフェージング下における特性を調べることにより、本方式の有効性を確認している。

最後に、送信電力制御を用いた場合の誤り率特性を解析している。デジタル移動通信において広く用いられている $\pi/4$ シフトQPSK方式に対して、フェージング環境下において同期検波および遅延検波を行ったときの誤り率について送信電力制御を考慮した理論式を導出している。また、数値計算結果を示すことで、送信電力制御による送信電力低減効果を明らかにしている。

以上を要約すると、本論文は無線データ伝送システムにおいて、パケット多重アクセス方式の特性を理論的に解明し、マルチキャリア伝送における消失シンボル誤り訂正の新しい方法を提案し、また送信電力制御下における誤り率の理論式を導出したものであり、情報通信工学の発展に寄与する。よって、本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 鈴木文雄(宮城県)
 学位記番号 シ情 博甲第61号(工学)
 学位授与の日附 平成11年3月25日
 学位論文題名 創造的トップダウン設計手法によるシステムLSI設計に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 安浦寛人
 (副査) " " 荒木啓二郎
 " " " 松永勝也

論文内容の要旨

本論文は、電子機器の開発設計において、創造的トップダウン設計手法による製品概念の創造からシステムLSIの製造に至る体系的な設計についての研究をまとめたものである。電子機器の開発設計を取り巻く環境は、半導体技術の高度化や、設計対象のより人間的な機能の要求、および社会的環境問題も含めたシステムの多様化等への変革に直面している。また、大量生産による均一品質・低価格製品から少量・多品種・多機能な製品開発に市場の要求が変化してきており、製造側においては製品の差別化のために、独創的かつ創造的な製品開発が重要になってきている。これらの要求を満足させる選択肢の一つに、製品の開発をシステム設計から製品企画まで遡った設計に重点を移し、システム全体の機能をシステムLSIで実現する手法の採用が考えられる。すなわち、決められた製品仕様を単に部品としてのLSIを組み合

わせて実現するのではなく、創造的な製品開発により製品の差別化を行い、システムを一個または複数個のLSIで実現する技術が重要になっている。

この考えを実現するために、本論文は、「創造的トップダウン設計手法によるシステムLSI設計」の提案を行う。具体的には、1)システム全体を見渡し、かつ、創造的な設計が行えるトップダウン設計手法の適用、2)設計過程を四段階に体系化すること、3)その開発環境、4)創造的発想活動を支援する思考規範としてのアブダクション思考の適用、5)多様な市場の要求と高度な応用技術に対応できる顧客・製造者協調設計手法の項目からなる。創造的トップダウン設計手法は、この五つの提案を基に、思考規範、手法、技術、ツールなどを適用して、創造的開発設計環境を構築し、システムLSIを設計する。この設計手法を三事例に適用し、システムLSI設計の開発における効果を確かめた。

本論文は、6章から構成される。第1章は、序論である。ここでは、本論文の研究の背景および従来の設計手法の検討と課題を述べ、課題解決のための設計手法の提案とその研究成果について述べる。

第2章では、トップダウン設計手法、創造的トップダウン設計手法を定義し、四段階の設計過程について詳細に述べる。四段階とは、概念形成ステップ、仮想世界プロトタイプステップ、合成・製造ステップ、および実世界プロトタイプステップのことである。本章では、各段階に関する機能、方式、技術、ツールおよび出力について述べる。さらに、アブダクション思考および顧客・製造者型協調設計手法に関する構成、原理および手順の概要について述べる。システムLSIの設計は、創造的トップダウン設計手法により、先ず、創出した製品概念を最初の上位段階の設計で高い抽象度で記述し、これを下位段階の設計で、順次具体化して記述を詳細化する。記述された機能の検証には、前述の四段階のステップを用いる。

第3章では画像・情報処理システムにアブダクション思考を適用して、創造的トップダウン設計手法の実証と考察を行った。画像・情報処理システムとして、液晶プロジェクト装置の開発事例を挙げ同設計手法を適用した。従来のRGB信号から輝度信号を取り出し、従来より約10倍明るい液晶プロジェクト装置の開発に成功した。第4章では、音声情報処理システムに顧客・製造者協調設計手法を適用して、創造的トップダウン設計手法の実証と考察を行った。音声情報処理システムとして、テレビジョン受像機の音声回路の開発事例を挙げ、同設計手法を適用した。その結果、音圧周波数特性と位相周波数特性に歪みと位相の遅れの少ない音声回路を実現することができた。第5章では、制御システムに顧客・製造者協調設計手法を適用して、創造的トップダウン設計手法の

実証と考察を行った。制御システムとして、蛍光灯の点灯用インバータ回路の開発事例を挙げ、同設計手法を適用した。その結果、高調波が少なく、コンデンサ容量で1/10、コイル容量で1/2の大きさにすることができた。第6章では、本研究の成果をまとめると共に、今後の課題について述べる。

第3～5章の事例を通して製品の差別化のために、独創的かつ創造的な製品開発手法として提案手法が有効であることを示した。

論文調査の要旨

電子機器の開発設計を取り巻く環境は、半導体技術の進歩や設計対象に対する要求の変化および社会的環境問題も含めたシステム設計の多様化など大きな変革の渦中にある。また、大量生産による均一品質・低価格製品から少量・多品種・多機能な製品に市場の要求が変化して来ており、製品の差別化のために独創的かつ創造的な製品開発が重要になって来ている。本論文は、これらの状況に対応する手法として、システム設計から製品企画に重点を移し、システム全体の機能をシステムLSIで実現する手法の採用を提案している。決められた製品仕様を単にLSIによって半導体化するのではなく、創造的な製品開発により製品の差別化を行うことが重要であることを認識し、システムを1個、あるいは複数個のLSIで実現することを提案している。具体的な設計例を示し、「創造的トップダウン設計手法によるシステムLSI設計」として実証的にまとめている。

本論文で提案している手法は、1)システム全体を見渡し創造的な設計が行えるトップダウン手法の適用、2)四段階の体系的設計過程、3)そのための開発環境、4)創造的発想活動を支援する思考規範、5)多様な市場の要求と高度な応用技術に対応できる顧客・製造者協調設計手法からなっている。本創造的トップダウン設計手法では、この5つの項目を基に、思考規範、手法、技術、ツールなどを整備して創造的開発設計環境を構築し、システムLSIを設計する。この設計手法を3事例に適用し、システムLSIの開発における効果を確かめている。

まず、システムLSIの設計現場における現状を考察し、その課題を整理している。その対策として、創造的トップダウン設計手法を定義し、概念形成ステップ、仮想世界プロトタイプステップ、合成・製造ステップ、および実世界プロトタイプステップの四段階の設計過程を詳細に述べている。各段階に関する機能、方式、技術、ツールおよび出力について設計現場における要求と利用可能な技術の観点からまとめている。さらに、創造的トップダウン設計手法と組み合わせるアブダクション思考および顧客・製造者協調設計手法に関する設計環境の構成、原理および手順の概要について述べ

ている。システム LSI の設計は、創造的トップダウン設計手法により創出した製品概念を高い抽象度で記述し、これを下位段階で徐々に具体化して記述していく。著者が長年に亘り実際の設計現場で培ってきた複数の設計技法を体系化し、一つの設計手法としてまとめあげたものである。

つぎに、画像・情報処理システムにアブダクション思考を適用して、四段階の創造的トップダウン手法の実証と考察を行っている。画像・情報処理システムとして、液晶プロジェクタ装置の開発事例を取り上げ、提案する設計手法を適用した結果を報告している。従来の RGB 信号から輝度信号を分離し、従来より約10倍明るい液晶プロジェクタ装置の開発に成功したことを述べ、提案手法の有効性を実証している。

さらに、音声情報処理システムに顧客・製造者協調設計手法を適用して、四段階の創造的トップダウン手法の有効性の実証と考察を行っている。音声情報処理システムとして、テレビジョン受像機の音声回路の開発事例を挙げ、同設計手法を適用している。その結果、音声の振幅周波数特性と位相周波数特性に歪みと位相の遅れの少ない音声回路を実現することができることを示し、提案手法の有効性を実証している。

3番目の例として、制御システムに顧客・製造者協調設計手法を適用して四段階の創造的トップダウン設計手法の有効性の実証と考察を行っている。制御システムとして、蛍光灯の点灯用インバータ回路の開発事例を挙げ、同設計手法を適用している。その結果、高調波が少なく、コンデンサ容量で1/10、コイル容量で1/2の大きさにすることができ、提案手法が有効であることを確認している。以上、3種類の事例を通して製品の差別化のために、独創的かつ創造的な製品開発手法として提案手法が有効であると結論づけている。

以上を要約すると、本研究は、システム LSI 設計における創造的トップダウン設計手法による製品概念の提案からシステム LSI の製造に至る体系的な設計手法についての研究をまとめたものであり、システム LSI に対する新しい設計手法の方向性を示したもので、情報工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位論文に値すると認める。

(副 査) 九州大学 教授 岡田 龍雄
 // // // 渡辺 征夫

論文内容の要旨

管路気中送電線は別称、ガス絶縁送電線(Gas-Insulated Transmission Line : GIL)と呼ばれ、大容量地中送電線として、1960年に我が国で考案された技術である。その構造は、パイプ状の導体を密閉パイプ状シース中に絶縁体であるスペーサで支持し、主絶縁体として、SF₆ガスを高圧で充填したものである。

近年、電力システムの安定化と送電効率向上を目的とし、都市近郊に大容量火力発電所の建設が進められている。発電所と基幹電力システムを結ぶ引き出し線として、かつては架空送電線や電力ケーブルが使用されてきた。都市近郊の大容量発電所からの引き出し線は、人口密度の高い地域の中を大電力輸送することになり、これに対処できる送電方式が望まれていた。GIL は大容量送電方式として適しており、各所で実用されるようになるとともに、長距離大電力輸送路の途中において地中化が必要な地域への適用が検討されるようになってきている。

本研究は、GIL の実用化を目的として、主として GIL の絶縁特性、温度特性ならびに機械特性に関して、実機モデルを試作して性能評価と実証試験を行うとともに、GIL 布設に当たって必要な GIL のシステム構成法と建設技術の開発を行い、最終的には世界最大の GIL 建設の成功に貢献した。本論文は、それらの成果をまとめたもので、以下の9章からなっている。

まず、第1章では、研究の背景、内外における GIL 開発の経緯と現状、本研究の概要についてまとめている。

第2章は、GIL の絶縁特性に関する内容で、主に金属異物の交流電界による挙動すなわち起立、浮上特性を明らかにし、また、傾斜した GIL 中の移動速度を求めている。また金属異物のスペーサ沿面絶縁破壊に及ぼす影響について実機を用いて実験により明らかとし、その結果と解析値と比較している。一方、その絶縁破壊特性の実験式を導出している。

第3章は、GIL の熱特性に関する内容で、実機やモデルを用いて、通電実験を行い、水平、垂直、傾斜の各配置での SF₆ガス中の伝熱特性を調べ、電流量設計に必要な実験式を導入している。その結果、垂直布設や傾斜配置の場合、対流の影響により上部の温度が最高となるが、水平配置の場合の最高温度と有意差がないことを述べている。また、SF₆ガスと他のガスとの混合ガスの伝熱特性を調べている。例えば、SF₆ガスに He ガスを50%混合すると、伝熱量は約20%増加する。更に、高導電率のアルミニウム導体の開発結果について述べている。その結果、所要の機械強度を有するとともに、合金アルミニウムとしては、ほぼ最高の導電率59.5~60%を達成して

氏名(本籍) 荒木 智 勇 (福岡県)
 学位記番号 シ情 博甲第62号(工学)
 学位授与の日付 平成11年3月25日
 学位論文題名 管路気中送電線(GIL)の実用化研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 原 雅 則

いる。

第4章は、GILの機械特性に関する内容で、GIL線路またはユニットについて、熱挙動特性、地震に対する振動特性および短絡電磁力特性を調べ、解析結果と比較している。その結果、曲がり部における熱挙動については、実測値と解析値が比較的よく一致し、解析手法の妥当性を確認している。また振動特性については、応答倍率や減衰定数を明らかにした。短絡電磁力特性については、最も厳しい三心型GILユニットについて実験を行い、二相短絡が荷重面で、最も過酷であることを明らかにしている。また、主要構成部品であるスペーサ、シース用大口径押出管、プラグインコンタクト、アルミベローズ、シース接続部および変角ユニットを試作し、それぞれについて検証実験を行い、各種特性や性能を明らかにしている。

第5章は、線路としての諸特性すなわちシース循環電流、サージ侵入時のシース誘起電圧および線路定数の実測結果と解析結果について述べている。また、線路の部分放電測定システムやガス圧監視システムについて述べている。

第6章は、線路で運転中に想定される絶縁破壊に伴う地絡アークの各挙動に関して、実機を用いた実験結果について述べている。すなわち、アークの走行特性、シースのバンスルー(穿孔)特性、ガス圧上昇特性について調べ、その結果を基に実験式を導出している。また、アークによるSF₆ガスの分解ガスについて明らかにしている。

第7章は、現地での作業性向上のためシース溶接用全自動溶接機を開発し、その機能、特性および溶接実験結果について述べている。その結果、シース円周方向に均一な溶接部を達成できたことを述べている。

第8章は、GILの経済性から見た適用範囲について、従来のCVケーブルと比較検討を行い、短距離、大容量になるほどGILが有利となることを述べている。

最後に、第9章は、第2章から第8章までを総括し、本研究で得られた結果のまとめと今後の展望について述べている。

論文調査の要旨

管路気中送電線(Gas Insulated Transmission Line: GIL)は、金属導体をパイプ状金属シース内にスペーサと呼ばれる固体絶縁物で支持し、絶縁媒体として4~5気圧のSF₆ガスを充填する送電線である。管路気中送電線では、固体絶縁物に比べて比誘電率が小さく空気の約10倍の絶縁耐力を有する高気圧SF₆ガスを使用するとともに、金属導体の直径を大きくできるので、従来の架空送電線および電力ケーブルに比べて高い電力輸送密度と高率が期待でき、また地中化が可能である。近年、電力

システムの安定化と送電効率の向上を目的として、都市近郊に大容量火力発電所を建設することが多くなるとともに、電力融通のために発電力の豊富な地域から需要地まで大電力を輸送することが多くなっている。この場合、都市近郊火力発電所から基幹系統までの人口密度の高い地域を通過する引き出し線路、および美観を重要視する国立公園を通過する線路に、GILの適用が注目されている。

著者は、我が国のGIL開発当初からその実用化を指向して、GILの絶縁特性、熱特性、機械特性および線路のシステム化を研究し、多数の新しい知見を得ている。本論文は、それらの成果をまとめたもので、次の諸点で評価できる。

第一に、GILにおける絶縁特性を実験で検討し、スペーサ沿面、スペーサ・ガス・電極の接合するトリプルジャンクション、および混入金属異物が絶縁弱点部になることを指摘している。さらに、スペーサ表面とシース電極表面の接触形態ならびにスペーサ表面形状の工夫によるトリプルジャンクションとスペーサ表面の電界緩和、並びに粒子トラップ装置の導入による粒子除去により、絶縁弱点部の強化が可能であることを示している。

第二に、布設条件を考慮したGIL中の放射伝熱と対流伝熱特性を基礎実験で調べるとともに、熱特性の解析モデルを提案してこれらの特性式を導き、実用GILの通電時に提案した式が適用できることを示している。

第三に、GILにおける導体の伸縮継手とシースの熱伸縮特性、地震時の振動特性、短絡事故時の対電磁応力特性、シース、スペーサおよびベローズの強度特性、ならびにGIL全体の曲げ強度について評価試験を行い、とくにGILの実用環境下の機械強度に耐える材料および各部の形状と寸法を検討している。さらに、電気絶縁と機械強度を考慮したGIL特有のスペーサとシース循環電流を直接流すことのできる大伸縮用アルミベローズの開発に成功している。

第四に、GILをシステム化するときの各種シースボンド方式における循環電流の算出法を導いている。また、電力システムにGILを接続したときのサージ解析に必要なサージ伝搬定数を解析で求め、実験結果に合うことを確かめるとともに、各種接地方式におけるサージ侵入時のシース誘起電圧の評価を行っている。さらに、GILシステムに適用できるガス圧監視システム、部分放電測定システムの開発を行っている。

第五に、GILのアーク地絡事故時に問題となるアーク特性、シース溶断特性、絶縁ガスの分解生成物を実規模試験で調べ、シース溶断時のアーク電流と持続時間、およびシース厚の関係を求めて実用GILのシース厚を地絡アーク現象の面からも検討している。

第六に、GIL布設作業性向上法を提案するとともに、

GILが従来のCVケーブルに比べて経済的となる線路電圧および互長などの布設条件を示している。

以上要するに、本研究は、GILの絶縁特性、熱特性、機械特性および線路のシステム化を、実用線路の設計および布設の観点から検討し、世界最大級のGIL建設に結び付けている。本論文は、それらの成果をまとめたもので、電力工学上価値ある業績である。よって、博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 高野 浩二 (福岡県)
 学位記番号 シ情 博甲第63号(工学)
 学位授与の日付 平成11年3月25日
 学位論文題名 高温超伝導電力機器の模擬クエンチ環境下における熱気泡トリガ電気破壊機構と破壊特性の研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 原 雅 則
 (副査) " " 竹 尾 正 勝
 " " " 船 木 和 夫

論文内容の要旨

今後の電力需要の増大や省エネルギー要請、電力需要の集中に対応するための電力エネルギー分野に於ける課題に対して、現状技術の単純な延長で対応できるとは考えにくく、新技術の開発が必要である。このことから、近年超伝導技術の電力分野への応用に関心が集まっている。この時、超伝導電力機器の実用化に際しても、従来の電力機器と同等の高信頼性が求められる。

ところで、超伝導機器の冷却方式には主に浸漬冷却方式と強制冷却方式がある。高温超伝導機器で使用される浸漬冷却方式については、冷媒液体が絶縁媒体を兼ねることになる。この環境下でのクエンチ時には、ホットスポットの周りに大きな誘導電圧と絶縁耐力の弱い熱気泡が同時に発生する。これは電気絶縁上の弱点部となることから、超伝導電力機器の信頼性を高くするためには、クエンチ時の絶縁環境を考慮する必要がある。

このことについて、従来、直流不平等電界下での気泡挙動や気泡を介した絶縁破壊に対する検討が行われてきた。本研究では、より実際の絶縁環境に近い状態を考慮して、冷媒として液体窒素を用い、ギャップ長と直流印加電圧及び気泡半径を大きく変化させた場合の気泡挙動や、絶縁物としてカプトンフィルム被覆やFRPスペーサ存在下での気泡挙動や直流絶縁破壊機構、及び交流・インパルス電界下での気泡挙動や絶縁破壊機構について検討を行った。本論文は、それらの成果をまとめたもので、以下の7章からなる。

まず、第1章では、研究の背景、これまでの研究、本

論文の概要についてまとめた。

第2章では、高温超伝導電力機器のクエンチ条件下の絶縁環境を検討し、その環境を模擬するためには、液体窒素中に高電界と熱気泡を同時に発生させる必要があることを明らかにした。また、この環境を模擬するために本研究で使用した実験系と円筒対平板電極系について説明し、円筒電極内にはクエンチ時のジュール発熱を模擬するためにヒータを設置したことを述べた。

第3章では、直流不平等電界下で気泡に作用する力について検討し、ギャップ長と直流印加電圧及び気泡半径を広い範囲で変化させた場合の気泡挙動に関して、主に気泡運動軌跡の数値計算を行った結果を述べた。それにより、気泡運動の特徴の分類や気泡の滞留についてギャップ長との関係を明らかにし、気泡挙動及び気泡の絶縁破壊に与える影響を推定した。

第4章では、絶縁フィルム被覆が気泡挙動と直流絶縁破壊に与える影響に関する実験研究結果について示した。それにより、直流不平等電界下での気泡の発生、成長、運動を検討し、気泡の微小化や変形、破壊に与える影響を明らかにした。また、気泡挙動に対するフィルムの影響は、フィルムによる気泡発生に対する影響とフィルム端及び放電によって形成された小孔における気泡のひっかかりによる成長促進の影響を通して主に出現する事を示した。さらに、破壊電圧はフィルム上に放電痕が形成されることによって著しく低下し、その最低値は77Kの窒素ガス中の値に近いこと、このため超伝導コイルのクエンチ環境下で固体絶縁物が一度破壊を経験すると、破壊前の系の耐電圧が高いほど絶縁フィルムに損傷を生じやすく、絶縁劣化の程度が大きくなることを述べた。

第5章では、FRPスペーサが気泡挙動と直流絶縁破壊に与える影響に関する実験研究結果について示した。円筒電極から発生する熱気泡のない場合には、前回の絶縁破壊の熱によって発生した気泡が、直流電圧印加時に液体窒素とFRPの境界上にガス層を形成することがあり、これにより破壊電圧が大きく低下することを明らかにした。また、熱気泡の発生のある場合には、円筒電極とFRPの接する部分に熱気泡の発生箇所が集中することや、円筒電極から発生する熱気泡は直流電圧を印加することで小さくなり、液体窒素とFRPの境界上のガス層を吹き払うことも述べた。破壊電圧については、気泡の無い場合のFRPの存在による破壊電圧の低下の原因は楔型の三重点における電界集中の影響が支配的であること、円筒電極からの熱気泡発生のある場合のFRPの存在による破壊電圧の低下の原因としては、楔型の三重点における電界集中の影響の他にFRPの沿面付近の気泡の数密度の増加が考えられることを明らかにした。

第6章では、印加電圧波形が気泡挙動と気泡を介した絶縁破壊に与える影響について述べた。印加電圧は周波

数の異なる交流とインパルスである。 $f=60\text{Hz}$ 程度の高い周波数の交流電圧を印加した場合、気泡の滞留位置や大きさは印加電圧の実効値と同じ大きさの直流電圧を印加したときとほぼ同じになること、ならびに周波数が小さくなるほど絶縁破壊時の気泡状態が直流のものに近づくことを明らかにした。さらに、気泡存在下では、気泡挙動の影響により直流破壊電圧に比べ交流破壊電圧は少し高くなるを述べた。インパルス電圧印加した場合には、気泡は電界によってほとんど駆動されず、気泡の微細化現象が起こらないため、この気泡が破壊電圧に与える影響は直流交流電圧印加時に比べ非常に大きくなることを述べた。

最後に、第7章では、第3章から第6章までを総括し、本研究で得られた結果のまとめと今後の課題について述べた。

論文調査の要旨

近年、高温超伝導材料と線材製造技術の発展により、高温超伝導の電力機器への応用が本格的に検討されるようになってきた。この場合、現在の電力システムでは、超伝導機器は常電導機器と併用することになるので、その適用は常電導機器では実現できない分野または常電導機器に勝る性能を発揮できる領域に限られ、具体的には、高温超伝導限流器と高温超伝導変圧器の開発が先行している。高温超伝導電力機器は、線材の性能と関係して超伝導部の冷却は液体窒素の浸漬冷却になり、液体窒素は冷却材と電気絶縁媒体を兼ねることになる。超伝導機器ではクエンチを皆無にできず、徳に超伝導限流器ではクエンチを積極的に利用するので、冷媒液体中に熱的気泡が発生し、機器内の高電界と合わせて電気絶縁上極めて厳しい状況が出現することになる。これに関してすでに、液体窒素中の熱気泡直流破壊現象について九州大学で一連の研究がなされている。

著者は、実用高温超伝導機器の絶縁環境を考慮して、ヒータを埋め込んだ水平円筒対平板電極系に絶縁物が存在するときの模擬クエンチ環境下における直流、交流、インパルス破壊現象を実験で調べると共に、気泡挙動の解析を行い、多数の新しい知見を得ている。本論文は、それらの成果をまとめたもので、次の諸点で評価できる。

第一に、広範なギャップ長のもとで直流、交流、インパルス電圧印加時の気泡軌跡を数値計算によって求め、ギャップ中における気泡挙動を推定している。その結果、破壊電圧に近い直流電圧印加時には、ギャップ長が短いときには気泡に作用する電界の勾配力が浮力と平衡して気泡の集塊が起こるが、ギャップ長が長くなると平衡が達成されず、気泡集塊が起こらないことを指摘している。また、交流電圧で周波数が低いときは、気泡運動が電圧変化に追従するので気泡軌跡が気泡発生時

における電圧位相に著しく影響されるのに対し、周波数が60Hz程度に高くなると気泡挙動が交流電圧実効値の直流電圧印加時に近くなることを明らかにしている。さらに、標準雷インパルス電圧印加時の気泡挙動は、電圧印加にほとんど無関係であることを示している。

第二に、電極表面に絶縁フィルムが粗に巻かれているときの気泡挙動と熱気泡トリガー直流破壊特性を実験で調べている。まず、フィルムが電極から液体窒素への熱伝達を阻害するため、その端部における熱気泡発生を助長すること、電界は発生気泡を微細化する作用と共にその勾配力によって気泡集塊を誘起することを見いだしている。つぎに、液体窒素中で沸騰が開始されると破壊電圧が低下し、活発な核沸騰を起こすヒータ入力において飽和窒素ガスの値まで破壊電圧が低下することを示している。とくに、フィルム複合絶縁系でフィルムに小孔が形成されると、気泡トリガー破壊電圧の低下が顕著になり、フィルム上の小孔は電気絶縁にとって極めて厳しい弱点になることを明らかにしている。

第三に、電極間にFRPスペーサが存在するときの熱気泡トリガー直流破壊現象を実験で調べている。スペーサがある場合、スペーサ沿面の電極系に対する配置によって気泡挙動が変わることを指摘し、沿面が垂直、水平下向き、水平上向きの場合について実験し、沿面が下向きの時に気泡が沿面上にトラップされやすく、気泡による破壊電圧の低下が最も大きいことを示している。さらに、前の破壊によって形成された気泡ならびにFRP沿面炭化の次回以降の破壊電圧に対する影響を調べ、特に、炭化によって破壊後の耐電圧回復が1/2以下に低下するので、超伝導機器に使用するFRPの沿面放電による炭化に注意することが大切であることを指摘している。

第四に、熱気泡トリガー破壊現象に対する電圧波形の影響を実験で調べている。まず、交流電圧印加時の熱気泡トリガー破壊電圧は、最短ギャップ領域の気泡形状に密接に関係しており、同一実効値で周波数を変化させたとき気泡の最大変形量は周波数が低いほど大きくなり、このために周波数の低下と共に破壊電圧が低下し、直流破壊電圧に接近することを見いだしている。インパルス電圧印加時には、気泡に電界が作用する時間が短いため、気泡の微細化が生じないため、直流および交流電界印加時より気泡が大きくなる。破壊電圧は、インパルス電圧印加瞬間に気泡が最短ギャップ領域に存在するか否かに依存するので、気泡トリガー破壊電圧のばらつきが直流と交流の場合より大きくなることを示している。

第五に、熱気泡が存在するときの破壊電圧確率分布、破壊遅れなどの破壊統計現象を実験で調べ、破壊電圧分布の標準偏差が沸騰開始近傍のヒータ入力時に大きくなること、破壊統計遅れが気泡の発生によって急に減少することを示し、これらが最短ギャップ領域における気泡

の存在ならびに気泡中の高い初期電子生成確率に関係していることを指摘している。

以上要するに、本研究は、高温超伝導電力機器のクエンチ環境下における熱気泡挙動を実験と理論によって解明し、直流、交流及び雷標準インパルス電圧に対する気泡トリガー電気破壊の機構と特性を明らかにしている。本論文は、それらの成果をまとめたもので、電力工学上価値ある業績である。よって、博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 諸岡 泰成 (福岡県)
 学位記番号 シ情 博甲第64号(工学)
 学位授与の日付 平成11年3月25日
 学位論文題名 配電線の避雷性能および沿面放電型避雷器の開発に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 原 雅 則
 (副査) // // 平 澤 宏太郎
 // // // 渡 辺 征 夫

論文内容の要旨

電気事業への競争原理の導入と、更なる電気料金の低減が求められる中、需要家の期待に応え、かつ企業としての競争力を身に付けていくために、電力会社は更なる経営全般の効率化を図る必要がある。このために、電力流通設備の信頼度と設備費に密接に関係する雷害対策を取り上げ、設備の現状と雷事故の発生状況について調査した。その結果、配電線における絶縁電線の断線事故が雷事故箇所別構成において高い比率を占めていることが分かった。さらに、断線事故防止のために、現在実施している架空地線と避雷装置を併用する雷害対策手法(以下現行手法)が、配電線のフラッシュオーバー対策あるいはAC統流遮断対策として十分に機能していないことが明らかになった。以上の背景のもと、本研究では、まず現行の雷害対策手法について、誘導雷、直撃雷の両面からその避雷性能を調査し、その結果にもとづき、実用性のある沿面放電型避雷器の開発を行った。本論文はその成果をまとめたもので、次の様な内容である。

まず、誘導雷に対する避雷性能については、多導線系誘導雷現象解析プログラムを用いて解析し、縮小モデル実験によりその解析手法の妥当性を確認した。これらの研究を通して、現行手法の誘導雷電圧抑制効果は、従来言われてきた結果と異なり、避雷装置単独の効果に近いこと、架空地線の接地間隔が避雷装置の設置間隔より短い場合にのみ、架空地線の効果が現れることを明らかにした。九州電力の様に避雷装置の設置密度の高い配電線(2径間に1箇所以上の割合で避雷装置を設置済み)にお

いては、誘導雷に対して架空地線の併用効果がほとんどないことを指摘した。さらに、2径間毎に避雷装置を設置した配電線においては、架空地線がなくても、かなり大きい雷が配電線近傍に落雷した場合でも、がいしがフラッシュオーバーするような電圧は発生しないため、誘導雷に対する避雷性能が十分高いことを示した。これらの研究成果から、誘導雷に対して架空地線が省略できる可能性があること、絶縁電線の断線事故が、誘導雷ではなく直撃雷によって発生している可能性が高いことが明らかとなった。

次に、直撃雷に対する避雷性能については、実規模の模擬配電線を使った直撃雷の実験で検討した。これにより、1)現行手法の直撃雷に対する避雷性能は、雷撃柱に避雷装置が設置されているか否かの影響が大きいこと、2)避雷装置がまばらに設置された配電線は、直撃雷に対する避雷性能が低く、避雷装置を各柱に設置して初めて大きな効果が得られること、3)架空地線の併用効果は、避雷装置の設置がまばらな場合に、フラッシュオーバー抑制の効果が現れるが、避雷装置を各柱に設置した場合には、その効果はなくなることなどを明らかにした。以上の結果から、架空地線が設置され、避雷装置が2径間に一箇所設置された配電線においても、直撃雷によりフラッシュオーバーする確率は約65%と高いことを指摘し、雷による断線事故の多くが直撃雷により発生している可能性が高いことを示した。

また、雷による断線事故を防止するには、避雷装置を全柱に設置する必要があるが、雷害対策費用のコストアップが懸念されるが、避雷装置による完全なフラッシュオーバー対策の実施により架空地線を省略しても避雷装置焼損事故を、現行雷事故件数の1/4程度に抑えることができるため、設備費を低減しながら、事故減少を図る事ができることを示した。その雷害対策の進め方は、落雷頻度が高く、直撃雷の発生確率の高いエリアを優先的に抽出し、避雷装置を各柱に設置していく手法が効率的であることも示した。しかし、避雷装置のみによる雷害対策手法は、冬季雷などの大きなエネルギーを持った雷に対しては、避雷装置の焼損率が増加することと、現行手法と比べコストダウン効果も小さい等の問題を有している。このことから、より一層のコストダウンと避雷装置焼損の課題を解決するために、絶縁電線の沿面放電特性を利用した断線防止対策手法(沿面手法)を考案し、雷インパルス電圧・AC電圧重畳実験を行い、その実用性を検討した。その結果、絶縁電線沿面を一定距離確保したフラッシュオーバーはAC短絡に移行しないため沿面手法が有用なこと、公称電圧6.6kVの高圧配電線においては、沿面距離0.75m以上において印加位相に関係なく、短絡回路は形成されないこと、沿面手法は瞬時に統流を遮断できるタイプの避雷装置(避雷手法)であること、系統の短絡電

流が沿面手法における必要沿面距離に与える影響は小さいことなどを明らかにした。

さらに、絶縁電線の沿面放電特性を求める実験から、沿面フラッシュオーバーが絶縁被覆に発生する電圧を抑制する効果は大きく、これにより、ある一定レベルの絶縁性能を持った絶縁電線は貫通破壊しなくなるが、沿面放電特性は印加電圧の極性の影響を大きく受け、沿面手法における必要絶縁厚さを押し上げる要因となっていることなどを明らかにした。さらに、沿面放電の光学観測により、沿面放電の進展様相が極性により異なっている事を明らかにし、その原因として、絶縁電線表面の電界が沿面放電の進展機構に深く関係していることを見出した。これを基に、沿面放電の極性効果を解消する二つの手法を考案し、その有用性を実験で確認した。

最後に、これまでの沿面手法に関する必要沿面距離と絶縁厚さ、沿面放電特性に関する実験研究を基に、沿面手法の実用化を目指した「沿面放電型避雷器」を開発した。沿面放電型避雷器は、その構造から本線の絶縁性能を必要としないこと、設置の作業性が良いこと、経済性に優れていることなどの特長をしており、実線路への適用に有用な方法である。開発した沿面放電型避雷器は、直撃雷に対する避雷性能をさらに向上させることが必要であるものの、安価で雷インパルス放電耐量の制約のない避雷装置を各柱に設置し、架空地線を省略した配電線雷害対策を行うことにより、設備費を大幅に低減しながら、電力供給信頼度を維持できる可能性があることを示した。

論文調査の要旨

電気エネルギーの高効率変換性ならびに高い制御性等の優れた特性のために、我が国の全エネルギー需要に占める電気エネルギーの割合は40%近くになり、日常生活ならびに生産活動において、一刻の停電も許されない状況になっている。したがって、電気エネルギーに対する高い供給信頼性の確保が要求されるが、一方で、エネルギー源の多くを外国からの輸入に頼っていること、電力分野に競争原理が十分に働いていないこと、電力供給信頼性を重視してコスト意識が低いこと等のために、電気料金が世界の先進国に比べて割高になっているとの指摘がある。この問題を解決するため、電力市場の自由化と高い電力供給信頼度を保ちつつコストを削減するための技術開発が緊急の検討課題になっている。

本研究は、高い電力供給信頼性を保ちつつ電力コストを低減することを目的として、配電線の雷害対策を検討している。すなわち、九州における電力システムの雷害統計を分析して電力供給信頼性と電力コスト面から効果的雷防御法の開発課題を明らかにし、従来の高価な半導体避雷装置に替わる配電線用沿面放電型避雷器を提案し

ている。さらに、その設計に必要な沿面放電を支配するパラメータを検討し、開発した沿面放電型避雷器を実規模実験によって試験し、その有効性を検討している。本論文は、それらの成果をまとめたもので、次の諸点で評価できる。

第一に、九州電力における配電線雷事故統計、雷事故箇所、線路用避雷装置の施設率と断線事故率の関係、および変圧器用避雷装置の施設率と変圧器事故率の関係等を分析して、現在設置している線路用避雷装置の断線防止効果ならびに変圧器保護用避雷装置の保護効果が不十分であることを明らかにし、避雷装置と架空地線の耐電性能に対する再検討の必要性を指摘している。

第二に、従来開発されていた多導線系誘導雷現象解析プログラムを架空地線と避雷装置を設置した配電システムに適用できることを縮小モデル実験で確認し、数値解析により架空地線と避雷装置の併用による誘導雷抑制効果は避雷装置単独の効果に近く、避雷装置を2径間ごとに設置すれば架空地線を除去しても誘導雷保護が可能であることを明らかにしている。

第三に、絶縁電線を使用した配電線の直撃雷による断線メカニズムを調べ、落雷時の誘起電圧により地絡アークが発生して交流アークに転移すること、および背後容量の大きい電力システムから大電力が交流アークに注入され、絶縁電線では導体上のアークスポットが移動しないため限定された場所に集中して溶断が起ることを見いだしている。さらに、断線防止には、交流アークを短時間で消滅させる手法が有効であることを指摘している。

第四に、交流アークを短時間に消滅させるには、落雷によって発生するアークを一定長以上に保持すればよいことを実験から見だし、6.6kV配電線の場合、1)アーク長を約75cmとし、2)アークを極性効果の影響を受けずに再現性よく成長させ、3)絶縁電線取付け碍子から約75cmの間は絶縁被覆が貫通破壊しないように絶縁強化することの3点が大切であることを実規模実験で確かめている。

第五に、第四で述べた成果を基に沿面放電型避雷器を提案し、それによって直撃雷による断線の回避が可能であること、開発した避雷器は取付けの作業性に優れ、従来の半導体避雷装置に比べて経済的であることを明らかにしている。

以上要するに、本論文は、配電線における架空地線と半導体避雷装置の誘導雷抑制効果、ならびに直撃雷による断線防止法について実験と数値計算により検討するとともに、高い配電信頼度を保持しつつコスト低減に繋がる新しい配電用沿面放電型避雷器を提案してその有効性を明らかにした結果をまとめたもので、電力工学上価値ある業績である。よって、博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 楠見尚弘(和歌山県)
 学位記番号 シ情博甲第65号(工学)
 学位授与の日附 平成11年3月25日
 学位論文題名 協調と共生現象を考慮した複雑システムのモデリングと制御に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 平澤 宏太郎
 (副査) " " 二宮 保
 " " " 長谷川 勉

論文内容の要旨

近年、システムの大規模化、複雑化及び計算機能力の向上にともないシステムのモデル化や制御に生物の特徴を積極的に活用する研究が盛んに行われている。特に、ニューラルネットワークやファジィ理論などの分野では融合研究も進みこれ等を統合したソフトコンピューティングという新たな枠組みが作られつつある。又、以前より、部分と全体の調和や協調を見出そうとするホロンの概念が提唱されているが、主にネットワークの構造や認識問題に対する研究が行われているだけであり、システムの制御に適用した研究は報告されていない。一方、生物の種間関係について競争・搾取・双利といった関係を含む共生という概念が盛んに生物学者の間で議論されている。しかしながら、このような共生現象を積極的にシステムのモデリングなどに活用する試みはまだまだ行われていない。

本論文では、このような協調や共生現象をシステムのモデル化や制御に適用することにより、柔軟な機能を有する新しいシステム技術の研究するための基本検討を行っている。

まず、第1章の序論では本研究の背景、従来研究と本研究の位置付け、目的および各章の概要を述べる。

第2章では、ホロンの概念をシステムの制御方式に展開するホロニック制御方式について述べる。ホロニック制御では、全体システムを幾つかのサブシステムに分割し、各サブシステムの自己主張と全体システムとの調和をホロニック係数の設定により実現している。また、各サブシステム間のインターフェイス値を決められた学習回数に入れ換えるが、この学習継続回数の違いが協調解獲得に及ぼす影響も検討している。提案手法を非線形クレーンシステムに適用したシミュレーションの結果、ホロニック係数を小さくすると自己主張の強いシステムが、ホロニック係数を大きくすると自己主張が抑えられたシステムが可能となり、後者の方が協調解が得られやすいことを明らかにしている。また、学習継続回数を小

さくし、各サブシステム間の情報交換頻度を高くすれば、協調解が得られやすいこともシミュレーションにより明らかにしている。

第3章では、第2章の集中型ホロニック制御とは異なる分散型ホロニック制御方式を提案している。集中型ホロニック制御では、コントローラに故障などが発生した場合、全システムにその影響がおよぶという欠点がある。本章では、これ等の欠点を解決するため各サブシステム毎にコントローラを分散させた分散型のシステムにおいて協調解を得るための方式、具体的には、前記ホロニック係数と学習継続回数を調整する方式の検討を行っている。ホロニック分散制御では、ホロニック係数及び学習継続回数を集中型制御より、より適切に設定する必要があるが、非線形タンクネットワークシステムのシミュレーションの結果、適切な協調解が得られ、分散化にともなう問題も克服できることを明らかにした。さらに、分散型ホロニック制御にファジィ評価を導入することにより、ホロニック係数と学習継続回数の設定が容易になる事を示している。

第4章では、生物がもつ共生現象をシステムのモデル化に活用する方式について述べている。具体的には、生物の共生関係をファジィルールで構成し、ファジィ推論によって得られた時変共生パラメータをLotka-Volterra生態系モデルに適用することにより、さまざまな現象を表現できるモデルが獲得出来る事を示している。これにより、実世界で確認されているカオス現象を表現できないという従来モデルの欠点を克服することが可能になった。具体的には、2種の捕食者-被捕食者系Lotka-Volterra生態系モデルでのシミュレーションの結果、共生パラメータに上・下限、前件部メンバーシップ関数のばらつきおよび後件部メンバーシップ関数の中心値とばらつきを変動させることにより、平衡点に収束する軌道やリミットサイクル、カオスの挙動を示す軌道などを表現できるモデルが得られることを明らかにしている。また、さらに追跡・離散パラメータによって各種の位置変動をも考慮する競争系Lotka-Volterra生態系モデルを提案し、位置変動を考慮しない場合には絶滅する種が、追跡・離散パラメータを活用する事により共存が可能になることを明らかにしている。

第5章では、RasID学習法を導入したLotka-Volterra生態系モデルについて述べている。第4章で提案したモデルではパラメータが多数あるため、これらパラメータをいかに設定するかという問題が生じる。このため、獲得したい現象を評価指標として与え、学習によってパラメータを自動調節する方式を提案している。評価指標としてはシステムの一般的な安定評価指標である最大リアプノフ指数を用いるため、評価指標が凸関数とならず、勾配法による学習は困難である。そこで、学習に

は勾配情報を必要としない RasID 学習法を用いることを提案している。第4章と同じモデルのシミュレーションの結果、最大リアプノフ指数を正になるようにパラメータを学習し、カオスの挙動が得られることを明らかにしている。

第6章で本研究で提案した手法とその検証により得られた成果を要約し、これを本論文の結論とした。

論文調査の要旨

近年、システムが複雑大規模化するに伴い、既存の制御理論の枠組では対応が困難な問題が増加しつつある。一方、生き物の世界を規範とするシステム論が古くから研究されており、1960年代には部分と全体の協調を図るホロニックの研究が、又、最近ではニューラルネットワーク、ファジィ理論、カオス理論、遺伝的アルゴリズム等、生命体の持つさまざまな機能を工学的に実現する研究が活発に行われている。

さらに、生物の種の間的基本的関係である競争、搾取、双利等の共生現象をシステムのモデル化と制御に取り込む研究も開拓されつつある。

ホロニックの概念はシステムを部分と全体からなる階層構成として把握し、部分の自己主張と全体の統合の中に平衡点あるいは協調点を見出すものであるが、この概念をシステム制御の分野にどのように展開していくのかが大きな課題であった。又、生物の種間の共生現象をモデル化する手法として、古くからロトカ・ボルテラ生態系モデルが検討されているが、このモデルでは実世界の生態系で確認されているカオス現象をモデル化するの不可能であった。

本論文は、ホロニックの協調概念と生物の種間関係にみられる共生現象とをシステムのモデル化と制御に導入し、その特性を明らかにしたもので、以下の点で評価出来る。

まず、第一は、部分の自己主張と全体の統合を基本とするホロニックの協調概念を非線形制御システムに展開した点である。非線形クレーン制御システムを例にとり走行系、振れ系、巻き上げ系の3個のサブシステムに分け、他サブシステムの動きを考慮する程度を表すホロニック係数を導入する事によりサブシステム間の協調を図っている。数値シミュレーションの結果、ホロニック係数を小さくすると自己主張の強いシステムが、ホロニック係数を大きくすると自己主張が抑えられたシステムが実現出来る事を定量的に明らかにしている。

第二は、ホロニック制御を集中型と分散型に分類し、それぞれの特性を明らかにしている点である。分散型の制御システムでは、各サブシステム毎に設けられた制御装置により、耐故障性の強いシステムが実現出来るが、自己主張と統合の協調が困難となる。そこで、分散型ホ

ロニック制御にファジィ評価を導入し、これにより、ホロニック係数の適切な設定が容易になる事を明らかにしている。

第三は、ロトカ・ボルテラ生態系の共生係数を時変にする事により、実世界の生態系をより適切にモデル化する方を提案し、その有効性を評価している点である。生物の種間関係を表現する共生係数をファジィ推論により構成し、ファジィ推論のパラメータを適切に設定すれば、安定解のみならず、頻繁に生態系で観察されるリミットサイクルやカオス現象をもモデル化出来る事を明らかにしている。

また、追従・離散パラメータを付加したロトカ・ボルテラ生態系を提案し、これにより通常のモデルでは絶滅する種が、追従・離散行動により絶滅を回避し、共生出来る事を明らかにしている。

第四に、前記ファジィ推論パラメータ、追従・離散パラメータを学習する方を提案し、ロトカ・ボルテラ生態系の安定性の検討を行っている点である。学習のための評価指標としては動的システムの安定性の一般的指標である最大リアプノフ指数を活用し、適応的ランダム探索学習方を適用する事により、ロトカ・ボルテラ生態系の挙動を安定軌道からカオスの軌道まで自在に実現出来る事を定量的に明らかにしている。

以上要するに、本論文は、ホロニックの協調概念と生物の種間関係にみられる共生現象をシステムのモデル化と制御に導入する方を提案し、その有効性を評価したものであり、制御システム工学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 韓 敏 (中国)
 学位記番号 シ情 博甲第66号(工学)
 学位授与の日附 平成11年3月25日
 学位論文題名 一般化学習ネットワークの構造最適化と汎化能力向上のための余剰パラメータの活用に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 平澤 宏太郎
 (副査) // // 二宮 保
 // // // 和田 清

論文内容の要旨

1940年代以降、システムに関する研究は飛躍的に進展し、現在、綿形システムについては、古典制御理論としてほぼその理論体系が整備され、電力、鉄鋼、交通、公共システム等各種産業システムに多数応用されている。また、近年、制御対象の大規模複雑化と計算機の性能向

上に伴い、非線形動的システムについての研究が活発になり、脳の神経回路を模擬した人工ニューラルネットワークの開発とシステムへの応用研究が盛んにすすめられている。

ニューラルネットワークは誕生以来、家電、自動車、情報通信などさまざまな分野で活用され始めている。しかし、ニューラルネットワークでは、大規模な非線形ダイナミクスをモデル化し制御する際に、ネットワークの構造をどのように最適化するかあるいはネットワークの余剰のパラメータをどのように活用するか等の課題が残されている。

ところで、連続微分可能な任意の非線形処理ノードが、任意のサンプル遅れ時間を介して任意にマルチブランチ接続された離散時間型の学習ネットワークでシステムをモデル化すると、遅れ時間の把握が適切にできる等、比較的容易に物理現象、社会現象、経済現象等の非線形な複雑大規模システムをモデル化し制御することができる。このような一般化学習ネットワークが九州大学の平澤等により最近開発されている。本論文では、一般化学習ネットワークを利用して、不必要なブランチを削除し、遅れ時間を最適化するネットワークの構造最適化の方式の提案、および一般化学習ネットワークでは2次微分を容易に計算出来ると言う特徴を利用して、余剰のパラメータを有効に活用する方式の提案を行っている。

第1章の序論では本研究の背景、目的および各章の概要を述べる。

第2章では、一般化学習ネットワークでは、ノード関数を任意に設定出来る、又、ノードとノードの間にマルチブランチを備えることができるという点を考慮しネットワーク接続に関する構造最適化の研究を行っている。具体的には、処理ノード間のマルチブランチ上にスイッチング機構を設け、ネットワークのパラメータとスイッチング機構のパラメータを同時に学習することにより不必要なブランチを削除する手法を提案している。非線形動的システムの同定問題の計算機シミュレーションを行い、ネットワークのブランチ数と同定誤差との関係を定量的に評価し、提案手法の有効性を確認している。

一般化学習ネットワークの特徴のひとつはネットワークブランチ上の遅れ時間を任意に設定できることである。第3章では、この特徴を活用して、遅れ時間に関する一般化学習ネットワークの構造最適化の研究を行っている。遅れ時間の探索の方法として、パラメータの学習と遅れ時間の探索を交互に繰り返す手法を検討した。第2章と同様の非線形動的システムの同定のシミュレーションを行い、遅れ時間の探索を行う場合が行わない場合に比較して、ネットワークの表現能力が向上することを明らかにしている。更に、スイッチング機構の導入と遅れ時間の最適化を同時に行うことによりネットワークの汎化能

力も向上させることができることを明らかにしている。

第4章では非線形動的システムの同定問題における、汎化能力を改善するために、一般化学習ネットワークの高次微分の特徴を利用してネットワークの余剰なパラメータを有効活用する方法を提案している。汎化能力を向上させるためにはネットワークの自由度を制限する方法が一般的であり、正則化理論を応用したものがその典型である。即ち、学習アルゴリズムの中で用いる誤差測度にネットワークの複雑度を制限するペナルティ項を付加し、これを最小化するように学習を行う方法がいくつか提案されている。本論文では、上記ペナルティ項として感度を考える Poggio の手法を動的システムにも適用出来るよう拡張している。動的システムにおける感度項に一般化学習ネットワークの高次微分計算法を展開し、ロボットの挙動をモデル化するシミュレーションを行った。その結果、提案した方式が動的システムの同定における汎化能力の向上に有効であることを明らかにしている。

第5章では本研究で提案した手法とその検証によりえられた成果を要約し結論としている。

論文調査の要旨

計算機の性能向上に伴い、各種のシステムを解析し設計する手法も、従来の解析的方式から数値計算的方式へと推移する傾向にある。制御工学の分野も例外ではなく、特に非線形システムを対象とした課題では、制御理論を活用するのみでなく、ニューラルネットワーク等のネットワーク技術を駆使し、学習により制御システムの最適化を図る研究が活発である。ネットワークを基礎におく制御技術では、制御理論に基づく手法に比較し、比較的容易に制御装置の設計が可能であり、このため、ニューラルネットワーク、ラジアル基底関数ネットワーク、ファジィネットワーク等の各種の方式が提案されている。また、これ等を統合した一般化学習ネットワークも提案されている。しかし、これらのネットワーク方式では、ネットワークのパラメータの学習が基本であり、ネットワークの構造の最適化の検討がそれほど進んでいない。また、ネットワークの規模を大きく設定しすぎると過学習の原因となる余剰パラメータが問題となる。

本論文は、一般化学習ネットワークの構造最適化と汎化能力向上のための余剰パラメータの活用方式の提案と評価を行ったものであり、以下の点で評価できる。

まず、第一は、微分可能な任意のノード関数を設定できる一般化学習ネットワークの特徴を活かし、ネットワークの各ブランチにスイッチング機構を設け、これにより、ネットワークの構造最適化を行う方式を提案しその有効性を評価している点である。通常の評価指標の他にブランチの接続・削除に関する評価指標を付加し、ネット

ワーク内の基本パラメータとスイッチング機構のパラメータを同時に勾配法により学習すると、ネットワークの規模と評価指標の間にバランスのとれたネットワークの構造最適化が可能になる事を明らかにしている。

また、この方式を非線形動的システムの同定問題に適用し、ネットワークのブランチ数と同定誤差との関係を定量的に評価し、提案手法の有効性を実証している。

第二に、一般化学習ネットワークのマルチブランチ上の遅れ時間の最適化を行う方式の提案とその有効性の評価を行っている点である。ネットワークのパラメータは連続変数であり、遅れ時間は離散変数である事を考慮して、パラメータの学習と遅れ時間の探索を勾配法とランダム探索法の組み合わせにより行う手法を具体化している。また、この最適化方式を上記非線形動的システムの同定問題に適用した結果、ネットワークの表現能力のみならず汎化能力も50%程度向上する事を明らかにしている。

第三は、一般化学習ネットワークの高次の微分計算法を活用して、ネットワークの余剰パラメータを汎化能力の向上の点で活用する方式を提案し、その有効性を評価している点である。

本論文では、正則化理論に基づき、動的システムの評価指標に対する入力 2 次微分を一般化学習ネットワークの順伝播計算法を活用して求め、これを通常の評価指標に加える事により、ネットワークの余剰パラメータを汎化能力向上のために有効活用する具体的方法を提案している。

また、この方式をロボットのダイナミクスと前述の非線形動的システムの同定問題に適用し、汎化能力向上の点で有効である事を明らかにしている。

以上要するに、本論文は、一般化学習ネットワークの構造最適化と汎化能力向上のための余剰パラメータの有効活用方式を提案し、その有効性を評価したものであり、システム工学に寄与するところが大きい。

よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。



氏名(本籍) 遠矢 弘和 (鹿児島県)
 学位記番号 シ情 博甲第67号(工学)
 学位授与の日附 平成11年3月25日
 学位論文題名 デジタル機器におけるデカップリング技術に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 二宮 保
 (副査) " " 西 哲生
 (") " " 安元 清俊

論文内容の要旨

情報化社会やマルチメディア社会への関心が高まりつつある。このような社会変化は、急速に向上し発展してきたデジタル技術またはコンピュータ技術に支えられていることは周知の通りである。デジタル技術は今や非常に広い製品領域に応用され、製造、サービス、官庁、学校、家庭、医療、放送、出版等多くの分野で広く使用されるようになってきているし、従来、アナログ技術に比べてデジタル技術を使う方が割高と考えられていた製品領域にまでデジタル化の浪が押し寄せている。

このようなデジタル技術の進歩とデジタル機器の普及に伴い、近年、デジタル回路から放射される電磁ノイズが周辺の放送受信機のみならず周辺の電子回路や電子機器の動作に干渉し誤動作を招いたり、外来ノイズによりデジタル回路自体も誤動作するといった、EMC(Electromagnetic compatibility)すなわち相互電磁干渉問題が注目を浴びている。なかでも、コンピュータに代表される高速で同期動作するデジタル回路から発生する広範囲の高調波スペクトルを含む電磁波がデジタル機器から漏洩し、主に放送用電波の受信を妨害するというEMI(Electromagnetic Interference: 電磁妨害)が問題となっている。情報化社会やマルチメディア社会の健全な発展を促すためには、半導体素子から装置、システムに亘って、高速高密度デジタル技術に適した新たな相互電磁干渉抑制技術を早急に確立することが必要になっている。

本論文は、デジタル機器における相互電磁干渉問題の原因がデジタル回路の駆動電流を供給する直流電源分配回路にあることに着目し、それを確認するための微小ループによる電流測定および波形解析技術を開発し、更に、相互電磁干渉抑制技術として高性能デカップリング技術を提案し、その有効性を実証した成果をまとめたものであって6章から構成されている。

第1章は序論であって、コンピュータを中心として発展してきたデジタル技術はマルチメディア時代を迎え、その応用領域を急速に拡大しつつあるが、デジタル技術の発展の過程で相互電磁干渉抑制に関する技術への注力が十分とはいえない現状を紹介し、このために発生している相互電磁干渉問題について総論的に述べている。

第2章では、デジタル機器を構成する諸回路の特徴について、相互電磁干渉の観点から述べている。TTL型回路においては信号の電圧波形と電流波形がほぼ相似であることから、相互電磁干渉を含めた回路の解析は電圧波形を対象として行われてきた。しかし、近年広く用いられているCMOS型回路における回路電流は、キャパシタの充放電電流とコンプリメンタリ回路部の貫通電流であって、信号電流波形は電圧波形と相似ではない。また、

信号伝送線路は高周波を扱っているにも拘わらず線路構造が一様ではなく、したがって線路の特性インピーダンスも定まっていない。このように、相互電磁干渉を含む回路解析が極めて複雑となることを述べている。

第3章では、電磁波の発生メカニズムをダイポールモデルとループモデルとに分けてその特徴を述べ、ダイポールモデルならびにループモデルから導かれる電磁放射を表す式を導いている。その結果、デジタル回路を構成する閉回路の一つ一つの大きさ(ループ面積)を回路電流の波長に比べて十分に小さくすることにより、デジタル回路からの電磁放射を抑制できること、また、閉回路間の信号伝送線路にマイクロ波の分野で確立されている相互電磁干渉の少ない伝送線路構造を採用することで、さらにデジタル回路からの電磁放射を抑制できることを述べている。これに加えて、閉回路のすべてに接続される直流電源供給線路に着目し、この線路を閉回路毎に高周波分離(デカップリング)することが電磁放射抑制に必要であることを述べている。

第4章では、高速高密度デジタル回路の解析には、細部にわたる近傍磁界及び回路電流の計測が必要であるとの観点から、世界初の微小ループプローブを開発し、このプローブの応用について電磁界分布の計測解析技術と回路電流の計測解析技術の分野に分けて述べている。電磁界分布の計測解析技術分野については、プローブにより測定されたプリント回路基板やLSIパッケージ内の複雑な磁界分布から注目すべき箇所を絞り込むための方法として、離散値系直交ウェーブレット変換が有効であることを実例により述べている。一方、回路電流の計測解析については、デカップリング設計に必須となるICやLSIの高周波電源電流測定に、開発したプローブが極めて有効であること、また、この測定技術が国際標準として検討中であり、測定装置の事業化も開始されたことを述べている。

第5章では、高速高密度デジタル回路に適する高性能電源デカップリング強化回路技術を提案している。これは、プリント回路基板に微細に加工されたインダクタとキャパシタにより閉回路間の電源デカップリングを強化する回路技術であり、実際のデジタル機器に適用した結果、コモンモード電流の減少により放射電界強度が大幅に減少すると共に、外来電磁波に対する耐力(イミュニティ)も大幅に向上したことを述べている。

最後に第6章では全体を統括している。

論文調査の要旨

近年、デジタル技術の進展とデジタル機器の普及に伴い、デジタル回路からの電磁放射ノイズが放送受信機のみならず周辺の電子回路や電子機器の動作に干渉して誤動作を招くという、いわゆる電磁干渉問題が注目を浴び

ている。この問題は、現在、デジタル回路から発生する広帯域の周波数スペクトルを含む電磁波が漏洩し、主に放送用電波受信を妨害するという電磁妨害が中心になっているが、情報化社会やマルチメディア社会の健全な発展を促すためには、半導体デバイスからシステムまで全般に亘って、高速高密度デジタル技術に適した新たな電磁干渉抑制技術を早急に確立することが要求されている。

本研究は、このような背景の下に、デジタル機器における電磁干渉問題の主要因の一つがデジタル回路の駆動電流を供給する電源分配線にあることを検証し、更に、その結果に基づき新しい電磁干渉抑制技術を提案し、その有効性を実証したものである。その成果は、以下の点で評価できる。

第一に、デジタル機器を構成する高速高密度デジタル回路の寸法が電流の波長に比べて十分小さい場合には電磁放射がないとの想定のもとに、デジタル回路の駆動電流を供給する直流電源分配部がこの条件を満足していないことに着目し、電磁干渉問題の要因が電源線にあると推定している。これは、デジタル回路において、従来不明確であった電磁干渉問題の発生源を特定したものである。

第二に、この推定を検証するために、微小ループプローブによるLSIの電流測定法を開発している。この微小ループプローブは、磁界検出の空間分解能として0.25 mmを実現し、従来技術の5倍以上の高分解能を達成している。更に、この微小ループプローブによるLSIの電流測定法が国際標準としてIEC(国際電気標準会議)へ提案されている。

第三に、微小ループプローブにより得られた電流測定データから電流分布の特徴を抽出するために、離散ウェーブレット変換による波数解析技術を開発し、その結果、上記推定の妥当性を実証することに成功している。

第四に、以上の結果に基づき、プリント配線基板の電源層に数百nHのインダクタを微細加工することによる高性能電源デカップリング強化回路を考案している。実際に、システムクロック周波数が40MHzと66MHzのコンピュータのプリント基板に適用した結果、1GHzまで測定された放射電界強度および外部接続ケーブルのコモンモード電流が約10dBと大幅に減衰することを確認し、電磁干渉抑制技術として優れた効果が得られることを実証している。更に、この電源デカップリング強化回路を施したプリント配線基板は事業化が進められており、実用面でも高く評価されている。

以上要するに、本研究は、デジタル機器を構成する高速高密度デジタル回路における電磁干渉問題の主要因の一つが電源分配線にあることに着目し、新たに開発した微小ループプローブによるLSIの電流測定法および特徴抽出技術を用いてその妥当性を確認し、更に、その結

果に基づき高性能電源デカップリング強化回路を考案し、電磁干渉抑制技術として優れた効果が得られることを実証したもので、電子システム工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位論文に値すると認める。

氏名(本籍) 深山幸穂(広島県)
 学位記番号 シ情博甲第68号(工学)
 学位授与の日附 平成11年3月25日
 学位論文題名 発電用石炭だきボイラの制御のための適応状態推定に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 平澤 宏太郎

(副査) // // 和田 清

// // // 長谷川 勉

論文内容の要旨

火力発電用ボイラでは1970年代後半より、負荷一定運用を前提とする原子力発電の増加に伴い、これを補完するための負荷変化性能が重視されている。また、石油ショック以降、発電用ボイラでは一般に性状のばらつきが大きい石炭が燃料の中心となり、ランダムなパラメータ変動系としての課題がクローズアップされてきた。石炭だきボイラは、伝熱面に囲まれた火炉、微粉炭バーナ、石炭粉砕機、火炉出口ガスによりタービン供給蒸気を加熱する過熱器、再熱器によって構成されている。このとき、プラント負荷変化性能の向上には、火炉伝熱面の熱吸収量がボイラ中最大であることより、その境界条件となる石炭粉砕機出口微粉炭流量と火炉出口ガス温度の制御が重要である。本論文では粉砕性、燃焼速度、灰の含有量等、石炭の性状の影響による前述の境界条件への外乱に対処するための適応状態推定に関する研究について述べる。本論文では、当該適応状態推定の具体的な実施形態として、動特性モデルを用いた石炭粉砕機制御サブシステムと、音響式ガス温度計を用いた火炉制御サブシステムとを特徴とするボイラ制御システムを提案し、これを適用したボイラ制御システムの大型発電用ボイラでの稼働実績から本提案の妥当性を示す。

第1章では序論として、火力発電プラントに係わる制御技術の発展経緯、および、新提案の石炭だきボイラ制御システムの位置づけを述べる。まず、火力発電プラントでは、ボイラ出口主蒸気、および、再熱蒸気温度を最大許容偏差 $+8/-12^{\circ}\text{C}$ 程度に制御する必要がある。1980年代前半まで主力の座にあった石油・ガス焚ボイラでは、燃料性状を一定に精製可能、バーナ供給燃料流量を実測可能、伝熱面汚れ小、火炉ガス温度変動小などの利点に基づいて、負荷変化時の蒸気温度変動を上述の許容偏差

内に維持可能な制御技術は確立されている。しかしながら、1980年代後半より主軸となった石炭だきボイラでは、各炭種銘柄ごとに制御設定値を切替えて燃料性状の相違に対処する炭種コード制御を実施した場合でも、負荷変化速度は、石油・ガス焚ボイラの $1/3$ 程度が限界であった。これは、バーナ入口微粉炭流量の計測困難、石炭粉砕性による粉砕機応答時定数変動、石炭燃焼速度や伝熱面汚れによるガス温度変動など、石炭だきボイラ特有の厄介な特性が原因である。従って、新提案の石炭だきボイラ制御システムは、石炭粉砕機出口微粉炭流量と火炉出口ガス温度について適応オブザーバーを構成し、炭種コードで先験的に把握不可能な系のパラメータ変動とその影響を同定、状態推定し、これをフィードバック制御に用い、石炭だきボイラの負荷変化性能の向上を目的とする。

第2章では石炭粉砕機制御サブシステムに搭載する粉砕機動特性モデルの特徴と精度検証の結果を紹介する。本サブシステムにおける状態推定では、石炭粒度分布の非ガウス性の高精度な模擬と、オンライン稼働のための計算負荷低減との両立が課題であった。そこで、本研究では、粉砕機内部の非線形な混合、粉砕、分級機構について、4次以下のモーメントによる石炭粒度分布変化のパラメトライズ法を開発して、この課題に対処している。すなわち、本モデルでは、粒度分布密度関数の重畳積分をキュムラントの和へ帰着させる等の手法が奏効し、区間分割と数値積分を用いた従来法に比して、状態ベクトル次数で $1/7$ 、計算負荷で $1/50$ 程度である。本モデルは粉砕機の確率システムとしての定式化に基づいて導出され、その解析精度はパイロット粉砕機に接続した蓄積式粉体流量計により定量評価した。

第3章では火炉制御サブシステムで用いる音響式ガス温度計について特徴と精度検証の結果を紹介する。本ガス温度計の原理は音波伝播時間の温度依存性を利用し、非接触、高耐久性、高精度の特長より、 1000°C 超の炉内計測に最有力である。しかしながら、従来の音響式温度計はバースト波やチャープ波の送出と炉内雑音を考慮しない信号検出法を用いており、性能的に中・小型ボイラの定常状態に適用が限定されていた。そこで、本研究では信号処理後の S/N 最大化の意味で、鋭い自己相関を有するM系列PRK(Phase Reversal Keying)波が炉内送出波形として最適であることを示した。さらに、本研究ではM系列PRK波の炉内送出機能と、受信側において炉内雑音AR(Auto Regression)同定に基づくマッチドフィルタによる信号検出機能を開発して、音響式ガス温度計の性能向上を達成した。本研究により、音響式ガス温度計は受信点 S/N が従来の $1/10$ 程度でも計測値の時間平均処理が不要となり、音波伝播距離が約3倍の大型発電用ボイラにおいて、過渡状態の火炉ガス温度計測が

可能になった。本温度計の計測精度は吸引式ガス温度計との比較により定量評価した。

第4章では石炭粉砕機、火炉の両制御サブシステムにおける同定・状態推定の枠組みを述べる。両サブシステムでは拡張カルマンフィルタを採用し、物理現象の記述が容易な連続時間の動特性モデル、及び、石炭性状等の未知パラメータの逐次変動を仮定している。当該拡張カルマンフィルタには、UD分解アルゴリズムによる推定分散・共分散行列の非負定値対称性の確保と、Pade(1,1)近似によるプラントモデルの絶対安定な時間離散化とを用いており、長期のオンライン稼動における安定な数値演算を継続している。

第5章では石炭粉砕機、火炉両制御サブシステムの機能検証について述べる。まず、両サブシステムによる石炭粉砕性、石炭燃焼速度、伝熱面汚れ度の同定機能について、実機試験を通じて実用性の確認を終えた。さらに、石炭粉砕機、火炉両制御サブシステムによる適応オブザーバは、国内最大級の1000MWe発電用ボイラで実用化された。本オブザーバを含む制御システムの効果検証のため、当該ボイラ試運転時に比較検査を行い、従来法において負荷変化時の主蒸気、再熱蒸気温度に、それぞれ、 $+5/-5^{\circ}\text{C}$ 、 $+5/-18^{\circ}\text{C}$ 程度の制御偏差が発生するケースにおいて、本提案法を用いれば、同、 $+3/-5^{\circ}\text{C}$ 、 $+5/-10^{\circ}\text{C}$ 程度への改善が確認されている。さらに、当該ボイラでは1997年7月以降、本オブザーバを含む制御システムを使用した、約1年間、約20炭種による頻繁な負荷変化を伴った商用運用を通じて、蒸気温度偏差 $+8/-12^{\circ}\text{C}$ 超過による警報発生は皆無であり、本論文の提案の妥当性検証は完了したと言える。

論文調査の要旨

負荷一定の原子力発電が増加するに伴い、1970年代以降、火力発電が負荷変動に対処する傾向にあり、従って、火力発電ボイラに負荷変動特性の向上が求められてきている。また、石油ショック以降、ボイラは石油・ガスだきボイラから石炭だきボイラに推移しつつあり、このため、各石炭の炭種のばらつきに対応した適応的な火力発電ボイラの制御方式の開発が期待されている。特に炭種が変更しても、ボイラ出口主蒸気および再熱蒸気温度を最大許容偏差 -12°C から 8°C 程度に制御することが求められている。

本論文は石炭粉砕機サブシステムと火炉サブシステムの適応的な状態推定を行うことにより、粉砕性、燃焼速度等、性状の異なる石炭が燃料となる場合でも、上記仕様を満足する火力発電ボイラの制御技術を確認したもので、以下の点で評価できる。

第一は石炭粉砕機サブシステムの動特性モデルを提案し、パイロット粉砕機で実証試験を行いモデルの妥当性

を確認している点である。粉砕機を石炭粉体粒度分布に基づいた確率状態方程式として定式化し、粉砕機出口の微粉炭流量の制御が可能となるように、システムの状態と未知パラメータを推定している。また、パイロット粉砕機に微粉炭流量計を接続した動特性試験との比較を行い、提案モデルが粉砕機サブシステムの動特性モデルとして十分な精度を持つことを確認している。

第二は、大型火力発電ボイラの火炉出口温度の制御に必須な音響式ガス温度計を開発している点である。音響式ガス温度計は音波伝播時間の温度依存性を活用したものであるが、大型ボイラの火炉ガス温度の計測を可能にするには、鋭い自己相関を有するM系列PRK波が炉内送出波形として最適であること、また、受信側においては炉内雑音AR同定に基づく信号の検出が温度計測の性能向上に効果的であることを明らかにしている。

また、開発した音響式ガス温度計が、従来より約3倍大型の発電ボイラに適用可能であることを1000MW級のボイラで実証している。

第三は、石炭粉砕機と火炉の両制御サブシステムの状態およびパラメータの推定に必要な適応的な状態推定法を提案しその有効性を評価している点である。状態推定には拡張カルマンフィルタを用いているが、数値計算誤差に係る不具合を防止するために、推定共分散行列の正定対称性の維持と逆行列演算を用いない工夫を行っている。その結果、長期安定なオンライン稼動に適した状態推定が実現できることを明らかにしている。

第四は、石炭粉砕機と火炉両サブシステムの状態推定と制御の結果を国内最大級の1000MW発電ボイラで実用化している点である。

発電ボイラの通常の運転において、ボイラ出口主蒸気および再熱蒸気温度の偏差が各々 -5°C ～ 3°C 、 -10°C ～ 5°C と目標仕様を満足しており、また、頻繁な負荷変動があり、かつ20炭種を利用する約1年間の商用運転においても、最大許容温度偏差違反の警報発生は皆無であり、提案方式の妥当性が検証される。

以上要するに、本論文は、石炭粉砕機と火炉の両サブシステムの適応的な状態推定を行うことにより、炭種の変更と負荷変動に対処可能な石炭だき発電ボイラの制御技術を確認したものであり、制御工学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 神田 豊 (福岡県)
 学位記番号 シ情 博甲第69号(工学)
 学位授与の日附 平成11年3月25日
 学位論文題名 超伝導伝送線路を用いた高速光変調器に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 吉田 啓二
(副査) 〃 〃 船木 和夫
〃 〃 〃 岡田 龍雄

論文内容の要旨

将来のマルチメディア時代に対応するための進行波型光変調器の最大の課題は、変調帯域の広帯域化と低駆動電圧化である。広帯域化のためには、電極を伝搬する変調波(マイクロ波)と光導波路を伝搬する光波の伝搬速度を一致させる必要がある。低電圧動作のためには、電極間隔を狭くし、電極の幅を光導波路程度に細く設計する必要がある。しかし、狭い電極間隔は線路の特性インピーダンスの低下の要因となる。また常伝導電極幅を細くすると高周波領域において導体損が増加する。この結果、変調帯域幅が減少する。さらに、低電圧動作のためには、光出力をon/offするのに必要な駆動電圧(半波長電圧 V_{π} という)を小さくする必要がある。このために、光波とマイクロ波との相互作用長 L を長くしなければならない。しかし、 L の長尺化は導体損の増加を招くことになる。即ち、常伝導電極では、低駆動電圧化と広帯域化とはトレードオフの関係にある。特に、高周波動作になるほど、信号発生用のミリ波電源の出力は小さくなるため、高周波化にともなう低電圧化の要請はさらに厳しくなる。

超伝導体を光変調器の電極に用いると、超伝導体のマイクロ波帯における低損失性と低分散性の特長から、常伝導電極を用いた場合の上記の問題点を飛躍的に改善できる可能性がある。

本研究は、高温超伝導体の代表的な一つである $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (以後、YBCOと略記)薄膜の表面インピーダンスのメカニズムを複素導電率を用いて評価している。その結果に基づいて、超伝導体を進行波型光変調器の電極を用いた場合の優位性について、シミュレーション結果より明らかにしている。さらに、低温超伝導体の一つであるNbN電極を用いて、光変調器を製作し、本デバイスの高性能化を実験的に検証している。

第2章では、変分原理に基づいた方法によりYBCOコプレーナウェーブガイド線路の数値解析を行い、その電流分布は磁場侵入長 λ と中心導体幅が小さいほど、中心導体の端部に集中することを示している。この計算結果を用いて線路のインダクタンスの膜厚依存性を評価し、中心導体の形状(線路幅・膜厚)が小さくなるほど、カイネティックインダクタンスの影響が顕著となることを示している。

また、進行波型光変調器の電極の伝送パラメータをキャパシタンスで表し、 SiO_2 バッファ層とシールド導体を併用することによって、特性インピーダンスと速度

整合の要求を同時に達成できることを明らかにしている。さらに、短パルス波形をコプレーナ電極に印加した場合、金電極の場合は、減衰が大きいのみでなく、速度分散により波形は原形を残さないほど崩れる。超伝導電極の場合には、線路長が長くなっても原波形を維持しており、波形の歪みもほとんどないことをシミュレーション結果より明らかにしている。

第3章では、第2章の数値計算より得られたインダクタンスと、コプレーナウェーブガイド共振器のマイクロ波伝送特性の実験結果を用いて、YBCO薄膜の有限温度における磁場侵入長と表面抵抗を評価するモデルを提案している。また、YBCO薄膜を粒部と粒界部とに分離し、それぞれの複素導電率の温度依存性から表面インピーダンスのメカニズムについて評価している。本手法は、複素導電率を用いた使い易い工学的モデルである。

第4章では、第3章から得られた超伝導体の高周波領域における低損失性に基づき、進行波型光変調器の電極として、超伝導体(YBCO, Nb)と常伝導体(Au)を用いた場合の電気的諸特性について、数値計算により比較・検討している。はじめに、光波とマイクロ波との相互作用長 L を長くするほど、低電圧動作がはかれることを示している。常伝導体では、 L の長尺化は伝搬損失の増大となり変調帯域を狭くする。超伝導電極では、 L の長尺化により性能指数(変調帯域/半波長電圧)が常伝導電極に比べて大幅に改善できることを明らかにしている。さらに、光変調器の光伝搬特性をシミュレートし、超伝導電極を用いた進行波型光変調器では、光出力波形の振幅の減衰と、波形歪みがほとんど見られないことを示している。これらの結果より超伝導電極を用いた進行波型光変調器が実現できれば、低駆動電圧化と広帯域化が可能となり、大幅な特性改善が図れることを明らかにしている。YBCO電極では小型冷凍機の使用が可能となることから、コストパフォーマンスの面で実用化に有利である。その場合、電極上にYBCOと相性のよい、例えば、YSZなどのバッファ層を積層する技術的課題がある。

第5章では、まず、電気光学結晶 LiNbO_3 (以後、LNと略記)の比誘電率の温度特性をマイクロストリップ共振器法により計測し、LNが極低温においても使用可能であることを確認している。また、LNにTiを選択拡散して光導波路を形成し、NbN電極を用いた進行波型光変調器により検証実験を行っている。次に、極低温実験における光ファイバーと光変調器との結合法を開発し、初めて超伝導電極を用いた光変調器の動作実験に成功している。また、半波長電圧の温度特性は、室温から極低温領域にわたってほとんど一定であることを明らかにしている。さらに、電極の導体損失を、マイクロ波伝送特性より評価し、超伝導体の低損失性を検証すると共に、マイクロ波変調実験において、本デバイスが60GHz(光3

dB)の広帯域特性を有することを明らかにしている。最後に、本研究結果の考察に基づいた新しい構造の光変調器を提案している。

第6章では、本研究の総括を行っている。

論文調査の要旨

高速光変調器は、来るべきマルチメディア社会を実現する大容量光通信のキーデバイスである。高速伝送のためにはチャージング特性に優れた外部光変調器が必須であるが、現状の常伝導電極を用いた進行波型外部光変調器は、変調帯域の広帯域化と低駆動電圧化の両立が困難という問題がある。光出力を on/off するのに必要な駆動電圧(半波長電圧 V_{π} という)を低くするためには電極間隔を狭くし、電極の幅を光導波路程度に細く設計する必要がある。しかし、常伝導電極では、電極幅を細くすると高周波領域において導体損が増加し、この結果、変調帯域幅が減少する。また、光波とマイクロ波との相互作用長 L を長くすることによっても低駆動電圧化が可能であるが、この場合も、 L の長尺化は導体損の増加を招くことになり帯域の減少をもたらす。即ち、常伝導電極では、低駆動電圧化と広帯域化の両立は矛盾する要求である。

本論文は、この問題を解決するために超伝導伝送線路を用いた光変調器を提案し、その性能を予測・実証したもので以下の点で評価できる。

まず第一に、変分原理に基づいた方法により $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (以後 YBCO と略記) コプレーナウェーブガイドの電磁特性を評価している。また、進行波形光変調器の電極の伝送パラメータを評価し、 SiO_2 バッファ層とシールド導体の併用による最適設計を明らかにしている。また、パルス波形を電極に印加した場合、超伝導電極の優位性をシミュレーション結果より明らかにしている。さらに、インダクタンスの計算結果と、コプレーナウェーブガイド共振器のマイクロ波伝送特性の実験結果より、YBCO 薄膜の有限温度における磁場侵入長と表面抵抗を評価するモデルを提案し、YBCO 薄膜を粒部と粒界面とに分離して、それぞれの複素導電率の温度依存性から表面インピーダンスのメカニズムを明らかにするとともにその値を評価している。

第二に、以上の結果を用いて、超伝導体と常伝導体を光変調器の電極に用いた場合の電気的諸特性について、数値計算より比較・検討している。性能指数(変調帯域/半波長電圧)の計算結果や、光伝搬特性のシミュレーション結果より、超伝導電極を用いた進行波形外部光変調器が実現できれば、低駆動電圧化と広帯域化が可能となり、大幅な特性改善が図れることを明らかにしている。

第三に、 LiNbO_3 (LN と略する) 結晶の比誘電率の温度特性を計測し、LN が極低温においても使用可能である

ことを明らかにしている。また、NbN 電極を用いた進行波形光変調器を作製し、極低温における光ファイバーと光変調器との結合法を開発している。この結果、初めて超伝導電極を用いた光変調器の動作実験に成功している。また、半波長電圧の温度特性は、室温から極低温領域にわたってほとんど一定であることを明らかにしている。さらに、電極の導体損失を、マイクロ波伝送特性より評価し、超伝導体の低損失性を検証すると共に、マイクロ波変調実験において、本デバイスが60GHz(光3 dB帯域)の広帯域特性を有することを明らかにしている。最後に、本研究結果に基づいて新しい構造の光変調器を提案している。

以上要するに、本研究は、来るべきマルチメディア時代に対応するため、超伝導電極を用いた光変調器を提案して、光変調器の低電圧化と広帯域化についてシミュレーションと実験により実証したものである。本研究で得られた成果は、高温超伝導デバイス、光変調器の設計と製作、およびその応用に関して新たな知見を与えるものであり、電子デバイス工学上寄与するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 池田 晃 裕 (佐賀県)
 学位記番号 シ情 博甲第70号(工学)
 学位授与の日附 平成11年3月25日
 学位論文題名 誘導結合型水素プラズマによりシリコン酸化膜に導入される損傷に関する基礎的研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 黒木 幸 令
 (副 査) " " 渡辺 征 夫
 " " 本岡 輝 昭

論文内容の要旨

近年超 LSI は高集積化、高密度化の方向で進んでいる。それに伴い LSI プロセスに対する要求も厳しくなってきた。デバイス構造の微細化に伴いより高速度のデバイス動作を実現するため、配線金属と下地層の Si や金属との接触抵抗の低減が求められている。一般的にコンタクトホールやビアホールの開孔には PFC(パーフルオロカーボン)系の反応性イオンエッチングが使用されている。PFC 系の反応性イオンエッチングでは下地層との高い選択比を達成するため、Si や金属の表面に有機薄膜を形成する。このような表面の有機残留物の除去が配線金属との接触抵抗の低減には重要となる。また、パターン微細化、高アスペクト比化に伴い、従来のウェット洗浄では薬液の侵入、乾燥が困難となるためドライ洗浄

が必要となっている。

現在、有機物のドライ洗浄法として紫外線励起のオゾンを用いたドライ洗浄が一部使用されているが、半導体や金属表面を酸化するという問題がある。このため表面を酸化したくない部分に水素プラズマの利用が考えられる。水素プラズマは低温で処理できるため特にAlなどの低融点金属の多層配線工程への適用に有効であると考えられる。

一方で、水素プラズマのデバイスへの照射は水素ラジカルによるSi表面の不純物の電気的な不活性化によるデバイス特性の変動を引き起こす。また水素イオンは原子半径が最も小さいため、表面から深い領域に渡ってSiO₂、Si中に変位に伴う損傷を引き起こすことが知られている。特に誘導結合型プラズマのような高密度の水素プラズマにおいてはプラズマ損傷がLSI洗浄プロセスへの適用において深刻な問題となる可能性もある。この様なプラズマ損傷はプラズマの電子温度やイオンエネルギー等と密接な関連性を持っている。従って、プラズマパラメータを評価し損傷低減のための指針を得ることが洗浄プロセスへの適用には重要である。

本論文は、誘導結合型水素プラズマを将来LSI洗浄プロセスに使用することを想定し、本論文は、プラズマパラメータの評価による低損傷の洗浄条件の検討、レジスト及び熱酸化膜のエッチングレートの評価による洗浄効率の定量的評価、Si表面での水素プラズマによる不純物の電気的不活性化のふるまい、さらに水素プラズマによりSiO₂に導入される欠陥の電気的な評価をまとめたもので全5章より形成されている。

第1章では本研究に関する技術背景、目的と意義、本論文の各章の構成を述べた。

第2章では、基板への損傷の少ない放電条件を検討するため、本研究で水素プラズマの発生に使用した誘導結合型プラズマ装置について、そのプラズマパラメータ、基板への入射イオンエネルギー、プラズマによる基板への2次汚染の程度などを評価した。その結果、今回研究で使用した誘導結合型プラズマ装置は大面積で均一、クリーンな水素プラズマの生成が可能であり洗浄装置として有効であることを示した。また、圧力の増加により基板へのイオン電流が低減できることも示した。

第3章では、超LSI洗浄工程への適用を念頭に、水素プラズマによる洗浄効率を定量的に評価するため、ノブラック系レジスト、熱酸化膜のエッチングレートの評価を行った。その結果、レジストは入射イオンエネルギーが25eV程度と低い条件でも60Å/min程度と表面洗浄への適用としては問題とならないと考えられるレートでエッチングされるのに対し、SiO₂はイオンエネルギーが低い条件では除去されないことを示した。さらに、拡がり抵抗法により水素原子のSi基板中への侵入分布の評

価を行った。その結果、入射イオンエネルギーが低く、ガス圧力が高いほど水素原子の侵入が少ないことを示した。

第4章では、水素プラズマが熱酸化膜に与える影響をMOSキャパシタを形成して調べた。水素プラズマによるSiO₂の絶縁耐圧の劣化、電荷捕獲中心の導入、界面準位アニールの効果などを電気的測定により評価した。またこれらの結果より誘導結合型水素プラズマの照射によるSiO₂への損傷導入の機構、損傷を低減するための放電条件などについて考察した。入射イオンエネルギーが25eV程度と低い条件においても3分間の照射でTDDB特性における絶縁破壊までの通過電荷量(Q_{BD})は照射前の1.44C/cm²から4.82×10⁻²C/cm²まで低下した。さらにrfバイアスを印加してイオンエネルギーを300eV程度にするとQ_{BD}は8.16×10⁻⁶C/cm²以下と大幅に低下した。また、水素プラズマの照射によりSiO₂中へ電子捕獲中心が導入されることが確認された。損傷を低減するには基板へのイオン電流量、エネルギーを低減することが有効であり、ガス圧力の増加によってQ_{BD}の劣化の程度が減少し、電子捕獲中心の導入が消えることが示された。さらに、N₂Oガスを用いて酸化膜を形成することにより水素プラズマによるQ_{BD}の劣化の程度を減少させることが可能であることを示した。

第5章では、今回の研究の総括を行った。

論文調査の要旨

超LSI加工では多様なプラズマが使われ、今やプラズマプロセスを除いてそれを語る事ができない。プラズマを用いると、分子・原子を解離、励起あるいはイオン化した状態で基板表面に供給でき、低い温度でエッチングやCVDが行える。また、プラズマプロセスには真空を用いるので、清浄な雰囲気中でウエハを扱え、表面・界面の状態制御が容易となる。そこで成膜、エッチングなどのプロセス装置をクラスター化して、真空一貫プロセスとする試みが始まっている。この場合、洗浄や界面処理も真空中で行いたいという要求が出てくる。ところで超LSI製造においては、その回路動作遅延を改善するため配線はより多層化される傾向にあり、多層配線間ビアホールは金属界面洗浄がますます重要となっている。

これらの洗浄技術開発においてもプラズマの利用が期待され、従来から、有機物除去には酸素プラズマが良く用いられているが、酸素は金属表面の導電性を失わせるという問題がある。このため光分解塩素による洗浄やHF蒸気洗浄なども提案されているが、この場合、装置が腐食され易いなどの問題がある。そこで、酸化や腐食のない水素プラズマの利用が期待され、一部化合物半導体デバイス製造には用いられているが、大量生産が求められる超LSI製造には、まだ処理速度が遅くその改善が望

まれている。処理速度向上には水素をイオンとして加速し、表面に物理的衝撃を与える方法が考えられるが、水素イオンは小さく、基板奥まで侵入してこの衝撃により基板に与える損傷の深さが深くなるのが懸念される。

本論文は、高密度で清浄なプラズマを生成できる誘導結合型プラズマ(ICP)装置を用いて、水素プラズマで表面・界面処理を行う際の、デバイスへの電気的特性への影響を調べ、最適なプラズマ条件を検討した結果をまとめたもので、以下のような知見を得ている。

(1) ICPプラズマ装置のプラズマ特性をラングミュアプローブ、マイクロ波干渉計、発光スペクトル等により測定し、洗浄処理に適するかどうかを調べている。実験に使用した装置は、例えば圧力3 Pa、アンテナ投入電力1 kWでは $1 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ 程度のプラズマ密度で、プラズマパラメータ変動が直径30cmに亘り $\pm 10\%$ 以内という洗浄処理に十分な一様性を持つことを明らかにした。また、プラズマに対して基板電位は50W以上のrf基板バイアス電力では160V以上と見積られ、プラズマから引き出されたイオンが SiO_2 に変位損傷を誘起するに十分な値となっていることから、なるべくバイアスを浅くすべきであることを見出した。さらに、MOSダイオードのC-t測定から基板に深い準位を作る金属汚染がないことを確認した。

(2)有機物が基板材料に対して選択的に除去できることを確認するため、ノボラックレジスト、Si、 SiO_2 のエッチング特性を調べている。レジストはバイアス電力とともにそのエッチング速度は増加するが、無バイアスの場合でも5 nm/minの速度でエッチングされること、一方、 SiO_2 、Siは無バイアスではエッチングされず、高エネルギーイオンによるものであることを見出した。

(3)水素原子、イオンの基板への侵入の程度を調べるため、膜厚の異なった SiO_2 を被覆したSi基板をプラズマに曝し、拡がり抵抗法により、界面近傍のSi基板中Bを不活性化している水素の分布を測定している。100W以下のバイアス条件では SiO_2 膜厚に依らず水素侵入の深さは浅いが、280Wのバイアスでは50nm厚の試料では深い位置のBが不活性化され、水素イオンがこれ以上の深さまで達したと推測できる結果を得た。

(4)電気的な影響を際立たせるため、薄いゲート酸化膜を持つMOSダイオードを製作して、高周波C-V特性、擬静的C-V特性、絶縁破壊に至る通過電荷耐量、瞬時絶縁破壊特性を測定し、プラズマが電気的特性に及ぼす影響を調べている。低い圧力で深いバイアスのプラズマでは界面準位が増大し、酸化膜中の中性電子トラップの数が増えた。逆に、高い圧力で浅いバイアスのプラズマでは水素アニールの効果が大きくなった。また、 N_2O を用いて熱酸化膜を形成すると、中性の電子トラップも少なく、破壊に至る通過電荷耐量もドライ酸化膜に比べて大

きくなることを見出した。

以上要するに、本研究は、水素プラズマを超LSI洗浄に適用するにあたって問題となる、いわゆるプラズマ損傷の程度を、最も影響を受け易いと考えられる薄いゲート絶縁膜を持つMOSダイオードの電気的特性で評価し、デバイスの電気的特性に悪影響を与えないプラズマ条件について知見を得たもので、電子デバイス工学上価値ある業績である。よって本論文は博士(工学)の学位に値するものと認める。

氏名(本籍) 張 依 群 (中国)
 学位記番号 シ情 博甲第71号(工学)
 学位授与の日附 平成11年3月25日
 学位論文題名 CoSi_2 ゲートMOS形トンネル電子放出素子の作製に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 鶴 島 稔 夫
 (副 査) " " 黒 木 幸 令
 " " " 吉 田 啓 二

論文内容の要旨

近年、真空マイクロエレクトロニクス分野への関心が高まっており、その実用化のために、高安定、長寿命で、かつ高電流密度の各種電子放出素子(電子エミッタ)の技術開発が行われている。前記の条件を満たす電子エミッタとして、絶縁膜障壁のトンネル現象を利用する金属-酸化物-半導体(MOS)形トンネル電子エミッタ素子が提案され、注目されている。薄い酸化膜に高電界をかけ、量子力学的トンネル効果によって電子を酸化膜の伝導帯に透過させ、対電極に導くもので、その際、電極の膜厚が十分薄ければ、この電極物質の真空準位を越えるエネルギーを持った電子が真空中に放出される。MOS形トンネル電子エミッタの利点は、原理的に面状の電子エミッションが可能であること、低真空動作が可能であること、エミッション電子のエネルギー分布が小さいことなどである。一方、高電界状態で、酸化膜中にFowler-Nordheim形のトンネル電子注入が行われるために、膜中に発生する電子トラップや、それに伴う電気的特性の経時変化が問題となる。

MOS形トンネル電子エミッタでは、薄いゲート絶縁膜及びゲート電極の材料の選択と、これらの成膜プロセスが、素子の電気的特性、安定性、寿命などに大きな影響をもたらす。これまで、シリコン(Si)表面に形成された酸化膜(SiO_2)を用い、ゲート電極としてアルミニウム(Al)、アモルファスシリコン(a-Si)などを用いた試みがなされているが、特に電極材料の選択については、未解決の課題が多い。

本論文は、 CoSi_2 が SiO_2 膜と良好な接合を形成し、 a-Si に比べて低抵抗のゲート電極を形成ができるほか、熱的、化学的に安定であり、デバイス動作において高い信頼性を期待できることに着目して、 CoSi_2 ゲート MOS 形トンネル電子エミッタ素子を作製するために、高品質トンネル酸化膜及び CoSi_2 膜の形成条件を探り、電子放出特性、効率、安定性、経時変化などの評価を試みた結果をまとめたもので、以下の6章で構成されている。

第1章では、研究の目的と背景及び論文の構成について述べている。

第2章では、高品質トンネル酸化膜の形成プロセスについて検討している。特に、膜の電気的特性に対する成膜プロセス条件及び熱処理条件の効果を調べて、 Si/SiO_2 界面に形成される遷移領域が主として酸化の初期段階で形成されるサブオキサイドで構成され、酸化膜の絶縁耐圧の低下、リーク電流の増大、障壁高さの減少、などに関与することを示す。また、この遷移領域に対する熱処理の効果について論じ、成膜後の熱処理によって遷移領域幅を有効に減少できることを実験的に明らかにするとともに、この遷移領域幅減少の機構に関するモデリングの提案と検証を試みる。

第3章では、薄い酸化膜上への導電膜形成のプロセスを検討している。超高真空中での Co 及び Si の分子線を用いた同時堆積法による CoSi_2 膜形成を試み、導電特性向上のための成膜条件の最適化を追求する。 Co ビームと Si ビームの強度比を1対2として堆積を行うことにより、室温～ 400°C の範囲で CoSi_2 膜を形成できること、 400°C で形成した膜厚10～44nmの CoSi_2 膜はバルク CoSi_2 の抵抗率に近い値を持つこと、などを示し、さらに、堆積温度 300°C 及び 400°C で形成した MOS 構造では、安定した Fowler-Nordheim 形トンネル電流が観測されることを明らかにする。

第4章では、MOS 形トンネル電子エミッタの動作原理とその形成プロセスについて述べている。第2章及び第3章で明らかにしたトンネル酸化膜及び極薄 CoSi_2 膜の形成プロセスを用いて、実際に CoSi_2 ゲート MOS 形トンネル電子エミッタを形成する各段階のプロセスの最適化をはかり、電子エミッタとしての機能を評価するプロトタイプデバイスの試作プロセス構成を示す。

第5章では、試作した CoSi_2 ゲート MOS 形トンネル電子エミッタの特性パラメータを評価する。エミッション電流及びエミッション効率のゲート電極膜厚、ゲート酸化膜の形成条件、及び測定雰囲気の高真空度に対する依存性、これら特性の電流ストレス経時変化などの測定結果を示す。 SiO_2 膜中の電子のトンネリングに対応して、真空中への電子のエミッションが観測され、エミッション効率は約 1.4×10^{-4} 、真空度 $1 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-6}$ Torr の実験範囲で、100分間の電流ストレス試験に耐え

る安定性を有することなどを明らかにする。

第6章では、本研究全体を総括し、今後の課題について述べている。

論文調査の要旨

近年、真空マイクロエレクトロニクス技術が注目を浴び、平面型ディスプレイをはじめ、広範な応用分野が期待されることから、各種の電子放出素子の研究開発が活発化している。その一環として、絶縁膜障壁のトンネル現象を利用した金属-絶縁物-金属(MIM)あるいは金属-酸化物-半導体(MOS)構造のトンネル電子放出素子の研究が進められている。この素子は、原理的に面状の電子放出が可能であり、放出電子のエネルギー分散が極めて小さい、などの点で通常の電界放出型電子放出素子にない特質をもっている。

MOS 形トンネル電子放出素子では、薄いゲート絶縁膜およびゲート電極の材料の選択と、これらの成膜プロセスが、素子の電気的特性、安全性、寿命などに大きな影響をもたらす。これまで、 Si 表面に形成された酸化膜(SiO_2)を用い、ゲート電極として Al 、 a-Si などを用いた試みがなされているが、特に電極材料の選択については、未解決の課題が多い。エミッション効率の向上と素子の長寿命化をはかるために、極めて薄くかつ十分導電性の高い、また、長期の安定性に優れた電極材料が必要とされるからである。

この論文は、 CoSi_2 をゲート電極材料として、高品質トンネル酸化膜およびゲート電極膜の形成条件を探り、 CoSi_2 ゲート MOS 形トンネル電子放出素子を作製して、その特性評価を行った結果をまとめたものである。

著者はまず、構造欠陥の少ない界面を有する薄い SiO_2 膜の形成に資するため Si/SiO_2 界面近傍に生じる遷移領域に着目して、膜のリーク電流、障壁電位、絶縁破壊電圧などに対する成膜プロセス条件および熱処理の効果調べ、成膜後の熱処理によって遷移領域幅を有効に減少できることを明らかにするとともに、この効果を説明するための独自のモデリングの提案を試みている。

次に著者は、分子ビーム堆積法により、極薄 SiO_2 膜上に薄い CoSi_2 膜を堆積し、 CoSi_2 膜の形成法と膜構造および導電特性との関係、 CoSi_2 ゲート MOS 構造の極薄 SiO_2 膜で観測されるトンネル電流の電界依存性などにつき、実験的に詳細な分析を試みている。この結果、 Co ビームと Si ビームの強度比を1対2として、 Co と Si の同時堆積を行うことにより、広い範囲の堆積温度および堆積時間にわたって、 CoSi_2 膜の形成が可能であることを示している。また、堆積温度 400°C で形成した膜厚10～44nmの CoSi_2 膜の抵抗率は、バルク CoSi_2 の抵抗率に近い値を示し、実効的に膜厚に依存しないことを示している。さらに、堆積温度 300°C および 400°C で形成し

たMOS構造では、明瞭なFowler-Nordheim形トンネル電流が観測され、Si/SiO₂界面の障壁高さは、それぞれ2.8eVおよび3.0eVで、理論的にもほぼ妥当な値が得られることを示している。

これらのデータに基づき、著者はさらに、トンネル電子放出素子としてのMOS構造の設計、製作を行い、そのダイオード電流-電圧特性、電子放出特性、エミッション効率、およびこれらの径時変化の評価を試みている。この結果、CoSi₂膜の厚さ10nm、20nmのいずれの場合にも、SiO₂膜中の電子のトンネリングに対応して真空中への電子放出が観測され、10⁻⁴以上のエミッション効率が得られること、真空度1×10⁻⁴~6×10⁻⁶Torrの範囲で、100分間までの電流ストレス試験に耐える優れた安定性を有すること、などを実証している。

以上要するに、本研究は、MOS形トンネル電子放出素子の極薄酸化膜形成条件を実験的に明らかにするとともに、ゲート電極材料に初めてCoSi₂を採用して、そのトンネル酸化膜上への成膜プロセスの最適化をはかり、高効率で安定な電子放出の可能性を拓いたもので、電子デバイス工学上寄与するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 楢下篤志(広島県)
 学位記番号 シ情博甲第72号(工学)
 学位授与の日付 平成11年3月25日
 学位論文題名 イオン照射による酸化膜上へのCoSi₂形成とその細線加工応用に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 鶴島 稔 夫
 (副査) 〃 〃 渡辺 征 夫
 〃 〃 〃 本岡 輝 昭

論文内容の要旨

半導体素子の微細化に伴い、その製造工程に用いられるプロセスにはより精密な加工精度が求められている。また、素子性能向上のために、現在電極や配線に利用されている多結晶Siを、さらに低抵抗率の金属シリサイドに置き換える研究が進められている。しかし、酸化膜上にCoSi₂細線構造を形成する有効な手段はなかった。酸化膜上のCo/Si₂堆積層へ選択的にイオン照射を行うことにより、酸化膜上にCoSi₂細線構造を形成できる可能性がある。酸化膜上にCoSi₂細線構造を形成できれば、MOSFETのゲート電極や量子細線などの新しいデバイスへの応用が期待できる。

本論文は、イオン照射によって起こる固相原子混合反応を、酸化膜上にCoSi₂細線構造を形成する半導体プロ

セスに適用する可能性を論じたものであり、6章から構成されている。

第1章では、研究の背景と目的および本論文の構成と要旨について、とりまとめて述べた。

第2章では、酸化膜上に堆積したCo/Si層に熱処理およびイオン照射することによりシリサイドを形成し、この堆積層へのイオン照射によるシリサイド形成機構を調べた。また、充分低い抵抗率をもったCoSi₂層を形成するための条件を明らかにした。X線回折測定の結果、熱処理では500、600°CでCoSiが、700°CでCoSi₂が形成され、イオン照射では300°C以上でCoSi₂が形成されることを示した。また、イオン照射による形成ではCo₂SiやCoSiは形成されなかった。元素含有率の深さ方向分布測定結果は、イオン照射による原子混合は200°Cの試料温度で充分均一であることを示した。しかし、抵抗率がCoSi₂として期待される値となるのは700°Cでイオン照射した試料のみであった。このことから、イオン照射による電子混合は比較的低温で効果的に行われるが、CoSi₂の直接形成の割合は小さく、照射による損傷形成効果もあることから、充分低い抵抗率のCoSi₂層の形成には、熱処理による形成と同じ700°Cの試料温度が必要であることが分かった。また、イオン照射により形成したシリサイド層は、照射による原子混合が層全体にわたって均一に行われれば、混合層中の元素含有率により決まるシリサイド相となることが明らかとなった。

第3章では、イオン照射によるCoSi₂層中での損傷形成について、照射率による違いに注目し、照射によって被照射物質中に形成された点欠陥が再結合または複合欠陥の形成により安定化するまでの緩和過程を、新しく提案したモデルと実験結果の比較により議論した。シリサイド中に形成された点欠陥の緩和過程が進行する領域を半径 r の円筒領域で近似し、緩和過程の持続時間を τ とすると、照射率が特性値 $1/(\pi r^2 \tau)$ 以上となると損傷形成量の照射率依存性が顕著になる。CoSi₂層へ照射率の異なるAr⁺イオン照射を25keVの照射エネルギーで行った結果、24°Cの試料温度での特性照射率は $7.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 程度であることが示され、緩和過程の持続時間は200 μs 以下であることが明らかとなった。

第4章では酸化膜上に堆積したCu/Si層にイオン照射を行いCoSi₂を電極としたMOS構造を作製し、電気特性を測定することによりイオン照射によるCoSi₂電極形成が酸化膜に及ぼす影響を解明した。容量測定の結果から、イオン照射により酸化膜中に導入される欠陥は正に荷電しており、膜中電荷と界面準位はイオン照射による酸化膜へのエネルギー蓄積が小さくなる照射条件を選ぶことにより低減されることが分かった。しかし、CoとSiの原子混合が充分でない実験条件では、リーク電流が増加し、絶縁破壊電圧も低下することが分かった。し

たがって、イオン照射により形成した CoSi_2 を MOS 構造のゲート電極に用いるには、照射イオンが酸化膜に形成する損傷を低減すると同時に、十分な Co と Si の原子混合がもたらされるプロセス条件を選ぶことが必要であることが明らかとなった。

第5章では FIB によるイオン照射を利用して、酸化膜上に CoSi_2 細線構造を形成する方法を明らかにした。まず、非照射部分の未反応 Si を選択的にエッチングする方法について検討した。その結果、 160°C の熱リン酸により数分間のエッチングを行うことで、未反応 Si を選択的に取り除くことができることが分かった。次に、FIB 照射と熱リン酸による選択エッチングを併用して、 CoSi_2 細線構造の形成を試みた。第2章の結果に示された CoSi_2 形成温度である 700°C の熱処理で形成した線構造は、 $100\sim 200\mu\Omega\text{cm}$ と比較的大きい抵抗率であった。一方、 900°C の熱処理を施すと、 CoSi_2 の固有抵抗率に一致する抵抗率の細線構造が形成できた。単一線状に FIB 照射し、 900°C の熱処理を行うと、線幅の均一性や再現性に改善の余地があるものの、線幅 200nm 程度の CoSi_2 細線構造が形成できることが明らかとなった。

第6章では本研究全体を総括し、FIB イオン照射による CoSi_2 細線構造形成の可能性を指摘し、今後の課題についていくつかの指摘を試みた。

論文調査の要旨

半導体素子の微細化に伴い、その製造工程に用いられるプロセスには、より高い加工精度が求められている。また、素子性能向上のために、現在、電極や配線の一部に利用されている高融点金属シリ化物(シリサイド)の重要性が増大している。高融点金属シリサイドは、通常、シリコン(Si)と高融点金属のスパッタリングや CVD、Si/金属薄膜積層構造の高温熱処理などによって形成されるが、イオン照射による固相原子混合反応を用いて、比較的低温で形成できることが知られている。イオン照射を用いる金属シリサイド形成は、反応領域を照射によって特定できるという利点を有する。このため、照射の手段として集束イオンビーム(FIB)を用いることにより、マスクレスで、 100nm オーダの高融点金属シリサイド微細構造を直接形成することが可能になると期待される。しかし、照射による固相原子混合反応の進行過程については、十分明らかにされていない点が多く、その機構解明が必要とされている。

本論文は、イオン照射によって誘起される固相原子混合反応を、低抵抗率が期待されるコバルトシリサイド(CoSi_2)の形成に適用し、FIBを用いて、酸化膜上に CoSi_2 細線構造を直接形成するプロセスを確立するために行った研究の成果をまとめたものである。

著者は、まず、酸化膜上に堆積した Co/Si 積層構造を

対象に、イオン照射によるシリサイド形成の進行過程を広い範囲の照射温度及び熱処理温度について分析している。その結果、イオン照射による原子混合は比較的低温で効果的に行われ、その後の熱処理によって照射部のみ CoSi_2 を形成することが可能となることを明らかにしている。また、低温では、定比の組成の CoSi_2 の直接形成の割合は小さく、イオン照射に伴って同時に進行する損傷形成の効果によって、十分低い抵抗率の CoSi_2 層を形成するには、熱処理による形成温度とほぼ同一の 700°C の試料温度が必要であることを示している。同時に、イオン照射によって形成されるシリサイド相は、混合層の構成原子比に依存して定まることを明らかにしている。

著者は、次に、照射によって固体内に導入された点欠陥の挙動に関する新しいモデルを提案し、イオン照射条件と CoSi_2 層の抵抗率変化との対応に関する実験結果を分析することにより、 CoSi_2 層内における照射誘起欠陥の緩和過程を記述する特性パラメータ(緩和の時定数及び特性長)を明らかにしている。

著者は、また、イオン照射により形成した CoSi_2 層を電極とした MOS 構造を形成し、イオン照射が酸化膜に及ぼす影響について調べている。イオン照射による酸化膜への影響を低減するには、Co と Si の原子混合を十分行える照射条件の下で、酸化膜中に形成される損傷を最小限に抑えるエネルギー及び照射量を選択する必要があることを示している。

著者は、さらに、FIB によるイオン照射を利用して、酸化膜上に CoSi_2 細線構造を形成するプロセスについて検討し、非照射部分の Si 層が 160°C の熱リン酸でエッチングできることを示すとともに、これを利用して CoSi_2 細線構造のパターニングを行い、線幅 200nm 程度の細線形成が可能であることを示している。

以上要するに、本研究は、イオン照射によって誘起される固相原子混合反応をコバルトシリサイド(CoSi_2)形成に適用して、混合層形成における照射誘起欠陥の効果を解明するとともに、集束イオンビームを用いて、酸化膜上に CoSi_2 細線構造を直接形成するプロセスの可能性を実証したもので、電子デバイス工学上寄与するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 春田 健雄 (鹿児島県)
学位記番号 シ情 博甲第73号(工学)
学位授与の日附 平成11年3月25日
学位論文題名 高出力・高繰り返し放電励起エキシマレーザの開発に関する研究
論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 前田 三男
 (副査) // // 原 雅 則
 // // // 岡 田 龍 雄

論文内容の要旨

高密度化、コンパクト化と言う産業分野の潮流に対応して、レーザ加工の分野においても光源の短波長化が精力的に進められてきた。希ガス・ハロゲンエキシマレーザは1975年に発振が報告されて以来、短波長化の最先端を走る紫外線レーザとして開発が進められ、最近では半導体製造工程における露光用光源、 μm 単位のアブレーション加工用光源、TFTアニーリング用光源等として市場における地位を確保しつつある。一方、これを追いかける形で固体レーザの高調波による紫外光発生技術も進展してきている。将来的には、適材適所で両者のすみわけが進んでいくと思われる。この際、ガスレーザであるエキシマレーザの持つ最大の利点は、高出力化が可能な事である。したがってエキシマレーザの将来展望としては一括加工面積の大きな対象やスルーブットの観点から高出力ビームが要求される分野へ適用されていくと思われる。にもかかわらず、エキシマレーザの高出力化がどこまで可能であるのかを追求した研究はこれまでほとんどなされていなかった。

本研究は、紫外線予備電離方式放電励起型のXeClエキシマレーザにおいて、新しい放電励起方式を提案し、その高効率・高出力化をはかったもので、4%以上の高効率で2kWの高出力発振に初めて成功したものである。本論文は7章から構成されており、以下のような概要となっている。

第1章は序論で、本研究の技術的背景、その目的と意義、概要を述べた。

第2章では、主放電に先立って種電子を供給するための予備電離方式について研究した。ここでは、強励起密度領域よりも弱励起密度領域において高効率の発振が得られるという方針に基づき、放電幅の拡大を狙いとして、誘電体を介したコロナ放電を利用し電極背面から予備電離を行う新規な予備電離方式を提案した。この方式の予備電離特性を観測し、安定な主放電を形成させるのに必要な予備電離電子密度が得られることを明示するとともに、従来の4倍以上におよぶ放電幅を実証した。さらに沿面コロナ放電予備電離方式XeClレーザとして具現化させ単パルス出力390mJ、平均出力110Wを得ることでより高出力化に向けての基盤を構築した。

第3章は、主放電を形成させるための励起回路方式について報告したもので、前章の沿面コロナ放電予備電離方式放電技術に高効率励起回路であるスパイカ・サステナ回路を組み合わせ、新規な励起回路方式を確立した。加えて、高繰り返し発振を目的として回路素子の研究を

行い、同軸コンデンサ型PFLおよびレストラック状磁気飽和スイッチによる全固体素子化に成功した。回路動作の観点からは、これまでの動作モードに代わる反転電圧動作モードと予備電離タイミング最適制御技術を提案し、これに基づいて2.7%の高効率発振を実現し、単パルス出力を1.15Jまで向上させた。

第4章は、前章までに構築したレーザ発振器技術をベースにその高繰り返し発振を行った成果を述べたもので、提案した反転電圧モードの有効性が高繰り返し発振において発揮され、高い単パルス出力としては初めて540Hzの繰り返し発振に成功し、平均出力505Wを得た。また、高繰り返し発振時の放電不安定化要因についても考察した。

第5章では、コンピュータシミュレーションにより、新規な励起回路方式である(沿面コロナ放電予備電離+スパイカ・サステナ励起回路)方式の基本特性およびレーザ出力特性の動作解析を行った。この結果として、電子の生成、消滅過程の追跡、放電抵抗、サステナ回路からのエネルギー移行効率、小信号利得、吸収損失等について報告するとともに、主放電開始初期においてサステナ回路から放電場へのエネルギーの投入がスパイカ回路を介して行われていることを明らかにした。

第6章では、これまでの研究成果を総合して大型機による高効率・高繰り返し発振を試みた。ここでは、上記500W機をシミュレーションコードで理論解析した結果に基づき、有効放電長2mの高出力XeClレーザを試作し、バーストモードで世界最高出力である2kW発振を実現するとともに、kW級としては最高効率の4.3%を達成した。また、このレーザは不安定型共振器を用いることで高いビーム品質を持つことを明らかにした。

7章では、以上の研究を総括し、今後の展望について述べた。

論文調査の要旨

従来レーザプロセッシングはCO₂レーザやNd:YAGレーザといった赤外線レーザによるものが主流で、その処理過程は本質的に熱的なものであった。それに対して、紫外部で高出力・高効率のエキシマレーザが開発されると、化学作用を利用した新しいプロセッシング技術が開拓され、半導体工業を中心に実用化に向かいつつある。中でもレーザアブレーション法は薄膜作製の重要な手法の一つとして活発な研究が進められている。

しかしながら、CO₂レーザ等従来のガスレーザに比べ、エキシマレーザはガスの処理が容易でなく、高気圧下での放電機構も複雑なため、大型装置で高繰り返し動作を安定に行わせるには、技術的に解決しなければならない多くの問題が残されていた。最近では加工用レーザも固体化が進んでいるが、気体レーザの最大の利点は固

体レーザーより高出力化が容易なことである。しかしながら、エキシマレーザーに関してはkW級のレーザーの開発例は従来ほとんどなかった。

本研究は、放電励起XeClエキシマレーザーのパルスパワー回路や放電機構に改良を加えるとともに、システムの大規模化をはかって従来にない高出力の動作を高い発振効率のもとで実現したものである。

本研究により得られた主な成果を要約すると、以下の通りである。

(1)エキシマレーザーには2～3気圧のガスを封入した横型放電管が用いられ、その励起には数10nsの立上りの速い大電流パルス放電が要求される。そのような条件のもとで、放電を広い断面積にわたって均一化するために新方式の沿面コロナ予備電離法を導入し、予備電離特性を測定することにより、その方式が安定な大体積放電の維持に有効なことを示した。

(2)プラズマへのエネルギー注入効率を高めるために、スパイカ・サステナ回路方式を採用したが、その回路を従来とは異なる反転電圧動作モードで使えば、速い繰り返し動作でも高い効率を維持できることを見出した。

(3)さらに沿面コロナ予備電離方式とスパイカ・サステナ回路を組合せ、予備電離のタイミングの最適化を行った結果、約150nsの長パルスで540Hzという高繰り返し発振が可能であることを示した。その際新たに同軸セラミックコンデンサ型パルス整形回路およびレーストラック状磁気飽和スイッチを開発し、パルスパワー回路の全固体化を達成した。

(4)パルスパワー回路定数、放電時の電子の速度分布、各種粒子の生成・消滅過程等を記述したコンピュータシミュレーションコードを開発し、試作したXeClレーザーシステムのエネルギー輸送過程を詳細に検討した。その結果にもとづき最適なパラメータ設定を行い、変換効率の改善を試みた。

(5)以上を総合して、放電有効長2mの大型XeClレーザーを試作開発し、エキシマレーザーとしてはこれまでの世界最高である2kWを、4.3%という高い変換効率で達成した。このレーザーに不安定共振器を用いることで、加工用として重要な高いビーム質が得られることがわかった。

以上要するに本研究は、XeClエキシマレーザーの予備電離方式およびパルスパワー回路に改善を加え、その装置の最適化、大型化および高繰り返し動作化をはかり、効率4.3%で2kWという従来にない高出力エキシマレーザーを開発することに成功したもので、レーザー工学上価値ある業績である。よって博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 近藤康洋(神奈川県)
学位記番号 シ情博甲第74号(工学)
学位授与の日附 平成11年3月25日
学位論文題名 有機金属気相成長法による埋込み構造半導体レーザーに関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 前田三男
(副査) // // 黒木幸令
// // // 岡田龍雄

論文内容の要旨

1970年に半導体レーザーの室温連続発振及び光ファイバの低損失化が実現されて以来、光ファイバ通信の研究開発は急速に進展し、現在の実用化に至っている。既に我が国の通信網は幹線系では光化が100%達成され、さらに2005年に向けて加入者系でも光化を推進しているところである。この光加入者系通信システムを構築するには、これまで構築してきた幹線系と異なり、大量生産が可能で、安価な光通信用モジュールが必要になる。つまり、このモジュールに用いられる半導体レーザーは、大面積加工で、さらに再現性よく高歩留まりで製作できることが重要になる。

本論文では光加入者系通信網の光源として、大面積加工、均一性、再現性に優れたInGaAsP/InP系半導体レーザーを有機金属気相成長(MOVPE)法を用いた埋込み構造により実現し、その製造方法を確立したものである。

第1章は序論であり、本研究の背景とその要約を述べた。

第2章では、MOVPE法が、従来の液相成長法に比べ組成及び膜厚の制御性、界面の急峻性に優れ、さらに大面積での均一性、再現性に優れていることに着目して、その成長法を用いた埋込み構造半導体レーザー製造方法の研究を行った。MOVPE法による埋込み成長は、供給律速であることに起因して、メサ構造両端に異常成長が発生することが欠点であるとされていたが、メサ高を低くすることで異常成長を抑えられることを見出した。また、メサ加工に従来用いられてきたウェットエッチング法でなく、ドライエッチング法を用いることによってレーザー製作工程の制御性、均一性の向上を実現した。この製造方法を用い、出力20mWにおいて線幅1MHzの狭線幅DFBレーザーの試作に成功し、さらに波長多重光通信用のレーザーレイの試作も行った。

第3章では、MOVPE法における半導体成長速度のn型ドーパント依存性を利用して埋込み構造レーザーの平坦化を行うとともに、自己整合埋込み構造半導体レーザーを実現した。従来、MOVPE法は添加するドーパントによってその成長速度が大きく変化しないと考えられてきたが、III-V族化合物半導体の場合にはVI族のn型ドーパ

ントを高濃度ドーピングすることにより特定領域上部の n 型半導体成長を抑制できることを見出した。この特性を利用して Se 高ドーピング n 型 InP を埋込み層に用いることにより、MOVPE 法による埋込み成長層の平坦化向上を実現した。さらに、Se ドーピング成長抑制のメサ幅依存性、Se 濃度依存性を詳しく調べることによって、選択成長マスクがない場合でもメサ上部に Se ドーピング InP 層が全く成長しない埋込み成長条件を見出し、自己整合的なメサ構造埋込み成長法を新たに開発することによって、複雑な工程が必要であった埋込み構造レーザの製造を簡単な工程で実現できるようにした。また、 n 型ドーパントによる成長抑制機構の原因についても解析を行い、成長抑制効果は Se 吸着が InP 表面を安定化し、In 原子の表面マイグレーションが促進されるために起こることを見出した。

第4章では、光加入者用半導体レーザ製造方法として、MOVPE 法とメタン系ドライエッチング法を用いた研究を述べる。MOVPE 法は均一性・再現性に優れた大面積成長が可能であるが、他の製造プロセスも同様の加工ができなければ製造プロセス全体のパフォーマンスは向上しない。従来、埋込み成長工程に必要なメサ形成に用いられていたウェットエッチングは、加工に必要な 1/10 ミクロンオーダーでの精度、また均一性・再現性・大面積加工という点で問題であったが、ここで提案したメタン系ドライエッチングはそれらの点で優れた加工技術である。しかし、メタン系ドライエッチングで形成したメサ構造を用いて埋込み構造レーザを製作した場合、良好な発振特性を得ることができなかった。埋込み構造の断面観測により、ドライエッチング時に与えられる物理的ダメージに起因すると思われる p 型 InP 埋込み層からメサ構造への Zn 異常拡散を確認し、この Zn 拡散による光吸収損失増大が発振特性の劣化原因であろうと推測した。そこで Zn 拡散抑制方法について検討を行い、メサ側面に接する領域に Zn 拡散防止用極低濃度 p 型バッファ層を挿入する埋込み構造を開発することにより、共振器長 $300\mu\text{m}$ 、両端面劈開のレーザ構造で、 25°C 、 85°C それぞれのしきい値電流が 5.2mA 、 19.3mA 、微分効率が 0.32W/A 、 0.23W/A という非常に良好な発振特性を実現した。さらに、MOVPE 法とメタン系ドライエッチングの組み合わせで期待される、2 インチの大面積プロセスで製作した埋込み構造レーザ発振特性の均一性・再現性の実現について確認した。また、光通信用レーザとして重要となる信頼性についても 10^5 時間以上の寿命が得られることを示した。

第5章は結論であり、本研究で得られた成果を要約するとともに将来の展望を述べた。

論文調査の要旨

近年、幹線系統における高速大容量の光ファイバ通信網の急進展は目をみはられるものがあり、情報産業の重要な基盤となっている。それに対して、21世紀のマルチメディア社会をになうインフラストラクチャとして、加入者系光通信網の構築が急ピッチで進められつつある。その際、波長多重通信をも視野に入れば、波長 $1.3\sim 1.5\mu\text{m}$ で動作する InGaAsP/InP 系の通信用半導体レーザを、均一性よく安価に大量生産できる技術の確立は大変重要である。

これまでこの種の半導体レーザは液相エキタピシ法で製造されてきたが、生産性に優れた有機金属気相成長 (MOVPE) 法の導入が望まれていた。しかし、この方法で複雑な埋込み構造の半導体レーザを製作するには、プロセス技術上解決すべき課題が残されていた。

本研究は、多量の半導体レーザの需要が予想される加入者系光通信網の光源として、大面積加工ができ、均一性・再現性に優れた半導体レーザを MOVPE 法で製造するプロセスに改良を加え、その実用化に寄与する重要な技術を開発したものである。

本研究により得られた成果を要約すると、以下の通りである。

(1) 半導体レーザでは、発振のしきい値を下げるために、光とキャリアとを pn 接合部の狭い領域に閉じ込める必要がある。ここでは電流を細長い領域に制限するため、埋込み構造をとっているが、そういう構造の半導体レーザ作製に MOVPE 法を適用した。その際、問題となっていたメサ構造両端の異常成長を、メサ高を低くすることで抑制できることを見出した。

(2) メサ加工に従来用いられてきたウェットエッチング法でなく、ドライエッチング法を導入し、それにより制御性・生産性の向上が得られることを示した。

(3) その際、従来良好な結果が得られていなかったメタン系のドライエッチングの問題点が、Zn の異常拡散による吸収損失の増大に起因していることを見出し、低濃度の p 型バッファ層を挿入する新規な埋込み構造 (BIBH: Buffer-Inserted Buried Heterostructure) を提案し、良好な結果を得た。

(4) 埋込み構造の平坦化を行う際、VI族の n 型ドーパントである Se を高濃度ドーピングすることにより、特定部分の結晶成長を抑制できることを見出した。またこの現象は、Se の吸着が InP 表面を安定化し、In 原子の表面マイグレーションを促進するためであることを実証した。

(5) さらに MOVPE 法における結晶成長の抑制条件を詳しく研究し、選択成長マスクなしで特定領域の成長を全く抑えることができる、独自の自己整合的メサ構造埋込み成長法を開発した。

(6)以上のような新しいプロセス技術を導入し、2インチの面積ウェハに適用して、しきい値電流5.2mA、微分効率0.32W/A、寿命 10^5 時間以上の高い信頼性を持つInGaAsP/InP半導体レーザの試作に成功した。

以上要するに本研究は、加入者系光通信網構築のキープデバイスであるInGaAsP半導体レーザの作製プロセスに新しいMOVPE法を適用して、均一で再現性が高く、生産性に優れたデバイス作製法を開発したもので、電子デバイス工学上価値ある業績である。よって博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 宮内 彰 (神奈川県)
 学位記番号 シ情 博甲第75号(工学)
 学位授与の日付 平成11年3月25日
 学位論文題名 高速・長距離光伝送特性に関する研究

論文調査委員
 (主査) 九州大学 教授 吉田 啓 二
 (副査) " " 前田 三 男
 " " " 安元 清 俊

論文内容の要旨

近年、インターネットをはじめとして情報化社会の進展は著しく、大量の情報が国内のみならず国際間でも送受されており、多くの情報を伝送できる技術の必要性は年々ますます増大している。その様な状況の下で、有線系の伝送技術として同軸線伝送技術が従来用いられてきたが、それに代わるものとして光伝送技術への期待は大きい。光伝送技術に要求される性能としては、より多くの情報をより安く伝送できることである。本論文では、このような光伝送技術に対する要求に応えるべく、高速・長距離光伝送特性に関する研究を行った。まず、高速・長距離光伝送において『光ファイバ伝送後の光出力波形を定量的に評価する技術』、『光ファイバ伝送後の光出力波形の波形歪みを抑圧する技術』、『LDのチャープ特性の把握』がキーテクノロジーであることを明らかにし、これらに関し、光出力波形評価技術、実用上極めて重要な距離に対する許容変動耐力に優れた10Gb/s光伝送方式、LDのチャープモデルの提案を行い、提案した技術の有用性を検証した。

本論文は6章で構成されており、第1章は序論で、研究の背景、研究の目的および論文の構成について述べた。

第2章では、光通信の2つの重要課題である光伝送の高速化技術と長距離化について、それに不可欠な光デバイスであるAPD、LDなどの新たに開発した $1.55\mu\text{m}$ 光デバイスの特性評価結果について述べた。特に高速ICおよび高速ICパッケージなど高速化のための必須技術

である新しい技術を開発した。また、これらの研究を通じて、高速・長距離光伝送を実現するには、『光ファイバ伝送後の光出力波形を定量的に評価する技術』、『光ファイバ伝送後の光出力波形の波形歪みを抑圧する技術』、『LDのチャープ特性の把握』が最も重要な研究課題であることを明らかにした。

第3章では、『光ファイバ伝送後の光出力波形を定量的に評価する技術』として、新しい波形評価法を研究し光ファイバ伝送に伴う波形歪みを直接定量的に把握できる等誤り率曲線技術を提案した。従来は、光ファイバを伝送させてエラーレートを測定し、総合的に良否判断を行っていた。その為、波形歪みそのものを定量的に把握することは困難で、間接的な評価になっていた。提案した技術を用いてモード分配雑音、LDバイアス電流依存性、外部変調器の伝送特性を評価し、開発した等誤り率曲線技術の有用性を検証した。これらのケースでは、光ファイバ伝送による波形歪みなどを直接評価することで、発生する現象をより定量的に把握できるようになったこと、動作マージンを定量的に評価できるようになったことを明らかにした。

第4章では、『光ファイバ伝送後の光出力波形の波形歪みを抑圧する技術』として、最先端技術である、光アンプを用いた10Gb/s光伝送方式に本評価方法を適用し、光ファイバ伝送後の波形歪みを定量的に評価することで、長距離光伝送の可能性を研究した。10Gb/s光伝送方式では、光アンプを使用した高出力化(10dBm以上)が必要になる。ところが、光ファイバに高出力の光パワーが入力されると光ファイバでは非線形効果により伝送される光信号の波長がダイナミックに変化し、光ファイバの波長分散特性により光ファイバ伝送後大きな波形歪みが発生する。本研究では、高出力化に伴う光ファイバの非線形効果、光変調器のプリチャープ技術、分散補償器、光ファイバの波長分散特性という相互に複雑に絡み合った要素をすべて含めて検討を行い、光ファイバ伝送後の波形歪みを定量的に評価することで高速・長距離光伝送技術の可能性を研究した。具体的には、まず従来提案されている10Gb/s光伝送方式の評価を行った。その結果伝送距離に対するトレランスが狭く、一つの分散補償器でカバー出来る範囲はわずか20km程度であり、高価な分散補償器を予め多数用意しなければならない、適切な分散補償器を選択・管理するのが現実の運用では大変である、など実用上の観点から大きな問題があることを明らかにした。そこで、劣化原因を分析しプリチャープ技術のアルファパラメータを-1から+1に変更する新たな光伝送方式を提案した。提案した方式では、従来方式における問題を克服し、一つの分散補償器でカバー出来る範囲を20kmから50kmへと大幅な拡大を図り、実用性に優れた10Gb/s長距離光伝送方式を確立することが出来

た。更に、74km相当の光ファイバを伝送する確認実験を行い、従来方式の場合受信側の許容分散補償量はわずか300ps/nm程度しかないが、新しく提案した $a=+1$ の方式の場合、受信側の許容分散補償量は1220ps/nm程度と大幅に増大することを確認し、シミュレーション結果の妥当性を検証した。

第5章では、『LDのチャージング特性の把握』として、LDのダイナミックな波長特性であるチャージングのモデル化についての研究を行った。光ファイバ伝送後の光出力波形を光ファイバ長を変えながら測定し、そこから逆算して一つの光出力波形は複数の波長の異なるガウス波形の和で表現できるという、システムの観点から見たチャージングモデルを提案し、本モデルが実験結果と十分一致することを検証した。

第6章では本研究の総括を行った。

論文調査の要旨

近年、情報化社会の進展は著しく、多くの情報を伝送できる大容量光伝送技術の必要性はますます増大しており、このための光伝送技術には高速化、長距離化が強く求められている。光伝送の距離を決定する要因としては、損失制限と帯域制限の二つが存在する。損失制限については光ファイバの伝送路損失、光出力レベル、光受信レベルを決めることで算出することができ、設計技術として既に確立している。しかしながら、もう一つの制限要因である帯域制限については、伝送速度の上昇および伝送距離の拡大に応じて新しい技術が必要になるが、それらの課題の明確化と課題に対する十分な研究はなされていなかった。本論文は、高速・長距離光伝送技術の実現を阻害する制限要因として解明が十分出来ていなかった帯域制限に関して、実験とシミュレーションで明らかにした研究結果をまとめたものであり、その成果を要約すると以下の通りである。

(1)高速化技術および長距離光伝送技術という基礎的な側面について、実際に高速光伝送装置の開発や新しい長距離光伝送用光デバイスの評価を行い、必要とされる新しい高速化技術の研究・開発を行った。またこの過程で高速・長距離光伝送を実現するための研究課題を明らかにした。

(2)抽出した研究課題の一つである『光ファイバ伝送後の波形歪みを定量的に評価する技術』として等誤り率曲線を用いた新しい評価技術を考察した。実際に、モード分配雑音、LDバイアス電流依存性、外部変調器の伝送特性に適用することで、提案した新しい技術が、光ファイバ伝送に伴う波形歪みを直接的かつ定量的に評価できる基礎技術であることを検証した。

(3)光ファイバの非線形効果、光変調器のプリチャージング技術、分散補償器、光ファイバの波長分散特性とい

う相互に複雑に絡み合った要素をすべて含めて10Gb/s光伝送方式の検討を行った。その結果、従来提案されている方式の場合、伝送距離に対するトレランスが狭く、一つの分散補償器でカバー出来る範囲はわずか20km程度であり、高価な分散補償器を予め多数用意しなければならない、適切な分散補償器を選択・管理するのが現実の運用では大変である、など、実用上の観点から大きな問題があることを明らかにした。この問題を解決するため、プリチャージングのアルファパラメータを -1 から $+1$ に変更する新しい方式を考案し、一つの分散補償器でカバーできる範囲を50kmと大幅に拡大し、実用性に優れた10Gb/s長距離光伝送方式の実現性を明らかにした。更に、シミュレーションと実証試験を行い、従来方式の場合300ps/nmしかなかった許容分散量のトレランスが、提案した新しい方式の場合、1220ps/nmと大幅に拡大することを確認した。

(4)LDのダイナミックな波長特性であるチャージングをシステムの見地から見たモデルを提案し、モデルの妥当性を検証するシミュレーションおよび実証試験を行った。すなわち、光ファイバ長を変化させた時、実験結果とLDのチャージングモデルを使用した計算結果を比較し、両者の波形の変化が十分一致することを確認し、モデルの妥当性を検証した。

以上要するに、本研究は光ファイバの高速・長距離光伝送特性に関し、必要とされている基礎技術と有用な光伝送方式の実現に寄与したもので、電子デバイス工学上価値ある業績である。よって、博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 渡邊 祥郎 (愛媛県)
 学位記番号 シ情 博甲第76号(学術)
 学位授与の日附 平成11年6月22日
 学位論文題名 Technological Strategies in the Computing and Communications Network Era(情報通信ネットワーク時代における技術戦略)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 牛島 和夫
 (副査) " " 香田 徹
 " " " 迫江 博昭

論文内容の要旨

社会構造は農業社会から工業社会、情報社会へと変遷してきた。21世紀も間近にせまり、世界は更に高度な情報社会へと発展してきている。その発展に伴い、現代社会のあらゆる局面に、情報通信ネットワークが甚大なイ

ンパクトを与えつつある。上記の背景を踏まえ、従来、学界、産業界等において、来るべき情報通信ネットワーク時代に対応する技術戦略について精力的に研究がなされてきた。これ迄様々な戦略が提案されているが、国内企業においては上記のような構造変化を自覚せずに場当たりの技術戦略を採用する事が少なくなかった。その為、残念ながら現時点においては、日本から世界の情報技術産業のデ・ファクト標準になる様な革新的な技術が出現した例は余り多くない。この反省から、日本経済の構造的変動、及び地球規模化を含む劇的な市場構造の変化に真に対応できる技術戦略が求められている。

本論文は、この様な背景の中で、日本における情報通信企業の技術戦略立案者として、現実の市場において製品戦略を推進し、企画した製品を市場に投入するというプロセスを経て得た体験を踏まえて、来るべき情報通信ネットワーク時代における技術戦略を提案するもので、全10章からなる。

第1章では、本研究の背景、目的、本研究の立場、及び本論文の構成について述べている。

第2章から第6章までは、世界、アジア、及び日本の情報技術産業の現状について調査・分析している。この分析は来るべき情報通信ネットワーク時代の技術戦略を考察する為の前提を構成している。第2章では社会構造の変遷を述べ、第3章では各国の産業育成政策を述べ、第4章では世界の情報技術産業の現状を分析し、第5章ではアジアの情報技術産業の現状を分析し、第6章では日本の情報技術産業の現状を分析している。

第7章では第2章から第6章までの分析を踏まえて、地球規模のネットワーク上のグループウェアについて分析している。この分析の結果、現時点の情報技術は、動画像や音声等を含むマルチメディア情報を世界中の任意の遠隔地に分かりやすく伝える事が出来るグループウェアを充分商用化出来る水準に達しているという事を実証した。

上記の技術が第8章で述べる発展途上国との国際的技術提携戦略を可能にする。発展途上国側において、技術移転を通じ、自国の技術、産業を育成しようとする意欲が年々高まっている。このような状況を踏まえて、先ず、インド、中国等において適切なソフトウェア企業を発掘し業務委託を実現した経験を基に、情報技術産業における先進国企業と発展途上国企業との国際提携について分析している。この分析により、今後は、ネットワークを活用した国際的な技術提携が企業活動にとって必須になってくるという事を明らかにした。次に、来るべき情報通信ネットワーク時代における先進国と途上国との国際技術協力について、筆者の「アジア環境情報ネットワーク」プロジェクトにおける体験に基づいて分析した結果を述べている。この事業は、通産省の国家プロジェクト

として実施された国際的インターネット構築の技術移転プロジェクトであり且つ発展途上国の劣悪な通信情報等の大変な困難を克服した先駆的な事業である。この分析により、今後日本企業にとって避ける事の出来ない国際的技術提携の成功の要件を情報技術産業界に共有化出来る様にした。

第9章では、世界的な広がりを持つ情報通信ネットワークの実例の分析を通じて、情報技術が、堅牢且つ大規模なグローバル・ネットワークを稼働させるに足る段階に達している事を示した。

第10章では、前章までの分析を受けて、垂直統合から水平分業へという情報技術産業界のパラダイム・シフト及びインターネットが社会に与えるインパクトについて述べた。次に、そのパラダイム・シフトを先取りする技術戦略を、任意の企業が自社の基本的な技術戦略として採用できる様、具体的に提案している。その基本的な考え方は、大競争を先導し、全く新しい市場を開拓し、新産業構造を創造するという事である。

論文調査の要旨

技術戦略とは、事業の目標、すなわち収益向上、市場シェアの拡大等の目標を達成するために、製品企画、研究開発等の技術を中心とした諸手段を運用することを使う。

インターネットを始めとする情報通信ネットワークの進展と普及によって広範な人に情報が伝わる速度が著しく向上し、同じ情報を共有する人の数が圧倒的に増加した。情報通信ネットワーク時代とは、いつでもどこでも必要な情報、必要な知識を手に入れようとするればそれが可能な時代と捉えることが出来る。この時代に、規制の緩和と情報技術の革新と経済のグローバル化によって、企業内外の状況が著しく変化した。我が国の企業はこれまで、人材と販売チャンネルを抱え込み、自社の独自仕様に基づき全機種を揃えるという垂直型経営、閉鎖型経営を採ってきた。今後は、水平型経営、開放型経営に移行していかなければならないと言われている。

本論文は、情報通信企業の技術戦略企画担当者として永年にわたり技術戦略を立案し実施してきた経験を基に、情報通信ネットワーク時代における技術戦略について論述したものでその成果は以下の通りである。

著者は、上のような内外状況の変化を国内の産業界は正しく自覚せず、目先の利益や過渡的な技術動向にとらわれて場当たりの技術戦略を採用しているところが少なくないと捉えた上で、本論文の結論として、情報通信ネットワーク時代の技術戦略を立てる方針を次の通り提案している。1. 中核業務に経営資源を集中し、基幹業務すら外注の対象とすべきである。この際に製品開発と供給は市場指向、すなわち、需要優先とすべきである。

これによって製品コストを劇的に減らすことが出来る。
2. デファクト標準を採用し、世界市場を目指すべきである。規制に縛られた市場は相手にしない。3. 情報通信ネットワークを活用して情報を公開し、国際的に最適な購買先を選択すべきである。不透明な談合は製品のコストを不自然に高騰させる。4. プロジェクトに応じて人材要求を公開し、適材を集めてプロジェクトを遂行すべきである。

これらの項目は必ずしも新規なものではない。技術戦略は、実際に製品等を企画立案し、その企画を企業執行部に認めさせて、実施に移し、その結果を評価し、それをさらにその企画にフィードバックすることを繰り返すもので、いわゆる実験はあり得ない。上記の提案は、著者が情報通信企業の技術戦略立案者として数々の製品企画の立案・実施・評価のサイクルを実際に担当してきた事例に基づき、この提案の技術的な実現可能性を個々に検討した上である点に意義がある。一般に個別企業の内部状況は明らかにされることが少ないので、実証的な提案として評価することが出来る。具体的には、先ず著者が企業を分担したグローバルネットワーク上のグループウェア MERMAID の開発・運用事例である。これは国連や日本大使館で国際ホットラインとして運用されている。また、著者の所属する企業が有する大規模なグローバルネットワーク(1996年時点で国際的に約500拠点、約7万台の端末、156Mbpsの基幹バックボーン)の運用実績とそれを利用した世界規模の販売管理システムや国際調達VANシステムの運用実績の分析である。

上述したように技術戦略を実施する上で国際的な提携は不可避である。開発途上国の企業をその提携先とすることもあり得る。開発途上国においても、進出企業との提携を通じて、技術移転、自前の技術や産業を育成しようと言う意志が高まっているので企業の一方的な進出は困難になっている。著者は、通産省の国家プロジェクトとしてインドネシアとの間で実施された国際的インターネット構築の技術移転プロジェクトに、技術を含む総括責任者として参加した。本プロジェクトは、発展途上国側の劣悪な通信事情など社会基盤の不備の他に、地理的な困難や、言語的な意志疎通の困難を克服して成功に導いた事業である。本論文には、事業遂行の過程が整理・分析して述べられており、情報通信ネットワーク時代における先進国と発展途上国との国際技術協力にとって示唆するところが大きい。このような国境を越えた技術協力は、今後我が国の企業が技術戦略を実行に移す上で必須のものであり、本論文は貴重な資料を提供している。

以上を要約すると、本論文は情報通信ネットワーク時代における技術戦略を、情報通信企業において企画立案実施してきた著者の経験を踏まえて提案しその技術的な実現可能性を検証したもので、情報システム学および情

報技術産業に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(学術)に値するものと認める。

氏名(本籍) 鶴田直之(佐賀県)
学位記番号 シ情博乙第33号(工学)
学位授与の日附 平成11年3月25日
学位論文題名 画像認識における中間視覚のための人工神経回路網の研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 雨宮真人
(副査) // // 谷口倫一郎
// // 安浦寛人

論文内容の要旨

本研究は、複雑なシーンを対象とした画像認識を可能にすることを目標に、画像認識システムを構成する中間視覚のための人工神経回路網モデルとその学習方式について研究し、まとめたものである。

画像認識の研究は統計的なパターン認識理論を中心に行われてきた。近年は、文字から人物など対象のカテゴリの抽象度が高く画像サイズも大きな分野へ、且つ複雑な背景や複雑の対象を含むシーンを扱う分野へと応用が移っている。そこではパターン認識理論の2つの問題点が指摘されている。第1に、対象の高抽象化と入力サイズの増大により、従来の手法ではシステムサイズが大きくなり実用的でなくなる。またシステムサイズの増大によりシステムの自由度が増し安定した学習が行えない。第2に、複雑なシーンを対象とする場合、パターン全体が必ず1つのカテゴリに属するとして処理されるパターン認識理論を用いるためには、予め対象領域が正確に切り出されている必要がある。しかしながら、対象領域の切り出しには認識対象に関する多くの情報が事前に分かっている必要があり、うまく問題を定式化できない。従来から認識と対象領域の切り出しの問題を大規模な組合せ最適化問題として定式化する試みが多くなされてきた。しかし、これらの定式化は、問題が非常に大規模になり、且つ最適性の評価基準を発見することが容易でないために現実的ではない。本研究は、現実的で有効な方式として「対象1つずつに注意を向けつつ認識済みの対象の悪影響を排除しながら認識を行う」逐次的画像認識法を提案したものである。まず始めに、画像認識システムを初期視覚、中間視覚、高次視覚からなるものとしてモデル化した。前述の問題は全て中間視覚に含まれる。そして、中間視覚が持つべき機能が、第1の問題を解消する認識および学習、そして認識済みの領域を正確に切り出す選択的注意であることを明確にした。

人工神経回路網(ANN)は、従来のパターン認識手法

に対して、その非線型性による優位性と雑音に対する頑健性が示されている。ANNの持つ非線型性と超並列処理の形態は、前に述べた認識の第1の問題を解決する際の重要な要素となり得る。しかしながらANNを画像認識へ応用する際2つの問題がある。第1に、ANNの万能性は証明されているものの、万能な学習方法が提案されているわけではない。特に入力サイズの増大とカテゴリの高抽象化が同時に生じる場合には、既に提案されている学習方式では十分な結果は得られていない。第2に、ANNの従来の分類法がANNの入出力形式によらないため、どのモデルが中間視覚の機能を実現しうるものなのか明らかなでないという問題である。そこで、本研究では、まず中間視覚の機能と照らし合わせてANNを再分類することにより各モデルの利点と欠点を明らかにし、対象の高抽象化と入力サイズの増大への対応にはそれぞれ階層化自己組織マップ(HSOM)とネオコグニトロン(NC)が適していることを示した。そして両者が共に最近傍法を基本原理とする認識モデルであることに着目して、両者の利点のみを活かすANNを提案した。このANNは、学習によって階層的に符号化された標準画像を用いた最近傍法による認識モデルである。更に、逐次的画像認識を可能にするため、提案したANNを拡張した。具体的には、基本原理が最近傍法であることに着目して認識対象に最も近い標準画像の想起する選択的注意機構を提案し、これを用いて対象領域の正確な切り出しを可能にした。以上により、中間視覚が持つべき機能が全て実現でき、複雑なシーンを対象とした画像認識が可能になった。

本論文は6つの章からなり、内容は以下の通りである。

- ・第1章では本研究の背景と目的を示す。
- ・第2章では、逐次的画像認識法を定義し、中間視覚の位置づけを述べ、中間視覚が持つべき機能を明確にする。
- ・第3章では、中間視覚の機能に基づきANNを分類し、HSOMとNCを統合することの意義を示す。
- ・第4章では、HSOMとNCを統合したANNを提案する。そして、具体的な実験を通してその有効性を示す。
- ・第5章では逐次的画像認識を可能にするため第4章のANNを拡張する。そして実験的にその有効性を示す。
- ・第6章でまとめ、画像「理解」に向けての今後の課題について述べる。

論文調査の要旨

画像認識の研究は、これまで主に統計的なパターン認識理論の枠組で行われてきたが、近年、複雑な背景や複数の対象を含む情景を扱う分野へと広がってきている。それに伴い、従来のパターン認識理論のもつ二つの問題

点が顕著となってきた。第1は、入力データのサイズが増大するに伴い、従来の手法ではシステムが複雑かつ肥大化し実用的でなくなり、しかもシステムの自由度が大きくなりすぎて安定した学習が困難になるという問題である。第2は、パターン全体が必ず一つのカテゴリに属するという前提とする従来のパターン認識手法では、認識対象の領域が予め正確に切り出されている必要があるが、複雑な情景を対象とする場合、この切り出し過程の定式化が困難であるという問題である。従来から認識と対象領域の切り出しの問題を大規模な組合せ最適化問題として定式化する試みが多く行われてきたが、これらの定式化では問題が複雑かつ肥大化し、また最適性の評価基準を見出すことが困難なために現実的ではなかった。

本研究は、複雑な情景を対象とした画像認識を可能にすることを目的として、上記の問題を解決する有効な画像認識システムについて研究し、特にその中間視覚のための人工神経回路網モデルとその学習方式について明らかにしたものであり、その成果は以下の点で評価できる。

1. 上記の問題を解決する現実的で有効な画像認識方法として、人工神経回路網(以下ANNと略す)の手法を用い、「対象一つずつに注意を向けかつ認識済みの対象の悪影響を排除しながら認識を行う」逐次的画像認識法を提案した。
2. 画像認識システムを初期視覚、中間視覚、高次視覚からなるものとしてモデル化して上記の二つの問題は全て中間視覚に含まれることを明らかにし、中間視覚に、(1)第1の問題を解消する認識および学習機能と(2)第2の問題を解消するために認識済みの領域を正確に切り出すことのできる選択的注意機能が要求されることを明確にした。
3. 中間視覚の機能と照らし合わせて従来のANNを再分類することにより、従来のANN各モデルの利点と欠点を明らかにし、認識対象の複雑化と入力サイズの増大への対応にはそれぞれ階層化自己組織マップ(HSOM)とネオコグニトロン(NC)が適していることを示した。そして両者が共に最近傍法を基本原理とする認識モデルであることに着目して、両者の利点のみを活かすハイパーコラムモデル(HCM)を提案した。このHCMは、学習によって階層的に符号化された標準画像を用いた最近傍法による認識モデルである。
4. 更に、逐次的画像認識を可能にするようにHCMを拡張した。具体的には、基本原理が最近傍法であることに着目して認識対象に最も近い標準画像を想起する選択的注意機構を提案し、これを用いることにより対象領域の正確な切り出しを可能にした。このことにより、2. で定義した中間視覚

が持つべき機能の全てが実現でき、複雑な情景を対象とした画像認識が可能となることを明らかにした。

5. 以上提案した HCM モデルの有効性を実験によって検証した。まず、単一物体を対象として学習、認識実験を行ない、HCM が HSOM および NC 両者の欠点を補完し、両者に比べて認識率を 5 ~ 20% 向上させることを検証した。また、学習速度の点でも HSOM と同等、NC に比べて 20 倍程度の向上が得られることを検証した。さらに、拡張 HCM について複雑な情景に対する認識実験を行ない、選択的注意機構が有効に作用し逐次的画像認識法が有効であることを検証した。

以上、本研究は、複雑な情景画像を対象とする画像認識システムについて、中間視覚のための人工神経回路網モデルとその学習方式の提案を行ない、有効性を実験によって明らかにしたものであり、知能システム学上寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(工学)に値するものと認める。

氏名(本籍) 山本和彦(山口県)
 学位記番号 シ情博乙第34号(情報科学)
 学位授与の日付 平成11年3月25日
 学位論文題名 インターネット運用下での新しい
 プロトコルへの移行に関する研究
 論文調査委員
 (主査) 九州大学 教授 荒木啓二郎
 (副査) // // 山下雅史
 // // // 谷口倫一郎

論文内容の要旨

企業や個人利用者へと裾野を広げたインターネットでは、実践的であるが故に基礎研究の期間が短く、洗練化されていない技術が急速に広まることある。回線速度や計算機の高速度につれて、利用者の要望は高度になる。このため、定着したサービスが利用者の要望を満たせなくなり、新しいプロトコルへ移行する必要性が生じる。この移行は利用者を混乱させないよう緩やかに進行させる必要があるが、プロトコルの移行に関しては一般的な手法が確立されていない。

本論文では、インターネットにおけるプロトコルの移行に関し、具体的な事例を挙げて解決手法を与え、さらに事例を分類してパターン化することを目指す。本論文で取り上げる事例は、インターネットで移行が特に重要視されている電子メールとインターネット・プロトコルである。これらの移行は、互換性の有無とプロトコルのレベルという2点において本質的に異なっている。この

ように特徴の異なる2つのプロトコルに関する移行を考察することによって、本論文では移行の本質を解明するための有益な知見を与えることを試みた。

電子メールはインターネットで最も普及したサービスの1つである。これまでの電子メールは、本文に文字情報しか格納できないテキスト・メールであった。そこで、マルチメディア機能を持った多目的メールとプライバシー強化のための暗号メールに移行することが急務の課題であった。

第2章では、テキスト・メールから多目的メールへの移行について述べた。多目的メールでは、バイナリ部分を符号化しテキストに変換するので、テキスト・メールのユーザ・インターフェイスがこれを受信しても誤作動しない。しかし、従来のユーザ・インターフェイスでは多目的メールの構造を適切に表示できず、また作成のために複雑な方法を覚える必要があったため、需要があるにもかかわらず多目的メールはほとんど利用されていなかった。そこで、多目的メールの構造を再帰的に解析し、構造を可視化して各データを自由に表示できる方法を提案した。また、ファイル・システムを多目的メールの構造に変換し、制約のない形で多目的メールを作成できる方法を提案した。

第3章では、多目的メールに対しプライバシーを強化する機能の導入について述べた。これまで暗号メールにはどのようなユーザ・インターフェイスを与えるべきかさえ研究されていなかった。本論文では、電子署名の検証結果をユーザに通知するとともに、暗号メールをあたかも多目的メールであるかのように読むことができる方法を提案した。また、暗号メールの作成には、任意のデータに暗号化や電子署名を施せ、生成できる書式に制約がない方法を提案した。さらに、第2章で提案した方法とともにこれを実装し配布したところ多くの利用者に受け入れられた。このソフトウェアではテキスト・メールを受信できるが、多目的メールや暗号メールのみしか送信できないようにすることで、移行を促進することに成功した。

インターネット・プロトコルはインターネットを支える基盤であり、現在のバージョン4(IPv4)ではアドレスが世界人口よりも少ない約43億個しかない。インターネットが発展を続けていくためには、より大きなアドレス空間を与えるバージョン6(IPv6)へ移行する必要がある。IPv4からIPv6への移行は、互換性が無いこと、およびIPv4をサポートしている計算機の台数が極めて多いことからこれまでに事例のない問題である。従来の研究により、移行のためにはトンネルとトランスレータという2つの技術が必要であると分かってきた。

第4章では、点在するIPv6計算機同士がIPv4インターネットを利用して通信可能となるトンネル技術につ

いて述べた。これまでのトンネル技術は未熟であり、今後必要となると予想される複雑なトンネル・パケットを処理できなかった。本論文では、複雑なトンネル・パケットをモデル化するとともに、トンネル・パケットの柔軟な解析法と2段階の生成法を提案し、複雑なトンネル・パケットの取り扱いを可能とした。さらに、これを実装してIPv6計算機を接続するために運用することで、IPv4インターネットにIPv6計算機を導入できることを実証した。

第5章では、IPv4計算機とIPv6計算機間で直接の通信を実現するためのトランスレータについて述べた。これまで、トランスレータの実現可能性や構成要素などは明らかになっていなかった。本論文では、トランスレータはプロトコル変換とアドレスの対応付けからなり、プロトコル変換にはヘッダ変換、TCPリレー、代理サーバという3つの技術が利用できることを示した。また、トランスレータをアドレスの対応付けの視点から4つに分類し、それぞれの実現可能性を明らかにした。さらに、実現可能と結論づけたトランスレータを実装し運用することで、IPv4からIPv6への緩やかな移行が可能であることを実証した。

最後に第6章において、これらの成功事例を基に移行の問題を互換性の有無とプロトコルのレベルから分類し、各分類に対する移行手法のパターン化を試みた。

論文調査の要旨

近年、情報通信システムの発展によって、インターネットの普及および利用が急速に進んでいる。通信ネットワークの広帯域化ならびに計算機システムの高機能化、高性能化に伴い、応用システムならびに通信プロトコルの改訂および新規開発が頻繁に行なわれている。しかしながら、改訂版や新規の応用システムおよび通信プロトコルが提供されても、現状では、インターネットに接続されている通信機器および計算機が全て同時にそれらの新しいシステムへと移行できているわけではなく、新旧のシステムが混在した状態でインターネットの運用が続けられている。このために、相互の通信に支障をきたしたり、新しいシステムへの移行が進まないという問題が生じている。したがって、運用中のインターネットにおいて、新しいシステムへの円滑な移行を促進するための有効な方法を確立する必要がある。

本論文は、世界規模で運用中のインターネットにおいて、新しいプロトコルへの移行に対して、複数のプロトコルについて具体的な解決法を示し、さらにそれらの具体事例に基づいて移行方法に対する考察を行い、移行に関するの問題点を明確にした上で移行方法に関する一般的な指針を提示したものであり、その成果は以下の点で評価できる。

(1)インターネットのプロトコル階層における応用層のなかで最も広く利用されている電子メールシステムを対象として、テキストのみからなる単一のメッセージを送受信する旧来の電子メールシステムに対して、テキスト以外にも画像や音声を含むことのできる多目的メールシステムの開発を行い、世界的に広く普及させた。多目的メールシステムにおける電子メールの構造を階層化し、電子メールの送信部、受信部、ならびに、作成部、表示部の処理を再帰的に定義した。旧来のメールシステムとの互換性を保ちながら、新たな機能を利用できるようにしたことによって、多目的メールシステムへの移行が促進された。

(2)上記の多目的メールシステムに対して、プライバシー保護を強化する機能を追加した。多目的メールの中に暗号化メールを含む構成として、メール作成時に暗号化や電子署名を施し、メール表示時に復号化や電子署名の検証結果の通知を行う方法を提案して、上述の多目的メールシステムの自然な拡張として実現した。この場合においても、旧来のメールシステムとの互換性を保つことによって新しいメールシステムへの移行を促進している。このメールシステムは、世界中に配布されて多くの利用者に受け入れられており、新しいメールシステムへの移行に関して本方法の有効性を実証している。

(3)プロトコル階層におけるネットワーク層であるインターネットプロトコルを対象として、現在運用されているインターネットプロトコル第4版(IPv4)から、いわゆる次世代インターネットの基盤となるインターネットプロトコル第6版(IPv6)への移行における問題点の分析と移行方法の提案を行った。このインターネットプロトコルの移行は、アドレス長が32ビットから128ビットへと変化するために相互の版の間での互換性が無く、また、従来のIPv4を利用している通信機器および計算機の台数が極めて多いために、非常に困難な問題である。本研究では、IPv6を利用する計算機同士がIPv4を用いて運用しているネットワークを介して通信を行うために、トンネル技術に基づいて複雑な内容の通信を柔軟に実行する方法を新たに提案した。また、IPv4を利用する計算機とIPv6を利用する計算機との間での通信を行うために、プロトコル変換とアドレスの対応付けとによる方法を提案した。いずれの方法についても実験ネットワーク上での実装および運用を通して有効性を実証した。互換性の無い二つのネットワークプロトコルを共存させることにより、新しいプロトコルへの移行が可能であることを示した。

(4)上記の複数の具体事例に基づいて、インターネット運用下でのプロトコル移行の問題を、互換性の有無とプロトコル階層とに関して分類し、各場合における移行方法の一般的な指針を与えた。

以上、本研究は急速に発展しているインターネットに関して、運用下における新しい通信プロトコルへの円滑な移行方法に関する研究をまとめたものであり、具体事例に対して個別の移行方法を提案してそれらの有効性を実証し、また、移行方法に対する一般的な指針を示すことによって、インターネットの進化発展を促進するための有益な知見を与えたものであり、情報通信工学上寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(情報科学)に値するものと認める。

氏名(本籍) 小浜輝彦(長崎県)
 学位記番号 シ情博乙第35号(工学)
 学位授与の日付 平成11年5月10日
 学位論文題名 DC-DCコンバータの並列動作における制御性に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 二宮 保
 (副査) // // 平澤 宏太郎
 // // // 黒木 幸令

論文内容の要旨

近年、電子機器の小形・軽量化の要求が強まるに連れて、電子機器の心臓部である電源部分に対しても同様な要求がなされ、電源回路の小型化、高効率化が強く求められるようになってきた。この要求を満足する電源として半導体スイッチのオン・オフによって出力電圧を調整するスイッチング電源が注目され、現在では民生用、産業用を問わずあらゆる電子機器に用いられている。一般にスイッチング電源は電子機器の要求する電流容量を一台の電源で賄うように個別に設計・製作されるが、最近では、スイッチング電源を複数台並列動作させることにより所要の電源容量を得る方法がとられるようになってきた。この理由として以下の事項が挙げられる。第一に、あらかじめ電流容量の異なった数種類の電源装置を標準化し、これらの組合せで電源を実現することにより設計の柔軟性を増し、設計時間を短縮するためである。第二に、大型コンピュータ等に用いられる千アンペアを超える大容量電源を中容量電源の並列接続により実現し、電氣的・熱的ストレスの分散化及びコストの低下を図るためである。第三に、並列接続時において冗長系を構成することにより高信頼の電源を構築できるからである。以上の理由によりスイッチング電源の並列動作が有効であるが、現状では、問題点も幾つか残されている。具体的には、スイッチング電源のノイズによるモジュール間の相互干渉や電源モジュールの出力電圧の差異に起因する電流不均衡及び低電力出力電源における電力の逆流や自励発振動作といった異常現象が報告されており、これら

の抑制方法について検討しなければならない。

本論文は上記問題の詳細な原因究明を行い、さらにそれらの抑制方法を提案し、その効果について論じたものであり、5章から構成されている。

第1章は序論であり、初めにスイッチング電源の中でも直流から直流への変換装置であるDC-DCコンバータの基本動作と並列動作についてのその特長および問題点を概説した。

第2章では並列動作の問題点の一つであるスイッチングノイズによる相互干渉の抑制方法として、新しい位相同期回路を提案し、その有用性を示した。まず、従来から使用されている位相同期方式についてその動作を概説した。次に、これらの従来方式を並列動作に用いる場合に制御性の面で不十分であることを述べ、これらに代わる並列動作に適した新方式の位相同期回路を提案し、その有用性を示した。提案した同期回路は任意の周波数に対して1周期以内に高速に同期可能であることや全てのモジュール回路が同一構成であり事前の周波数調整が不要であるといった優れた特長を有する。また、位相同期回路を付加することにより過渡時に生じる時比率変動の影響について考察し、これが一般の用途では問題ないことを示した。

第3章では、DC-DCコンバータの並列動作時に生じる電流不均衡を抑制する電流バランス制御回路についてその詳細な動作解析を行った。その結果、まず定常特性において電流バランス特性と回路パラメータとの定量的な関係が明らかとなった。出力5Vのフォワード形電源モジュール2台の並列システムを作製し、最も電流不均衡に影響を及ぼす基準電圧が4%異なる場合では、電流帰還ゲインを0.16以上に設定することにより出力電流3A以上において電流アンバランス率が10%以下となり実用上問題ないことが示された。次に小信号モデルから動特性を導出し、過渡時における電流バランス制御特性とその安定性について明らかにした。

第4章では低電圧出力のDC-DCコンバータを並列接続した場合の問題点の詳細を実験により明らかにし、その現象を解析した。低電圧出力電源ではダイオード整流回路による効率低下を避けるため、MOS-FETを電流素子とした同期整流回路が使用される。このコンバータを並列接続した場合に、電力逆流現象や異常発振現象が観測されることが以前報告されていたが、その詳細は明らかではなかった。特に異常発振現象は回路の損壊や素子の劣化を招くため、この防止策が必要であった。本章では、この異常発振現象の解析を行い、回路パラメータと発振現象との因果関係を明らかにした。出力3.3Vの電源モジュールを作製した場合、出力インダクタンスが20 μ H以下では電圧ストレスが上昇し、MOS-FETの耐圧20Vを越えて素子が破壊されることが分かった。次にこ

の発振現象を防止する新しい同期整流回路を提案し、その有効性を示した。最後に、第3章で述べた電流バランス制御回路を適用することにより電流逆流現象が防止できることを示した。

第5章は以上の研究を総括した結論である。

論文調査の要旨

近年、半導体集積化技術の発展による電子機器の小形軽量化に伴い、それらに安定な電力を供給する電源部分に対しても小形軽量化の要求が強くなってきた。この要求を満足する電源として半導体素子のスイッチング動作を利用して出力電圧の調整を行うスイッチング電源が今日広く用いられるようになってきている。これまで、スイッチング電源は電子機器の回路規模に応じて個別に設計・製作されてきたが、最近では、スイッチング電源モジュールを複数台並列動作させる構成が注目されている。これには、電流容量の増大化、冗長構成による高信頼化、更には、標準化モジュールによる設計の柔軟性及び設計時間の短縮、などを容易に達成できる利点がある。しかしながら、電源モジュールの並列動作においては、スイッチングノイズによるモジュール間の相互干渉、モジュール間の出力電圧の差異に起因する電流不均衡、低電圧出力電源の場合に発生する電力の逆流や自励発振動作などの異常現象が報告されており、これらの問題の原因解明や抑制方法について早急な対応が求められている。

本論文は、スイッチング電源の中でも直流から直流への変換装置である DC-DC コンバータについて、その並列動作時に生じる上記の問題を解決するために、回路解析による詳細な原因究明を行い、更に、抑制方法を提案しその有効性を検証した成果をまとめたものである。

著者はまず、DC-DC コンバータのスイッチングノイズによる相互干渉について、その要因を明らかにし、抑制方法として位相同期回路が有用であることを述べ、従来の同期回路の問題点を解決する新しい位相同期回路を提案している。更に、提案した位相同期回路は、出力電流のビート現象を抑止できること、マスターとして動作しているモジュールの故障時にも残存モジュールで同期が継続できること、すべてのモジュール回路が同一構成であること、各モジュールの事前の周波数調整が不要であること等の優れた特長を有することを示している。

次に著者は、DC-DC コンバータの並列動作時に生じる電流不均衡を抑制する電流バランス制御回路について、その詳細な動作解析を行い、定常特性における電流バランス制御特性と回路パラメータとの定量的な関係を明らかにしている。更に、出力 5 V のフォワード形電源モジュール 2 台の並列システムを試作し、電流不均衡に大きな影響を及ぼす基準電圧が 4 % 異なる場合でも、電流帰還ゲインを比較的低い 0.16V/A 程度に設定すること

により電流不均衡の割合を実用上許容できる 10% 以内に抑制できることを示し、解析結果と一致することを確認している。次いで、過渡特性及び安定性について小信号モデルによる動特性解析を行い、実験結果との比較によりその妥当性を明らかにし、実用上有効な設計法を提示している。

最後に著者は、同期整流回路を用いた低電圧出力 DC-DC コンバータを並列接続した場合に生じる電力逆流現象や異常振動現象について、実験及び解析により発生機構を詳細に調べている。その結果、スイッチング周波数 200kHz、出力 3.3V の電源モジュールの場合、出力インダクタンスが通常用いられる 20 μ H 程度でも MOSFET の耐圧 20V を超える電圧ストレスが発生することなど、回路パラメータと発振現象との因果関係を明らかにしている。次いで、この発振現象を防止する新しい同期整流回路を提案してその有効性を実験で検証している。

以上要するに、本論文は DC-DC コンバータの並列動作時における電源モジュール間のノイズ干渉や電流不均衡及び低電圧出力電源における電力逆流現象や異常振動現象について、原因を究明して回路パラメータとの定量的な関係を論じ、更に、これら異常現象の抑制方法を提案してその有効性を実証したもので、電子システム工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位論文に値すると認める。

氏名(本籍) 黒木 進 (神奈川県)
 学位記番号 シ情 博乙第36号(工学)
 学位授与の日附 平成11年 6月22日
 学位論文題名 位相空間データモデルとその空間、
 時空間データベースへの応用に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 牧之内 顕文
 (副査) " " 長谷川 勉
 " " " 牛島 和夫

論文内容の要旨

図形の位置や形を表現するデータを空間データという。また、図形が時間とともに位置や形を変えていく過程を表現するデータを時空間データという。時空間データベースはデータベースの新しい応用であるコンピュータアニメーションやバーチャルリアリティなど、動きのある空間データのデータベース化と内容検索に役立つと期待されるため、重要性を増している。そのような時空間データのモデリングに役立つため、本論文では位相空間データモデルを提案する。ここで、位相空間とは、連結性という観点から図形を抽象したものである。本論文

で提案する位相空間データモデルは、空間データや時空間データを位相空間として統一的に表現・格納・検索する。同時に、位相空間データモデルを用いた空間データや時空間データの表現・検索法についても論じている。

第1章では、研究の背景と目的、関連研究についてまとめている。まず、従来の空間データモデルと時空間データモデルを概観し、各モデルの特徴・限界について述べ、それらと提案している位相空間データモデルとの比較を行っている。取り上げたモデルはベクトルデータモデル、ラスタデータモデル、ワイヤフレームモデル、サーフェスモデル、ソリッドモデル、インプリシットモデル、複体モデル、スナップショットビューモデル、時空間単体的複体モデル、MBBモデルである。その結果、本論文で提案する複体表現を用いた位相空間データモデルは従来の空間および時空間モデルと同等以上の能力であることを例により示している。

第2章では、複体表現に基づいた位相空間データモデル Universe を提案している。複体表現には単体的複体と凸胞複体の2通りがある。本章では、両方の表現が可能な Universe モデルの設計、実装について議論している。複体方式をとることにより、複体の構造は図形のつながり方に関する性質を表す。一方、単体、または凸胞の頂点座標は図形の点集合的な性質やユークリッド幾何的な性質を表す。そのため、1つの図形に関する位相的な性質は複体の構造を表現する文字列に関する操作だけで計算できる。一方、2つの図形の集合論的な関係や位相的な関係は単体や凸胞の頂点を持つ座標を用いて計算できる。それらをふまえて、2つの図形に関する集合論的な演算子と位相的な述語を提案し、その定義をしている。定義した演算子と述語を用いれば、2つの図形に関する点集合論的な関係と位相的な関係の両方を完全に記述できることを示している。時空間データに関する問合せを、位相空間に関する集合論的な演算子と位相述語を用いて記述できることを例題を通して説明している。

第3章では、位相空間データモデルの演算子である2つの図形の積、和、差集合演算子のための新しいアルゴリズムを提案している。点集合としての裏面に注目したとき、複体が表現する図形を多面体という。本章では、2つの多面体の集合演算を統一して計算できるアルゴリズムの設計・実装について議論している。このアルゴリズムは、まず演算結果となる多面体の頂点集合を計算する。この頂点集合を導出するためには、頂点と凸胞の内包判定や、稜線と凸胞の交差判定という計量的な計算を行う。求める頂点集合は、行う集合演算の種類によって異なる。次に、この頂点集合から稜線を、稜線から面を、というように、多面体の辺をその次元に関して昇順に求める。但し、辺とは多面体の頂点や稜線、面などの要素の総称である。辺を求めるアルゴリズムでは、頂点と稜

線、稜線と面との計量的な関係および位相的な関係を用いて計算する。そのために、解となる多面体の稜線や面が、入力として与えられた多面体のどの辺に含まれていたかという性質を用いている。このアルゴリズムの計算複雑さを解析して、それが $O(ff \log p)$ となることを明らかにしている。但し、 f , f' , p はそれぞれ、辺の数、凸胞の境界を構成する面の数、凸胞複体を構成する凸胞の数である。

第4章では、位相空間データモデルに境界の開閉の区別、辺の向きという概念を導入している。それは、現実世界の空間データをデータベースに写像するときに捨象される性質を補償するために必要である。境界の開閉と辺の向きを導入するため、拡張凸胞と拡張凸胞複体を定義している。これらはそれぞれの閉包である凸胞と凸胞複体との関係を基にして記述される。この拡張によって、図形の境界に関する、より精密な表現が可能になる。また、辺に向きを与えることによって、例えば面の表と裏、線分の向きが表現可能である。その結果、空間データや時空間データに関する制約を幾何学的な概念で表現できる。

第5章では、本論文の結論として成果をまとめ、今後の研究課題について述べている。研究課題の一つは、複体の表す位相的な性質を高速に計算するアルゴリズムの開発である。これは計算トポロジーに関する重要な課題である。また、3章で述べた集合演算アルゴリズムの高速化、境界の開閉や辺の向きを利用する問合せの開拓も今後の研究課題である。

論文調査の要旨

コンピュータアニメーションや3次元仮想空間では、時間とともに位置や形を変える図形が用いられる。位置や形が時間的に変わる図形を表現・格納し、図形の位置や形及び図形相互の関係の時間的変化に関する検索を可能にする時空間データベースが求められている。時間属性を持たない図形を表現・格納・検索するためのデータベースである空間データベースは以前から研究されてきたが、これに時間情報を加えた時空間データベースについても近年研究が活発に行われてきたが、時間と空間とを統合して統一的に扱うモデルはなかった。本論文では、空間データと時空間データを統一的に表現・格納・検索することを可能とする位相空間データモデルを提案するとともに、格納された図形に関する集合演算子のためのアルゴリズムを設計・解析している。さらに、境界の開閉や辺の向きを新たに定義し、位相空間データモデルの図形記述能力を高めている。

著者はまず、空間データと時空間データを統一的に取り扱うために、位相空間データモデルを提案している。位相空間は、図形の連続性を抽象して得られる概念であ

り、この位相空間によって空間データや時空間データを表現するものである。著者は、位相空間の表現法として点、線分、凸多角形、凸多面体などの基本図形が組み合わされた複合図形である複体を採用している。これにより、頂点名を表わす文字列の操作のみで個別の位相空間の構造が得られる。また、頂点にはすべて座標値が与えられ、複体が表現する図形の位置に関する検索も可能にしている。さらに、著者は、データベースに複体として格納された図形を検索するための和や積などの集合演算子と「含む」、「交わる」などの位相演算子を定義している。一方、著者は位相空間として抽象化された時空間データ特有の検索について論じ、空間及び時空間データに関する集合論的及び位相的な問合せが、位相空間に関する集合及び位相演算子で記述できることを示している。

次に著者は、複体で表現される多面体の集合演算のための新しいアルゴリズムを提案している。3自由度以下の凸多面体に関する積集合演算は盛んに研究されており、詳細なアルゴリズムも提案されている。一方、凹多面体を含む一般の多面体の集合演算については、一般的な解法指針が提案されているが、具体的で詳細なアルゴリズムは提案されていない。著者は、多面体が複体で表現されていることのみを仮定した、多面体の積集合・和集合・差集合を統一的に計算する具体的なアルゴリズムを提案

し、それに基づく計算複雑さも明らかにしている。

最後に著者は、境界の開閉と辺の向きという2種類の概念を位相空間データモデルに導入し、モデルの図形表現能力を高めている。従来の空間データモデルや時空間データモデルでは、図形は境界点をすべて含むか、あるいは全く含まないものとして表現される。その結果、境界の一部だけが含まれる図形を定義できない、また、辺に向きを定義することも行われていない。しかし、本論文では、複体の定義を拡張して境界の開閉と辺の向きを記述できるようにした。この拡張複体を用いると、2つの空間データの境界線の帰属を明確に表現できる。また、面と表と裏や、線分の向きを区別できる。これらの概念は空間データベースや時空間データベースの実際の応用では価値が高い。

以上を要約すると、本論文は、空間データと時空間データとを統一的に表現・格納・検索することを可能とする位相空間データモデルを提案し、そのモデルで表現された図形に関する集合演算のための新しいアルゴリズムを考案し、さらに境界の開閉や辺の向きの概念を導入してモデルの表現能力を高めたもので、データ工学上価値ある業績と言える。以上のことから、本論文は博士(工学)の学位論文に価するものと認める。

