

学位論文審査報告

<https://hdl.handle.net/2324/1654367>

出版情報：九州大学大学院システム情報科学紀要. 5 (2), pp.249-314, 2000-09-01. 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) 田邊利文(熊本県)
学位記番号 シ情博甲第83号(工学)
学位授与の日付 平成12年3月1日
学位論文題名 語彙共起制約文脈自由文法
論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 日高 達
(副査) // // 松永 勝也
// // // 松尾 文碩

論文内容の要旨

自然言語処理における構文解析では、一般に入力文に対応する構文構造が複数存在し、それらの中からどのようにして構文構造を選択するかが問題点の一つであり、構文解析の精度が自然言語処理システムの質を左右する。

従来、構文構造の選択には確率文法を用いる方法と語彙共起制約を用いる方法があった。前者は統語範疇の粗さにより意味制約を満たしていないものの解析をも許してしまうという問題、後者は確率化が難しいことや、比較的記述力の強い言語クラスに属することから構文解析時間が長いという問題があった。

文脈自由文法の生成規則に語彙共起制約を記述することが出来れば、文脈自由文法の高速度な構文解析法を用いることが出来、生成される構文構造はすべて語彙共起制約を満足したものとなる。さらに生成される構文構造が複数であっても、確率化することで構文構造の間に優先順位をつけることが出来るようになる。

本論文では、文脈自由文法の非終端記号をそれから導出される句の主辞(head)及び機能語(function)により細分化することで、語彙共起制約を生成規則として表現した文脈自由文法(語彙共起制約文脈自由文法)について述べ、さらに日本語文法におけるfunctionを適切に選定する機構を語彙共起制約文脈自由文法に取り入れた、日本語の場合の語彙共起制約文脈自由文法について述べる。

本論文は6章で構成されている。

第1章は序論で、本研究に至った背景、研究の目的、着想、研究の成果、本論文の構成について述べる。

第2章は、曖昧さを解消するための従来手法として、確率文法を用いる方法と語彙共起制約を用いる方法について、それぞれの方法の概要と問題点を述べている。確率文法を用いる方法としては、一般に言語モデルとして文脈自由文法がベースに用いられてきた。文脈自由文法は確率化が容易であり、確率化した確率文脈自由文法は、構文構造の生起確率を求めることで、構文構造間に優先順位を付与する

ことができる。しかし従来の文脈自由文法は、その非終端記号を、比較的粗い統語範疇に設定しており、それを確率化した確率文脈自由文法では、統語的には合っているが意味制約を満たしていないものの解析をも許してしまうという問題点があった。一方、意味制約の一つである語彙共起制約を用いる方法には、語彙機能文法や木接合文法を用いた手法があった。しかしそれらの文法は、確率化が難しいことや、比較的記述力の強い言語クラスに属することから構文解析時間が長いという問題があった。また、従来、語彙共起制約を文脈自由文法の生成規則として満足に表現していない手法があったことも併せて述べる。

第3章は、文脈自由文法の非終端記号を、それから導出される句の主辞(head)及びfunctionにより細分化することで、語彙共起制約を生成規則として表現した文脈自由文法(語彙共起制約文脈自由文法)が構成できること、および語彙共起制約として単語を用いると生成規則数が著しく増大してしまうため、シソーラス上の比較的粗い概念をheadとして用いることで生成規則の数を減少させることができることを述べる。

第4章は、日本語に限定した語彙共起制約文脈自由文法のF規則の構成について述べる。F規則はfunctionを導出する規則であり、functionは、日本語では付属語や活用形、英語では前置詞などがあり言語依存性が強いいため、日本語に限定してfunctionを導出する機構を与える。日本語の場合には、一般的に付属語列中にfunctionが含まれており、付属語の並びが分かれば付属語列のfunctionを特定できる。

第5章は、語彙共起制約文脈自由文法の評価を行なうため、日本語の語彙共起制約文脈自由文法を確率化して、日本語での曖昧さをもつ代表的な句である名詞句「 N_1 の N_2 の N_3 」においてfunctionは「の」を対象にして、 N_1 が、 N_2 と N_3 のどちらに係るかを判定させる実験を行なった結果、82.4%という正解率が得られ、語彙共起制約文脈自由文法の有効性を確認したことを述べる。

第6章は結論で、本研究の成果をまとめて述べる。

論文調査の要旨

本論文は、自然言語の構文解析における曖昧性解消手段として用いられてきた語彙共起制約を文脈自由文法規則に組み込む方法を与え、語彙の共起制約と確率文法化を統合した強力な高速な曖昧性解消法の実現に関する研究をまとめたものである。

自然言語の機械処理において、構文解析は最も重要な基盤技術であり、構文解析の精度が自然言語処理の質を左右すると言っても過言ではない。構文解析における最大の問題は、入力文に対応する複数の構文構造の存在—構文構造の曖昧性—をいかにして解消するかということにある。従来、曖昧性を解消する方法として、意味制約の一つである

語彙の共起制約を満たさない構文構造を排除する方法や、確率文脈自由文法を用いることによって生起確率が最大の構文構造を優先する方法が用いられてきた。語彙の共起制約を用いる方法では、語彙機能文法 LFG や木接合文法 TAG 等の文脈自由文法より上位の形式文法を用いて、範疇文法による句構造生成と単一化演算による意味構造計算を並行して行う解析手法がとられてきたが、上位の文法であることから構文解析に要する時間が大きいこと、文法の確率化が困難であるため残余の曖昧性を解消する統計的手段が採用できない等の問題があった。また、確率文脈自由文法を用いる方法は、構文解析に要する時間は大きくならないが、過度の単純化による精度の劣化のため出力に対する信頼性が低かった。

著者は、統語範疇 X 、主辞 h 、機能語 f の3組 $X(h, f)$ で構成される細分化統語範疇を導入することにより、語彙の共起制約を陽な形で文脈自由文法規則として表現した語彙共起制約文脈自由文法を提案している。これは、従来難しいとされてきた語彙の共起制約の文脈自由文法への組み込みに解を与えたものである。日本語のように付属語によって文法関係を示す膠着言語では、言語に特有な付属語統語規則を持っている。したがって、日本語の語彙共起制約文法は付属語列から文法関係を示す機能語 f を抽出する文法規則 (F 規則) を必要とするが、著者は F 規則が右線形の書換え規則で記述できることを示している。また、文法規則に適用確率を与えることにより語彙共起制約文脈自由文法は確率文法化できるので、語彙の共起制約を適用してもなお残る曖昧性については、確率文法化によってこれを解消することができる。したがって、語彙共起制約文脈自由文法は、語彙の共起制約と確率文法化を統合した強力な高速な曖昧性解消手段を備えた文法とすることができる。

次いで著者は、曖昧性の大きい名詞句に語彙共起制約確率文脈自由文法を適用することにより、精度の高い構文解析が実現できることを実験により実証している。

以上を要約すると、本論文は語彙共起制約の句構造文法への組み込み法を与え、語彙共起制約と確率文法化を統合した高速な曖昧性解消に道を拓いたもので、言語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) 四柳道夫 (神奈川県)

学位記番号 シ情博甲第84号 (工学)

学位授与の日付 平成12年3月1日

学位論文題名 信号処理用 A/D 変換回路の研究
論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 赤岩芳彦

(副査) " " 二宮保

" " 黒木幸令

論文内容の要旨

本論文は、信号処理用 A/D 変換器の小型化、高速化、低電圧・低消費電力化を実現するための A/D 変換回路技術およびアナログ集積回路技術に関する研究成果をまとめたものである。この中には、A/D 変換方式の研究から A/D 変換器を構成する演算増幅器など一般的なアナログ回路に適用できる回路技術の研究などが含まれている。その概要は、次のようにまとめられる。

第1章では、導入として、アナログ信号処理とデジタル信号処理の比較から始め、A/D 変換器の分解能と量子化誤差などの基本事項、A/D 変換器の性能と応用分野、高速 A/D 変換器の基本方式など第2章以降の基礎知識となる事柄の説明を行った。

第2章では、デジタル信号処理回路とオンチップ化することを目的とした、小型化 (小面積化)、低消費電力化を実現するための直並列型 A/D 変換技術についての研究成果をまとめた。小型化・低消費電力化のためにただ1個の並列型 A/D 変換器を変換のステップ数だけサイクリックに用いるサイクリック型直並列 A/D 変換方式を開発し、並列型 A/D 変換器を変換のステップ数だけ縦続に接続して構成していた従来の直並列型 A/D 変換方式に対して、大幅な小型化・低消費電力化 (従来の 1/3 以下) を実現できることを示した。また、A/D 変換器のキー回路となる演算増幅回路についても、低電力での高性能化を実現した。

第3章では、画像の高精細化に対応するための A/D 変換器の高速化を目的として、CMOS A/D 変換器の高速化技術についての研究成果をまとめた。ここでは、パイプライン動作と1段あたりの分解能を4ビットとして内部アナログ回路の負荷を軽くして高速化を図った4ビット並列型 A/D 変換器の3段パイプライン直並列型 A/D 変換方式および変換速度を制限する要因である内部アナログ回路の動作速度に対する要求を1/2に緩和する A/D 変換経路の二重化・インタリーブ方式などの高速 A/D 変換技術を開発した。また、キー回路である高速・高精度サンプルホールド (S/H) 回路技術、およびそれに用いる演算増幅器の新規回路技術を開発した。それらの方式・回路に基づき、分解能10ビット、変換速度50Mspsの A/D 変換器を実現した。

第4章は、多くの A/D 変換器のキー回路となるサンプルホールド回路に関して、高精度化・高速化・低電力化を同時に実現し得る回路技術についての研究成果をまとめたものである。すなわち、演算増幅器の利得が有限であることによる誤差 (有限利得誤差) をキャンセルできる S/H 回路を提案し、シミュレーションによりその効果を示した。この S/H 回路は、従来の S/H 回路であれば有限利得誤差の大きさが演算増幅器の利得に反比例していたのに対して、有限利得誤差が演算増幅器の利得の2乗に反比例するように改善できたため、従来に比べ桁違いに有限利得誤差を小

さくできる。そのため、低利得・高速演算増幅器を用いて S/H 回路を構成することで、高精度化と高速化の両立を図ることができた。実際にこの S/H 回路を第3章で述べた高速 A/D 変換器および第5章で述べた低電圧 A/D 変換器の中で用いることで、有限利得誤差キャンセル機能付き S/H 回路が高精度・高速・低電圧動作に優れていることを実証した。

第5章では、CMOS 技術で低電圧・低消費電力などビデオ信号処理用 A/D 変換器を実現するための、A/D 変換方式、回路技術についての研究成果をまとめた。電源電圧 2V での低電圧動作を実現するために、電流モード回路と電圧モード回路とを組み合わせた電圧・電流モード混在直並列型 A/D 変換方式を開発した。具体的には、上位 A/D 変換器に電圧モード動作の 5 ビット並列型 A/D 変換器、下位 A/D 変換器に電流モード動作の 6 ビット電流ツリー型 A/D 変換器を用いた構成の電圧・電流モード混在直並列型 A/D 変換方式で 10 ビット分解能のビデオ信号処理用 A/D 変換器を開発した。また、A/D 変換器の中で用いる、低電圧・低消費電力で高速動作可能な差動チョッパ型コンパレータ回路などの回路技術を開発することで、電源電圧 2V、消費電力 20mW と低電圧・低消費電力でビデオ信号処理に適した 10 ビット・20Msps CMOS A/D 変換器を実現できた。

第6章は、携帯機器用としてさらに低電圧・低消費電力化を実現するための、BiCMOS 技術を用いた A/D 変換回路技術についての研究成果をまとめたものである。実現のためのキー回路は、低電圧動作の高速 BiCMOS コンパレータ回路であり、バイポーラトランジスタの高精度な素子精度と高速性・高トランスコンダクタンス性を CMOS 技術と組み合わせることで、低電圧・高速動作を実現した。この BiCMOS コンパレータ回路技術の開発を中心に、4 ステップフラッシュ方式の 8 ビット A/D 変換器を 2 並列化する A/D 変換方式により、分解能 8 ビット、変換速度 15Msps、最大消費電力 8mW を実現した。

第7章は、以上の研究成果をまとめ、結論とした。

論文調査の要旨

情報のマルチメディア化および通信の高度化にともない、信号処理が重要になっている。信号処理技術としては、アナログ信号を一旦デジタル値に変換(A/D)してから処理を行うデジタル信号処理が、デジタル回路における半導体技術の進展を受けて、急速に発展している。しかし、アナログ信号処理技術の重要性が薄れたわけではなく、デジタル回路とのインターフェース部として、デジタル信号処理の進展に合わせて、その高性能化がますます要求されている。要求される条件としては、回路の高精度化、高速化、小型化、低消費電力化、低電圧化などが上げられる。その相対的な重要性は用途によって異なる。

本論文はアナログ集積回路、特に A/D 変換回路に関して、上記の技術的性能を向上したものであり、以下の点において評価できる。

第1に、1個の並列型 A/D 変換器を変換のステップ数だけ繰り返し用いるサイクリック型直並列 A/D 変換方式を開発した。また、主要な回路である演算増幅型について種々の回路構成上の工夫を行うことで低電力下での高速・高利得化を達成した。これらにより、チップ面積と消費電力を従来方式に比べて 1/3 に低減した、12 ビット、200ksps CMOS A/D 変換器を実現した。

第2に、内部アナログ回路の負荷を軽くすることで高速化したパイプライン動作直並列型 A/D 変換方式と内部アナログ回路の動作速度を 1/2 に低減できる、2重化・インターリーブ方式を開発した。これにより、分解能 10 ビット、変換速度 50Msps の画像処理用高速 A/D 変換器を 0.8 μ m CMOS プロセスで実現した。

第3に、A/D 変換器入力段に用いられるサンプルホールド回路について、演算増幅器の利得が有限であることによる誤差を補償する回路方式を考案し、従来回路方式における誤差を 2 次のオーダーの微量に低減できた。これにより、低利得でありながら高精度と高速化の両立を可能とするサンプルホールド回路を実現した。

第4に、低電圧動作に適している電流モード回路と通常の電圧モード回路とを組み合わせる電圧・電流モード混在直並列 A/D 変換方式を開発した。これにより、低電圧 (2V)、低消費電力 (20mW) のビデオ信号処理用の 10 ビット・20Msps CMOS A/D 変換器を実現した。

第5に、バイポーラトランジスタの低電圧時における高精度・高速性を利用するとともに、スイッチトキャパシタ CMOS 回路との組み合わせによる BiCMOS コンパレータ回路を開発した。この回路と 4 ステップフラッシュ方式の 8 ビット A/D 変換器を 2 つ並列化する A/D 変換方式とにより、低電圧 (1.5V)、高速 (15Msps)、低消費電力 (8mW) の BiCMOS A/D 変換器を実現した。これにより、電池駆動のビデオ信号処理携帯機器への応用を可能にした。

以上を要約すると、本論文は新しい A/D 変換方式とアナログ回路により、信号処理用 A/D 変換回路の小型、低消費電力、低電圧化と高速、高精度化を達成したものであり、電子工学の進歩に貢献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) 渡邊 仰基 (大分県)
学位記番号 シ情 博甲第 85 号 (工学)
学位授与の日付 平成 12 年 3 月 27 日

学位論文題名 COUPLED-MODE ANALYSIS OF COUPLED WAVEGUIDES USING SINGULAR PERTURBATION TECHNIQUE (特異摂動法に基づく結合モード理論を用いた結合導波路の解析)

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
// // // 香田 徹

論文内容の要旨

大容量の情報を高速に伝送・処理する必要が高まっており、マイクロ波・ミリ波・光などの高周波電磁波を用いる電磁波デバイスが注目を集めている。このような電磁波デバイスの多くは共通の誘電体基板の上に1次元あるいは2次元に配置された多数の高周波伝送線路から構成されており、集積化技術を確立するためには、伝送線路間の様々な結合現象を解析しなければならない。本論文では、結合導波路を効率良くしかも高精度で解析する手法として、特異摂動法に基づく結合モード理論に着目し、いくつかの規範的な結合導波路への具体的な適用法を提案している。また、これらの結合導波路に対する解析結果を、他の解析手法によって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、研究の背景及び目的、論文中での用いる記号の付け方、論文を通じて前提とする仮定条件、また本論文の構成について記している。

第2章では、Helmholtz方程式によって支配される2つの誘電体導波路が平行におかれている構造の解析を通して、特異摂動法に基づく結合モード理論の基本的な考え方を示している。結合導波路系の波動関数をそれぞれの導波路に関係する波動関数の和として表現すると、問題が連立微分方程式の問題に置き換わる。非摂動系としてそれぞれの導波路が単独にある構造を考え、隣接する導波路の影響を摂動と見なせる場合には、この連立微分方程式を摂動問題として取り扱うことが出来る。永年項による摂動展開の破綻を防ぐために特異摂動法の手法である多重空間座標を導入し、通常の摂動法の手順に従うと、この摂動問題は摂動の各オーダーに対応した微分方程式によって記述される問題に分解される。0次問題はそれぞれの導波路が単独にある場合の問題と等しくなり、その解はモード振幅関数を係数とするモード関数の線形結合で表現される。一方、高次問題は非斉次方程式によって記述されるために、可解条件が満足される必要がある。この可解条件はモード振幅関数の伝搬方向変化を記述する形になっており、結合モード方程式を形成する。可解条件が成り立っているとき、高次問題の解がモード関数の補正項を与える。

第3章では、4つの規範的な結合導波路構造に対して、

特異摂動法に基づく結合モード理論の具体的な適用法を提案している。結合誘電体スラブ導波路を伝搬するTEモード電磁波の解析は結合導波路の最も基本的な問題であるが、この導波路を光領域で使用する場合には、コアとクラッドの誘電率差を非常に小さく設定する。このため、非摂動系の支配方程式としてHelmholtz方程式を用いていると、伝搬定数は摂動によって僅かしか変化しないのにモード分布関数は大きく変化してしまい、加えられる摂動の大きさと現れる影響の間の関係が把握しにくくなる。そこで「緩やかに変化する振幅」を導入することによって、摂動に対する影響が方向によって大きく異ならなくなる手法を提案している。NRDガイド結合器中を伝搬するTMモード電磁波の解析では、波動方程式の他にストリップ誘電体と外部誘電体の境界面における境界条件を陽に取り扱う必要がある。ここでは、0次問題の解空間と4次元Hermite空間が同型となることを利用して、4次元Hermite空間内で可解条件を求める手法を示している。結合マイクロストリップ線路の解析では、スペクトル領域法の手法を用いて積分方程式を有限次行列方程式で近似的に表現し、この行列方程式に対する可解条件から結合モード方程式を導出している。グレーティング付方向性結合器は、急峻な波長選択性を実現できるため、光通信における成長分割多重を行う上で重要な構成要素となると考えられている。この結合器は、伝搬定数の異なる2つの誘電体スラブ導波路からなる方向性結合器に、伝搬方向に周期性を持つグレーティングを装荷した素子で、導波モードの伝搬定数とグレーティング周期の間に位相整合条件が成り立っているときに導波モード間で電力授受が行われる。この位相整合条件は非常に厳しく、直接的な数値解析手法によって位相整合条件が成り立つようなグレーティング周期を探すことは困難である。従って、グレーティング付方向性結合器の設計理論としては、結合モード理論が主に用いられてきている。特異摂動法に基づく結合モード理論を用いることによって、2次摂動を考慮に入れた結合モード方程式を導出することができ、それぞれの導波路が単独にある場合の導波モード伝搬定数をもとにした位相整合条件の表式を得ている。

第4章は結論で、本結合モード理論の特徴を記し、第3章で示した4種類の結合導波路の解析によって得られた結果をまとめている。

論文調査の要旨

高速・大容量で信頼性の高い通信技術の構築を目指して、マイクロ波・ミリ波及び光通信の分野では通信用デバイスの高集積化が進められている。これらのデバイスは共通の基板の上に配置した多数の高周波導波路から構成されており、集積化技術を確立するためには、各導波路間の様々な結合現象を解明しなければならない。しかし、多数の導体線路あるいは光導波路からなる伝送路の取り扱いは一様に

容易ではない。導波路問題に対して数多くの数値解法が開発されているが、これらの直接的な解法は伝送路の数が増えるに従って膨大な記憶容量と計算時間を要することになる。このため、多導波路系の結合問題を近似的に取扱う解析的手法として結合モード理論が提案され、様々な集積デバイスの設計に利用されてきた。しかしながら、従来の結合モード理論には、結合の強さを記述するパラメータが曖昧なために適用範囲が明確でなく、導波路が近接した強い結合状態は取り扱えないなどの欠点があった。本論文では、導波路間の高周波電磁結合の問題を精度良く系統的に解析する手法として特異摂動法に基づく新しい結合モード理論を提案し、規範的な結合導波路の問題へ適用してその有用性を示している。

著者は、まず、導波路の結合に関する物理的機構を明確にし、それを基にして、導波路間の結合問題を摂動論的に解析する方法を考察している。従来の結合モード理論では、結合導波路の波動関数をそれぞれの導波路が孤立しているときのモード関数の線形和で近似して結合モード方程式を導くので、結合モード方程式の解は結合導波路に対する波動方程式を満たしていない。これに対して、著者は、結合導波路に対する波動方程式を近似的に満たすように波動関数を構成する方法を採っている。具体的には、波動方程式を各導波路が孤立しているときの波動関数を基にした結合波動方程式に分解し、導波路間の結合の影響を波動方程式の非斉次項に取り入れている。その結果、結合導波路の問題に摂動法を適用することが可能になった。著者は、この結合波動方程式を特異摂動法の手法を用いて解く解析の手続きを与え、各摂動の次数において、ヘルムホルツ方程式の可解条件から結合モード方程式が系統的に導出できることを示している。

次に、著者は、提案した結合モード理論を適用して、結合光導波路、結合マイクロストリップ線路、及びグレーティング付方向性光結合器の結合特性を解明している。結合光導波路は方向性光結合器や光フィルタなどに利用される基本的な導波路であり、これらのデバイスの設計では結合波の偶モードと奇モードの伝搬定数をできるだけ正確に評価することが要求される。著者は、2次摂動まで考慮に入れた結合モード方程式を導き、これらの伝搬定数を正確に計算する方法を与えている。また、具体的な数値例により、2次摂動の結合モード方程式は導波路間隔が波長程度まで狭くなった強い結合状態に対しても有効であることを明らかにしている。

結合マイクロストリップ線路の解析では、結合波動方程式をストリップ上の電流分布に関する行列方程式に変換し、この行列方程式の可解条件から2次摂動の結合モード方程式を導出している。線路パラメータとして偶モードと奇モードの伝搬定数及びストリップ上の電流分布を計算し、線路間隔が狭くなるにつれて近接するストリップの影響

により電流分布が大きく変化することを明らかにしている。グレーティング付方向性光結合器は、実効屈折率の異なった2つの光導波路からなる方向性結合器に周期的なグレーティングが装荷された構造を持つ。導波モードの伝搬定数とグレーティング周期の間に特殊な位相整合条件が満たされるとき、2つの導波路の間で波長選択的な電力移行が行われることになり、波長多重光通信における波長選択素子への応用が期待されている。しかし、この位相整合は極めて狭帯域であり、所望のグレーティング周期を直接的な数値解法で求めるのは非常に困難である。著者は、2次摂動の結合モード方程式を用いて、位相整合に必要なグレーティング周期を解析的に求める方法を示している。

以上、本論文は、導波路間の高周波電磁結合の問題を精度良く系統的に解析する手法として特異摂動法を用いた新しい結合モード理論を提案し、種々の規範的な結合導波路へ適用してその有効性を確認したもので、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) 石原 亨(島根県)
学位記番号 シ情 博甲第86号(工学)
学位授与の日付 平成12年3月27日
学位論文題名 System Level Optimization Techniques for Low Power VLSI Design (低電力集積回路設計のためのシステムレベルにおける最適化手法)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 安浦 寛人
(副査) // // 谷口 倫一郎
// // // 黒木 幸令

論文内容の要旨

半導体製造技術の向上に伴い、一つの集積回路チップに搭載されるトランジスタの数は数千万個を超え、回路の動作周波数は1ギガヘルツに近づきつつある。回路規模の増大と動作周波数の向上は集積回路チップの消費電力を増加させ、チップの冷却コストの増加や発熱による信頼性の低下が深刻な問題となっている。また、携帯機器の普及に伴い、小型の電池で複雑な処理を長時間実行できるシステムの必要性が高まっている。電池寿命を延長させるためには、単位時間あたりの消費電力の削減よりも消費電力の時間積分であるエネルギー消費の削減が重要である。エネルギー消費の削減は実用上非常に重要であると同時に、理論的にも非常に興味深い課題である。例えば、あるプログラムを時間制約下で処理するとき、そのプログラムの処理に最低限必要なエネルギーを決定し、必要最小限のエネルギーでプログラムを処理する技術を確認することは、非常に重要

である。本研究の主な目的は集積回路によって処理されるプログラムに必要なエネルギーの理論的最小値を決定し、必要最小限のエネルギーでプログラムを処理する技術を確認することである。本論文では、ソフトウェアとハードウェアの両方の動作を考慮してシステムのエネルギー消費を削減するマイクロプロセッサのアーキテクチャおよびコンパイラ技術を提案する。

本論文は6つの章から構成される。第1章は序論である。第2章では、CMOS論理回路のエネルギー消費のメカニズムについて述べ、実回路との比較実験によりエネルギー消費モデルを検証する。また、前記のエネルギー消費モデルに基づいて本論文が対象とする低消費電力設計手法の概要を説明する。

第3章では、プロセッサの電源電圧を動的に変更してプロセッサで消費されるエネルギーを削減する手法を提案する。CMOS論理回路の消費エネルギーは電源電圧の二乗に比例し信号遅延は電源電圧に反比例する。この関係を利用して時間的に余裕のある処理を低電圧で実行すればプロセッサのエネルギー消費を削減することができる。本論文では、プログラムをある制約時間内にプロセッサ上で実行するとき、制約時間を満たしてマイクロプロセッサのエネルギー消費を最小にする電源電圧の割り当てを決定する方法を提案する。電源電圧の割り当てを決定する問題は整数線形計画問題として定式化でき、この問題の解が最適な電源電圧の割り当てとなることが保証される。提案手法の特徴は、(1)プロセッサが使用できる電源電圧の種類に制限がある場合、(2)プロセッサで消費される電力がプログラムの実行状況に依存して変化する場合、を考慮していることである。第3章の前半では、上記(1)、(2)の条件下で最適な電源電圧の割り当てを効率よく決定するための指標となるいくつかの基本定理を証明する。

第4章では、電源電圧、動作周波数、およびデータパス幅の命令による変更を可能にするプロセッサアーキテクチャを提案する。電源電圧、動作周波数、およびデータパス幅を命令によって動的に変更することでエネルギー消費、演算速度あるいは演算精度をソフトウェアにより管理することができる。プログラムに要求される実時間性や演算精度はデータの種類やプログラムの実行環境に依存して動的に変化するため、消費エネルギーに大きく影響する電源電圧、動作周波数およびデータパス幅をソフトウェアから制御できる機能は、プログラムに対する動的な要求の変化に応じて必要最小限のエネルギーで計算を行うことを可能にする。計算機上でのシミュレーション実験により、電源電圧を動的に変更できるプロセッサのエネルギー消費が、固定電圧のプロセッサに比べて半分以下に削減されることを確認した。また、データパス幅を変更できる機能を採用することによりプロセッサのエネルギー消費を14%から23%削減できた。

第5章では、メモリから命令を読み出す際に消費されるエネルギーを削減する手法を提案する。本手法は、実行頻度の高い命令列を単一の複合命令に圧縮することにより命令メモリへのアクセス回数を削減し、命令メモリの低消費電力化を可能にする。また、単一の複合命令として圧縮された命令を複写し実行するプロセッサアーキテクチャについても提案する。提案手法の特徴はプロセッサの内部構造を変更せずに命令メモリで消費されるエネルギーを削減できることである。この特徴はプロセッサアーキテクチャの再利用を容易にし、特定用途向けシステムを短期間で開発できることを示している。命令メモリのエネルギー消費を最小にするためにプログラムの中から複合命令として圧縮すべき命令列を見つける問題は整数線形計画問題として定式化でき、最適な複合命令を決定できることが保証される。いくつかのベンチマークプログラムを用いた実験により命令を読み出す際に消費されるエネルギーを35%から65%削減できることを確認した。6章では本論文の結論と今後の研究の方向を述べる。

論文調査の要旨

デジタル集積回路の集積度および動作周波数の向上に伴い、発熱の原因となる消費電力は、大規模集積回路(VLSI)の回路規模や性能を規定する大きな要因となっている。また、携帯機器の普及に伴い、小型の電池で複雑な処理を長時間実行できるシステムの必要性が高まり、消費電力の時間積分であるエネルギー消費の削減も重要な技術課題となっている。与えられたプログラムを制約時間内に実行する時、そのプログラムの処理に最低限必要なエネルギー量を決定し、必要最小限のエネルギーでプログラムを実行するようにシステムを制御する技術は非常に重要である。本論文では、ソフトウェアとハードウェアの両方の動作を考慮して、プロセッサベースのデジタル集積システムのエネルギー消費を最小化するアーキテクチャおよびコンパイラ技術を提案し、システム設計レベルでのデジタル集積システムの低電力化と低エネルギー化の理論的検討を行い実際的な設計手法を提案している。

まず第2章で、CMOS論理回路のエネルギー消費のモデル化を行い、電源電圧、スイッチング回数、負荷容量などのパラメータとエネルギー消費の関係を明らかにしている。さらに、このモデルに基づいて、これまでに提案された低消費電力化手法や低消費エネルギー化手法を系統立てて整理し、本論文での新しい提案手法の位置づけも明確にしている。

第3章では、プロセッサの電源電圧を動的に変更してプロセッサで消費されるエネルギーを削減する手法を提案している。CMOS論理回路の消費エネルギーは電源電圧の2乗に比例し、信号遅延は電源電圧に反比例する。この関係を利用して時間的に余裕のある処理を低電圧で低速に実

行すれば、プロセッサのエネルギー消費を削減することができる。この事実を利用して、与えられた制約時間内にプログラムを実行するとき、時間制約を満たしかつプロセッサのエネルギー消費を最小にする電源電圧および動作周波数の割当て手法を提案している。消費エネルギーに関する基本的な4つの定理を証明し、提案した電源電圧割当て手法が理論的にエネルギー消費を最小化することを証明している。また、この電源電圧割当て問題を整数線形計画問題として定式化して、最適な割当てを行う具体的なアルゴリズムを提示している。提案手法の特徴は、(1)プロセッサが使用できる電源電圧の種類に制限がある場合、(2)プロセッサで消費される電力がプログラムの実行状況に依存して変化する場合などを考慮しており十分に実用的である。画像処理などの実応用に対して提案手法で消費エネルギーを最大10分の1程度にまで削減できることをシミュレーション実験で示している。

第4章では、電源電圧、動作周波数、およびデータパス幅を命令によってプログラムから変更可能なプロセッサアーキテクチャを提案している。これらのパラメータを命令によって動的に変更することで、エネルギー消費、演算速度あるいは演算精度をソフトウェアにより管理することができる。プログラムに要求される実時間性や演算精度はデータの種類やプログラムの実行環境に依存して動的に変化するため、エネルギー消費に大きく影響する。電源電圧、動作周波数およびデータパス幅の3つのパラメータをソフトウェアから制御できる機能は、システムに対する性能の要求の変化に応じて必要最小限のエネルギーで計算を行うことを可能とする。計算機上でのシミュレーション実験により、提案手法によって同じ処理を実行するために必要なエネルギーを大幅に削減できることを示している。また、実際にアーキテクチャを持つプロセッサを設計し、東京大学大規模集積システム設計教育研究センター(VDEC)で試作もしている。

第5章では、プロセッサがメモリから命令を読み出す際に消費されるエネルギーを削減する手法を提案している。実行頻度の高い命令列を単一の複合命令に圧縮し、細かな動作をマイクロプログラムの様により小さな独立したメモリに格納することにより、命令メモリへのアクセス回数を削減し、メモリアクセス全体の低消費電力化を可能にしている。提案手法の特徴は、プロセッサの内部構造を変更せずに命令メモリで消費されるエネルギーを削減できることである。この特徴は、プロセッサアーキテクチャの再利用を容易にし、特定用途向けシステムを短期間で開発できることにもつながる。命令メモリのエネルギー消費を最小にするためにプログラムの中から複合命令として圧縮すべき命令列を見つける問題を0-1線形計画問題として定式化し、最適な複合命令を決定している。ベンチマークプログラムを用いた実験により、命令を読み出す際に消費されるエネ

ルギーを35%から65%削減できることを確認している。

以上を要約すると、本研究は、プロセッサベースのデジタル集積システムの設計において、消費電力および消費エネルギーを最小化する理論的基礎とその具体的な実現手法を提案しており、デジタル集積システムに対する新しい設計手法を示したもので、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) 楠 和 浩(神奈川県)
 学位記番号 シ情 博甲第87号(工学)
 学位授与の日付 平成12年3月27日
 学位論文題名 工場の生産システムにおける生産情報管理用開放型通信方式に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 牛島 和 夫
 (副査) // // 香田 徹
 // // // 荒木 啓二郎

論文内容の要旨

製品の機能やデザインに対する利用者要求の多様化にともない、製造業における生産形態は、少品種大量生産から多品種少量生産、更に変種変量生産に変化している。

市場動向に迅速に対応できる生産システムの構築には、生産管理、製品設計の両部門と生産部門(生産ライン)の連携強化が必要である。つまり、ロボット、NC(Numerical Control)工作機械、PLC(Programmable Logic Controller)に代表される生産ラインの制御機器と、それらを管理し生産指示を出すセルコントローラと呼ばれる計算機との連携強化が必要である。

各種の制御機器とセルコントローラの連携には、データ伝送機能と、ネットワーク提供機能が必要である。前者は、制御機器とセルコントローラ間、および制御機器間でデータ伝送を行う機能であり、後者は、各種資源のモデルとネットワーク経由のアクセス提供機能である。データ伝送機能は、更に、制御データ転送機能と生産情報収集機能に分類できる。前者は、指定した時間内に制御機器間で制御データを転送する機能であり、後者は、制御機器からセルコントローラに対して生産実績情報を転送する機能である。

本論文は、上記のデータ伝送機能とネットワーク提供機能を実現する生産情報管理用通信方式に関する研究をまとめたもので6章からなる。

第1章は序論で、本研究の背景と目的を述べた。

第2章は、本研究の対象となる生産システムの概要説明と基本アーキテクチャの提案である。本章では、まず、本研究の対象範囲を明確にした上で、解決すべき問題を明らかにし、それを解決する生産情報管理用通信方式の基本ア

ーキテクチャを示した。

第3章は、時間確定性保証通信プロトコルの提案と評価である。ここで、時間確定性とは、ある指定した時間内に通信またはトランザクションを完了する特性であり、制約時間幅により定量的に表現する。制約時間幅とは、通信またはトランザクションの開始時刻と、完了までの要求時間または終了時刻から定まる時間間隔である。本章で提案する時間確定性保証通信プロトコルは、国際標準プロトコルであるTTP(Timed Token Protocol)を基本として、ノード間の一方方向データ転送における時間確定性を保証する。本通信プロトコルは、制約時間幅を持つデータを、制約時間幅の緊急度に応じて2つの送信キュー(即時送信キューと一時待機キュー)に振り分ける。データ送信権(トークン)獲得時に転送すべき通信データは、設定値(送信権獲得までの理論的最大時間)を基準として決定し、キュー内で制約時間幅を超えて転送待ちが生じたデータは廃棄する。また、制約時間幅を持たないデータは、制約時間幅を持つデータの転送を妨げない場合に限り転送する。本通信プロトコルを計算機シミュレーションにより評価した結果、トラヒックが通信帯域の80%を超えた場合でも、80%のデータが、指定した制約時間幅内で転送できることを確認した。一方で、本通信プロトコルでは、転送データ間の関係を考慮せずに廃棄するデータを決定しているため、生産ラインの連続した制御動作を保証できない可能性がある。これを回避するためには、本通信プロトコルが提供するデータ転送に関する送信結果通知を利用する必要があることを示した。

第4章は、到着時刻確定性保証通信プロトコルの提案と評価である。この通信プロトコルは、今後生産ラインの状態管理への利用が予想される動画や音声などのマルチメディア情報を取り扱うためのものである。ここで、到着時刻確定性とは、ある指定した絶対時間に単一通信またはトランザクションを完了する特性である。つまり、時間確定性では、指定する時間を幅と考えるのに対して、到着時刻確定性では、指定する時間(到着時刻指定幅)から到着時刻という点を算出し、それに基づいてデータ転送を制御する、という違いがある。この通信プロトコルは、時間確定性保証通信プロトコルを拡張し、現在のネットワークの状態を基にデータ転送を制御して、データ量や発生周期の異なる画像および音声情報の送信遅延時間の安定性を保証するものである。計算機シミュレーションの結果、トラヒックが変動しても、到着時刻指定幅の70%の値から算出される到着時刻で安定した到着時刻確定性を保証できることを示した。

第5章は、オブジェクト指向に基づく制御機器のモデル化と分散オブジェクト管理機構の実装方式の提案である。生産ラインにおいて制御機器の構成が変更した場合の影響を受けない生産管理アプリケーションの開発を可能とするため、機器の物理情報を隠蔽したオブジェクトモデルを作

成した。このオブジェクトモデルは、生産状況の監視と故障時の保守の両方に対応可能なモデルとした。また、PLCを例として試作システムを開発し、必要なメモリサイズと応答時間に関する性能評価を行い、提案した制御機器モデルと分散オブジェクト管理機能の有効性を確認した。

第6章は結論と今後の課題を述べた。

論文調査の要旨

情報処理技術やメカトロニクス技術の進展により、製造業における生産システムは、製品や部品の設計・加工・組立・検査、さらには物流をネットワークを用いて統合化する大規模分散システムとなっている。このようなシステムを一般にCIM(Computer Integrated Manufacturing)と称し、上から、企業、工場、エリア、セル、ステーション、装置の6階層にモデル化されている。製造業の生産管理部門の情報系システムは、企業、工場、エリアの上位3層に対応し、ネットワークには事実上の標準TCP/IPを用いることによって、計算機間の相互接続も比較的容易に行うことができる。生産ラインにおける制御系の分散処理は、実際に制御を司る各制御機器や入出力機器を中心に構成され、ステーション、装置の下位2層に対応する。これらの機器を管理し上位層との連携を採るのがセル層の計算機である。各制御装置は固有の通信プロトコルを利用しているので、生産ラインを適時に再構成するには柔軟性や拡張性の点で問題が多く、情報系上位層との連携が悪い。

著者は、生産管理部門と生産ラインの連携を強化するための2つの問題点を先ず明らかにしている。第1に、ステーション層に配置された各制御機器間で協調動作を実行するための制御データは、比較的データ長が短く、発生間隔も短い。さらに、これらの制御データは、分散システムの構成要素である各制御機器の物理的動作の一貫性を保証するために、予め決められた時間以内に通信先の制御機器に到着することを保証する必要がある。一方で、生産ラインにおける生産状況の把握および制御機器の稼動状況の管理を行うためにステーション層からセル層に送られる生産管理用データは、制御データに比較するとデータ長が長く、また発生間隔も長い。また、このデータが欠落した場合の被害も少ない。これまでは、同一ネットワーク上で、上記の2つのデータを混在させる通信方式がなかったために、それぞれ独立したネットワークを用意することで対応していた。また、制御用に短い間隔で発生する非周期性の通信データを、ある定められた時間以内に送信することを保証する通信方式は国際標準として提案されていない。

第2に、生産ラインにおける制御系の分散処理は、各種機器の制御を実時間で実行するために接点番号などハードウェアに依存した情報を基に動作している。これに対して、生産管理部門における情報系の分散処理は、生産ラインから収集したデータの処理を行うソフトウェアを動作概念の

中心としている。生産管理用データ収集時に、セル層にある計算機からは、生産ラインを構成する各種機器が持つ、ハードウェアに依存した情報を指定することで連携を採っているため、生産ラインの構成変更に対する柔軟性がとほしい。

第1の問題を解決するために、著者はまず、セル層とステーション層の間で、国際標準プロトコルを基本とし、制御情報伝送と生産管理用データ収集を両立できる通信プロトコルを提案している。この方式は、各通信データを、制約時間幅の緊急度に応じて即時送信キューと一時待機キューに振り分けて処理するものである。転送完了要求時間やネットワーク負荷を変化させた場合の転送性能を計算機シミュレーションにより評価し、提案方式が有効に働くことを検証している。次に著者は、この通信方式を拡張し、データ量や発生周期の異なる画像および音声情報の転送遅延時間の安定性を保証する方式を提案し、計算機シミュレーションにより実現性を確認している。この方式により、画像や音声を利用して生産ラインの状況を把握するのに役立てることができる。

第2の問題、すなわち、最適な生産ラインを構築するために必要な異機種統合システム構築を実現するための解決策として、オブジェクト指向技術に基づく制御機器のモデル化と分散オブジェクト管理機構の実装方式を提案している。ここではまず、生産ラインにある制御機器の構成を変更してもその影響を受けない生産管理アプリケーションを開発できるようにするために、制御機器のオブジェクトモデルを与えている。機種依存情報がオブジェクト内に隠蔽されるので、システム構築の生産性を向上させることができる。続いて、上でモデル化した制御機器の各オブジェクトが分散環境において協調動作するために必要な分散オブジェクト管理機能の実装方式を提案し、オブジェクト設計に基づくシステムを試作して評価し、オブジェクト設計を用いても性能の低下が実用上で問題にならないことを明らかにしている。制御機器は一般にCPU性能やメモリ性能が限定されている。オブジェクト設計の下でもそれらの制約内で実装が可能であることを示している。

以上を要約すると、本論文は製造業の生産管理部門における情報系システムと生産ラインにおける制御系システムの連携を強化する通信方式を提案しその有効性を示したもので情報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) 田中省作(福岡県)
 学位記番号 シ情博甲第88号(工学)
 学位授与の日付 平成12年3月27日
 学位論文題名 名詞句の意味解析に関する研究
 論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 日高 達
 (副査) // // 迫江 博昭
 // // // 松尾 文碩

論文内容の要旨

本論文の研究対象は、日本語の名詞句「NPのNP」である。名詞句「NP₁のNP₂」は、2つの名詞句NP₁、NP₂が助詞「の」で結合して構成された名詞句で、日本語文中では頻出する基本的表現である。名詞句「NP₁のNP₂」で、「の」にあたるNP₁、NP₂の間の意味関係は多様であることが知られており、その意味構造を推定することは日本語の機械処理における難しい研究課題の1つである。

このような名詞句「NPのNP」に対して、Montagueの自然言語の形式化に基づいた文法体系(以後、提案文法と記す)が提案されている。提案文法は、Montague文法の名詞句「NPのNP」への適用であり、統語構造を構成する統語規則と意味構造を構成する翻訳規則を1対1に与え、統語構造と意味構造を厳密に対応づけている。よって、名詞句の意味解析を統語レベルで処理することができる。

しかし、実際に、提案文法に基づいた名詞句「NPのNP」の意味解析システムの構築には、次のような問題があった。

提案文法では、名詞句を意味的観点から、(a)固体を指示する名詞句(項句)、(b)性質を表す名詞句(普通名詞句)、(c)固体や事象間の関係を表す名詞句(関係名詞句・事象名詞句)に細分化することによって、統語規則と翻訳規則を厳密に対応づけた。だが、現時点で、このような統語範疇に関する情報を記述した単語辞書はない。よって、まずこの名詞の統語範疇に関する情報を獲得する必要があった。

また、項句をT、普通名詞句をCNと表すと、提案文法は、名詞句「TのCN」における『所有関係』や『位置関係』といったT、CN間の意味関係を推定する必要性を明らかにするに留まり、その具体的な推定法は示していない。

さらに、名詞の統語範疇に関する情報を獲得し、意味関係の推定法を確立したとしても、統語解析の結果、複数の統語構造が得られる統語的曖昧さの問題が生じる。Montague文法の枠組みでは、翻訳された意味構造を、意味公準や公理および推論規則から、定理証明により絞り込む。だが、定理証明における決定不能性や処理時間の点から実用的とはいえない。

そこで、本論文は、提案文法に基づいた名詞句「NPのNP」の意味解析システムの構築を目的とし、上記した問題の解決について述べたもので、以下の6章より構成される。

第1章の序論では、本研究の背景と目的、主な研究成果、各章の概要を述べる。

第2章では、Montagueの自然言語の形式化、提案文法に関する基本的事柄、提案文法に基づいた意味解析システム構築上の問題点を述べる。

第3章では、名詞の統語範疇の分類について述べる。本

論文では、既存の単語辞書と計算機可読の大規模用例を基に、名詞の統語範疇の分類を行った。既存の単語辞書を用いて、項句と事象名詞句に属す全ての名詞、関係名詞句に属す一部の名詞(関係名詞)が正しく分類される。単語辞書で分類できなかった普通名詞句に属す名詞(普通名詞)と関係名詞は、用例中の「 NP_1 の N_2 」で、 N_2 が普通名詞か関係名詞かによって、 NP_1 の意味範疇の散らばりが異なることが予想される。この意味範疇の散らばりを定量化し、普通名詞と関係名詞の特徴量とした分類実験を行い、その有効性を明らかにした。

第4章では、「 T の CN 」における T 、 CN 間の意味関係について述べる。本論文では、提案文法の非終端記号をそれが導出する句の主辞で細分化し、語彙共起制約文法に変換する。このとき、新たに増加する統語規則に対する翻訳規則は、元の提案文法から容易に記述される。そして、「 T の CN 」の意味関係を、名詞句「 T の CN 」を構成する統語規則に対する翻訳規則中に具体的に付与する。だが、「 T の CN 」の T 、 CN の組み合わせは多く、意味関係の記述量は膨大となる。そこで、 T 、 CN の主辞と意味関係の組から成る用例を収集し、統計的手法(k -NN推定法を用いたBayes決定法)に基づいて意味関係を推定する。実験の結果、比較的高い精度で意味関係が付与できることが示された。

第5章では、名詞句の統語解析時における統語的曖昧さの解消について述べる。語彙共起制約文法では語彙共起制約が統語規則で表現されるため、この文法による統語解析では不適格な語彙共起を含む統語構造は抑制される。しかし、なお統語的曖昧さが生じる場合がある。そこで、この語彙共起制約文法を確率化し、統語的曖昧さを解消する。実験の結果、高い精度で曖昧さが解消された。

第6章では、本論文の総括および今後の課題を述べる。

論文調査の要旨

本論文は、助詞「の」で連結された名詞句の意味解析に関する研究をまとめたもので、統計的手法による普通名詞と関係名詞の分類法、連結が暗示する意味関係の推定、および名詞句の意味解析システムの3部から構成されている。

自然言語の意味解析の研究は、Montagueによる自然言語の論理意味論の体系が発表されてから盛んになったが、名詞句の意味解析については今なお難しい研究課題の一つになっている。

「 NP_1 の NP_2 」は、日本語に頻出する典型的な名詞句のタイプであり、その構文・意味解析についてはMontague流の形式化に基づいた文法体系が提案されている。その文法体系では、名詞句を(1)固体指示句(項)、(2)性質を表す普通名詞句、(3)固体間の関係を表す関係名詞句、(4)事象名詞句に細分化して、統語規則と意味規則が構成されている。しかし、この文法体系で名詞句「 NP_1 の NP_2 」の意味解

析システムを構築するには、さらに次のような問題を解決する必要があった。

- (1)どの単語が関係名詞であるかを明示する。
- (2)統語規則「項→項・の・普通名詞」に対応する意味規則で、項が指す固体と普通名詞の固体との間に暗示される意味関係(2項述語)を指定する。
- (3)構文解析で発生する曖昧性を解消する。

著者は、普通名詞を修飾する名詞の多様さが関係名詞を修飾する名詞の多様さに比べて大きくなることを推定している。そこで、修飾名詞の多様さをエントロピーとして定量化し、エントロピーの大小によって普通名詞と関係名詞を統計的に類別する実験を行い、その有効性を明らかにしている。「項・の・普通名詞」で暗示される意味関係については、(項の主辞、普通名詞(単語)、暗示される意味関係)の3組から成る用例を収集し、 k -NN推定法を用いて「項・の・普通名詞」で暗示される意味関係が高い精度で推定できることを実験により示している。また、暗示される意味関係は、項の主辞と普通名詞の組合せによって異なるので、文法規則を統語範疇 X と主辞 h の組 $X(h)$ を細分化統語範疇として文法を組立てる必要があることを指摘している。構文解析における曖昧性の解消は、Montague文法の枠組みでは、意味公準を用いた自動証明によって行うことになるが、この方法は意味公準の収集の困難さや自動証明の時間複雑性から実際的でない。著者は、統語規則を語彙共起制約確率文脈自由文法に変換し、生起確率が最大の統語構造を出力することにより、高い精度で曖昧さが解消されることを実験により実証している。

以上を要約すると、本論文は、日本語に頻繁に現れる名詞句「 NP_1 の NP_2 」の意味解析システム実現の上で障害となる問題の解決策を示したもので、言語工学に寄与するところが大きい。よって、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) 諸岡健一(佐賀県)
学位記番号 シ情博甲第89号(工学)
学位授与の日付 平成12年3月27日
学位論文題名 視点計画に基づく3次元曲面物体自動モデリングに関する研究

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
" " " 迫江 博昭

論文内容の要旨

ロボットに物体の表面形状データを獲得する機能を持たせることで、その実環境への適応能力が大幅に向上すると考えられる。本論文では、視覚処理により得られる3次元

距離画像に基づいて、任意の物体の全周形状モデルを自動生成する手法を提案する。

距離画像は、ある視点から観測した物体表面までの奥行き情報を画素値とした画像である。物体の全形状を知るには、異なった視点から得られる複数の距離画像で全周を覆い尽くす必要がある。この時、2つの距離画像は対象表面の同一部分をデータとして含んでいなければ、それを繋ぎあわせて統合できない。一方、重複部が大きすぎると全周を覆うために必要な距離画像の枚数が増加してしまう。しかも1枚の距離画像だけでもそのデータ量は膨大である。このような画像取得問題を解決し、画像枚数をできるだけ低減してモデル生成を効率良く行なうため、本論文では、オンライン視点計画法とそれに基づく自動モデリングシステムを開発した。このシステムでは対象物を囲む仮想球面から最適視点の決定、距離画像の取得、画像統合による部分モデルの更新を繰り返して全周モデルを生成する。本論文は、これらの研究成果をまとめたもので、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、本研究で開発したモデリングシステムの全容について述べた。まず、システムの構成装置であるレンジファインディングシステムと6自由度マニピュレータを紹介した。次に、モデル生成に必要な基本技術である画像記述、画像の位置合わせ及びデータ統合の各処理法を示した。このうち、画像の位置合わせでは、画像間のデータ点の対応関係を求めるのに多くの計算時間を要する問題がある。そこで、画像間の重複部にあるデータ点だけが対応点を持つことに着目して、データ数の削減や探索範囲の限定によってこの問題を解決した。

第3章では、物体全周の形状データを効率良く取得するための最適視点計画法について述べた。この視点計画法は、1) 対象物を完全に覆う仮想球面から視点候補を選び、2) 既に計測された物体表面を表す部分的なモデルを用いて、各候補の適切さを評価し、最適な視点を決定するものである。視点評価過程では、画像枚数の低減、重複部の保証、データの計測精度を視点の評価基準とし、これによりモデルの精度を保証し、物体モデリングの効率を向上させた。また、物体未測定領域、データの計測精度、データの重複領域を定量化し、視点計画のあいまいさを減少した。

第4章では、2次元配列による新しい近似球面表現法と、その球面上の領域抽出法について述べた。本視点計画では、球面の代わりに、離散化された近似球面を用いて、部分モデルの表面を球面へ投影した領域を抽出している。提案した手法をこの処理に適用することで、繰り返し手続きや球面の全探索を要する従来の球面表現法と比べ、視点計画に要する計算時間を大幅に短縮できた。また、抽出した領域を格納した参照テーブルを予め作成し、オンライン視点計

画では、それを利用することで、より高速な領域抽出が可能となった。最後に実験により本手法の有効性を示した。

第5章では、画像統合による部分モデルの更新に伴う視点評価値計算法を提案した。具体的には、画像統合前後の部分モデルの変化が、画像との重複部と、新たに走査された領域だけであることに着目し、それらの領域だけ用いて評価値計算を行ない、加えて、領域参照テーブルを使用して、視点評価値の計算コストを最小限に抑えられた。最後に、アルゴリズムの解析により本手法の有効性を示した。

第6章では、提案したオンライン視点計画を使ってモデル生成実験を行ない、その結果を示した。まず、2次元モデルを用いたシミュレーションにより、均等に視点を配置する方法との比較実験を行ない、本手法の有意性を示した。次に、様々な形状を持つ3次元物体のモデリング実験を行ない、取得する画像枚数をできるだけ抑え、精度の良いモデルを生成した。また、このモデル生成での視点計画の計算時間は、部分モデルのデータ数に関係なく常に一定であり、提案した視点計画法がオンラインモデリングに有効であることを示した。

第7章では本論文の結論について述べた。

論文調査の要旨

コンピュータビジョンによる3次元物体の認識は、実環境で行動し作業をおこなう自律ロボットには欠かせない機能である。しかし視覚では物体の裏側は観測できない。可視部分も視点位置により見え方が変化する。さらに、物体形状のコンピュータ内部表現モデルが、認識段階での視覚入力情報との照合に必要となるが、曲面で構成された複雑な物体の場合そのモデル生成も困難である。このように3次元認識機能の実現には多くの課題が残されている。本論文は、ロボットの有する行動機能を生かして、対象物体の周囲で能動的に視点を変化させ、3次元物体形状モデルを生成する手法に関するものである。

ステレオ視の手法を用いて、3次元物体の表面で計測した多数の離散点の3次元座標からなる距離画像が得られる。さらに、物体周囲の異なった視点から、全表面を覆いつくす枚数の距離画像を得てそれらを統合すれば全体形状を復元できる。しかし、距離画像は大量のデータを含むため、その数が増加するとモデルを生成するまでに膨大な時間がかかってしまう。処理すべき距離画像の数を抑えつつ全周表面を計測するには視点の数とその配置をどのように決定すればよいか、また得られた複数の距離画像をどのようにつなぎ合わせるかが主要な問題となる。本研究は、視点の計画、距離画像の獲得、および統合をオンラインで反復することにより、3次元物体の全周形状モデルを精度よくまた効率的に生成するシステムを開発したもので、以下の点で評価できる。

第一は、未知の3次元物体の形状モデルを生成するため、

その回りを取り囲むように設定した仮想球面上で最適な視点を計画する手法を開発したことである。各視点候補について、全周形状情報を得るための画像枚数の低減、各画像の繋ぎ合わせに不可欠な重複部の保証、および観測視線方向と対象面のなす角度に依存する計測精度の向上のそれぞれへの寄与を定量化する評価関数を考案し、これに基づいて観測視点を計画することにより、少ない観測点で形状再現精度のよいモデルを生成できることを明らかにしている。

第二は、球面の新しい計算機内部表現法を考案したことである。視点計画では、球面に均等に離散配置された視点候補に対し、種々の評価計算を行う。そこで、本来1次元配列である計算機記憶領域に3次元球面を展開する効率的な近似表現法とそのデータ構造を考案し、さらに隣接視点や連続領域計算あるいは極座標変換などの処理アルゴリズムを開発したうえで、誤差と計算量の評価を行い、考案した近似表現法が視点計画の高速化に有効であることを示している。

第三は、全周モデル生成プロセスにおいて仮想球面上での対象物体の可視度計算の占める割合が大きいことに着目して、これを効率化するアルゴリズムを考案したことである。視点を変えて新たな距離画像を得る毎に対象形状の既知表面が増加するが、可視度計算をこの増分のみに限定することで計算コストを一定に保ち、さらにデータテーブルを活用してモデル生成計算時間の低減に成功している。

以上要するに本研究は、任意の曲面で構成される複雑な形状を有する3次元実物体に対し、計画に基づいた観測視点から能動的に距離画像を獲得し統合することにより、精度のよい全周形状モデルを生成する手法を提案し、その有効性を示したもので、ロボット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) 米元 聡(福岡県)  
 学位記番号 シ情 博甲第90号(工学)  
 学位授与の日付 平成12年3月27日  
 学位論文題名 多視点動画像処理による人間の動作推定に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 谷口 倫一郎  
 (副査) " " 長谷川 勉  
 " " " 迫江 博昭

## 論文内容の要旨

拡張現実感、仮想現実感など、近年加速度的に発達しているマルチメディア情報処理において、コンテンツとして用いられるものには人工的に創作されるものがほとんどであり、計算機内に構築・蓄積するデータの作成には極めて人手を要するという限界が見えはじめている。人的な負担

の削減やリアリティの高いコンテンツ作成のためには、自動的に実世界の有する豊富な情報を獲得する技術が必要となる。本研究は、視覚能力を機械的に実現しようとするコンピュータビジョン研究の応用として、リアリティの高いイメージメディア情報を実世界から自動獲得する方式の開発を目的とする。実世界において中心となるのは人間であり、人間に関する情報獲得及びその再生方式の実現が望まれていることから、特に人間に関する3次元的な動作情報の獲得・再生の問題に焦点を当て研究を行うものである。リアリティの高い人体に関する情報を実世界から獲得し、計算機上の仮想空間に再生するには、解析するための技術であるコンピュータビジョン、およびそれを補い再生するのに必要な技術であるコンピュータグラフィックスの両技術が必要となる。特にコンピュータグラフィックス技術は、その解析過程における利用、あるいは解析結果と再生時の最終的な出力とをシームレスに繋げる中間的な手段としての利用において有効な役割を果たすものである。

本論文は上記の目的を実現する3つの研究課題についてまとめたものであり、5つの章から構成されている。第1章は序論である。第2章は、人間のように複雑な構造、様相を有する対象物に関する形状特性や姿勢変化などの情報を画像情報からどのように獲得できるかに焦点を当てたものであり、その実現のための基本的な枠組となる「画像生成による解析」について説明する。「画像生成による解析」とは、シーンを記述する撮像環境や対象物に関する属性をパラメータ表現してモデル化し、対象物モデルの像の生成過程において計算されるモデル特徴と実際の画像特徴とを2次元上で照合することで、3次元シーンを推定するモデルあてはめの方法である。その枠組に基づいた具体的なシステムとして本章では多視点動画像を用いた3次元多関節物体追跡システムを提案する。このシステムはテクスチャ性を基準とした特徴点を画像特徴として用いるため、対象物をあまり限定しないという汎用性がある。またZ Buffer法により隠蔽を考慮したモデル特徴を生成するため、多関節物体のように画像特徴とモデル特徴の選択が困難な場合にも対処できる。すなわち本手法は、非剛体的に変形する対象物や、複雑な自己隠蔽を画像上で生じる対象物に適用可能な物体追跡法であり、アニメーションビルダのように実世界から形状や姿勢変化などの情報を獲得する手段として用いることができる。

残りの2つの研究課題は、上記の枠組の下では達成することが難しい実時間性の実現に研究の焦点を当てたものである。まず第3章では、カラーマーカを用いた光学式モーシオンキャプチャシステムについて提案する。マーカを用いたシステムは、複雑な動作を容易に獲得することが可能な技術であるため、コンピュータビジョン技術応用の中でも実用化され多くの分野において成功した技術の1つであるが、実時間性、オンライン性の実現が課題であった。本

論文で提案するシステムは、安価で高性能な計算機環境（PCクラスタ）を用いた汎用的な多視点動画画像処理環境上に実装することで実時間性、オンライン性を実現し、多視点情報の融合によりロバスト性を実現するという特徴を有しており、上記の課題を克服するものである。

続く第4章では、3章のシステムを非接触型の方式に拡張し、カラーマーカのような特別な器具を人体に装着しない場合の方法について提案する。特別なマーカが装着不要な方法は、計測空間を意識しない知的な仮想空間生成のように仮想と現実を融合することを目的としたアプリケーションへの適用に必要な技術である。この場合、人体に関して抽出可能な画像特徴が限られるため、少数の画像特徴より全身動作を再生するための対処法として、実時間の逆運動学解法を提案する。前者のカラーマーカを用いたモーションキャプチャ方式は、複雑な動作を計算機上に実時間で獲得する目的に利用でき、後者の非接触型の方式は、ユーザに器具装着の負担をかけずに必要最小限の人体動作を実時間で獲得するという特長がある。

第5章では、結論として本論文で得られた結果を総括する。

## 論文調査の要旨

拡張現実感、仮想現実感など、近年急速に発達しているマルチメディアシステムにおいて、コンテンツは人工的に作られるものが多く、その作成や収集に極めて多くの人手を要するという問題が起ってきている。人的負担の軽減やリアリティの高いコンテンツ作成のためには、実世界の有する豊富な情報を自動的に獲得する技術が必要となるが、マルチメディアシステムで伝えられる情報の多くは人間に関する情報であるため、人間の活動に関する情報の獲得及びその仮想空間内での再生方式が特に重要である。以上の背景から、本論文は、視覚能力を機械的に実現しようとするコンピュータビジョン研究の応用として、多視点動画画像から人間の3次元的な動作情報を自動的に獲得するシステムを開発したもので、以下の点で評価できる。

第一は、人間のように複数の部位が関節で結合され変形するような複雑な構造を有する対象物について、対象物の形状特性や姿勢変化といった幾何学的情報を多視点画像情報から獲得する手法を開発したことである。本研究では、シーンを構成する撮像環境や対象物の形状に関する属性をパラメータで表現した上で、対象物モデルの像の生成過程を通して得られるモデル特徴と実際の画像から得られる特徴とを2次元画像平面上で照合し、そのずれが最も小さくなるような形状パラメータを最急降下法によって求めるといった手法を提案した。提案手法では、Zバッファアルゴリズムにより隠れを考慮したモデル特徴を生成するので、多関節物体のように複雑な自己隠蔽が起こる対象に対して形状や姿勢の推定が精度良く行われるだけでなく、対象物の部

位を変形可能な超2次曲面で表現することにより部位の変形も検出できるという特徴を有している。

第二は、上述の手法では多関節変形物体を精度良く追跡できるものの、その計算量の多さから実時間処理が困難であるという問題点を解決するために、人体の主な関節位置に12個のカラーマーカを装着するという制約を導入することで、実時間で人間の姿勢を推定するシステムを開発したことである。このシステムでは、カラーマーカの3次元位置を画像処理で計測することにより人間の姿勢を推定することが可能になっている。本研究では、カラーマーカの3次元位置推定を正確に行うために多視点情報を融合するとともに、その実時間処理を実現するために分散メモリ型並列計算機上にシステムを実装している。その結果、一般的なテレビカメラの画像読みとり速度である1秒間30フレームの速度で姿勢推定が可能であることを示している。また、仮想空間内のボールを蹴るという応用を取り上げ、人間の全身動作による計算機とのインタラクションが本システムを用いてスムーズに実現できることを示している。

第三は、被計測者の負担を軽減するため、カラーマーカを用いた方式を拡張し、マーカの不要な非接触型の方式を開発したことである。カラーマーカを人体に装着しない場合は、人体に関して抽出可能な画像特徴が限られるため、少数の画像特徴から全身動作を推定する必要がある。ここでは、画像処理で安定に検出できる部位である手先、足先、頭部、胴体の3次元位置を多視点画像処理によって求め、これらから人間の形状モデルを構成するのに必要な肘や膝の位置を高速に推定する手法を提案している。カラーマーカを用いた手法に比べると、姿勢推定の精度の点では多少劣るものの、特別な器具を装着しないためユーザにとっては負担の少ない方法であると言える。また、この方式もカラーマーカを用いたシステムと同様に、実時間で動作可能であることを示している。

以上要するに本研究は、人間の3次元的な動作情報を獲得することを目的として、多視点動画画像から3次元の多関節変形可能物体の姿勢を推定する手法を提案すると共に、人体形状の構造上の制約を積極的に利用して実時間で人間の姿勢を推定する手法を提案し、それらの有効性を明らかにしたものであり、知能システム学上価値ある業績である。よって、本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 増田 剛(福岡県)  
学位記番号 シ情 博甲第91号(情報科学)  
学位授与の日付 平成12年3月27日  
学位論文題名 A Study on Practical Use of Design Patterns for Constructing Evolutionary Software(発展型ソフトウェア構築

のためのデザインパターン実用に関する  
研究)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 牛島和夫  
(副査) // // 荒木啓二郎  
// // // 牧之内 顕文

## 論文内容の要旨

近年、ソフトウェアを取り巻く環境の高度化・広域化に伴い、ソフトウェアに対する要求が益々複雑化してきた。このため、ソフトウェア開発の最初の要求分析段階において、すべての要求を挙げることが困難な状況が生じている。また、そのような環境は近年急速に変化しており、ソフトウェアがこれに対応していかなければならない状況を生み出している。このような状況において、ソフトウェアには、一旦設計した後に現われる新たな要求に対応するために、ソフトウェア自身の発展を可能にする柔軟性と拡張性が強く求められる。本研究ではこのような柔軟性・拡張性を備えたソフトウェアを発展型ソフトウェアと定義する。発展型ソフトウェアの構築方法論の1つとしてオブジェクト指向技術を用いる方法がある。オブジェクト指向技術による抽象化の概念を用いることにより、ソフトウェアの修正や変更を容易にする高い柔軟性、拡張性の実現が可能である。しかし一般に、オブジェクト指向によるソフトウェアの設計は、経験を要する作業であり、そのような優れた設計を行なうことは容易ではない。この問題に対する有効な解決手段の1つとして、ガンマらによって提案されたデザインパターンがある。

デザインパターンとは、オブジェクト指向設計において頻繁に現れる重要な設計に名前を付け説明を加え評価したものである。デザインパターンは過去に成功した優れた設計を集めたものであるため、それらを用いることは、ソフトウェアの変更や拡張の見通しをよくする高い柔軟性、拡張性の実現という観点からも有効である。しかし、無秩序なデザインパターンの適用は、逆に設計を複雑にしたり、性能を犠牲にしたりすることになりかねない。従って、高い柔軟性、拡張性を実現するために適切なデザインパターンを適用するための体系的な方法論が必要である。これまでデザインパターンを適用したソフトウェア開発の事例が数多く報告されている。しかしそれらの事例の中で上記のような方法論については述べられていない。そこで本論文は、発展型ソフトウェアを構築するためのデザインパターンの活用方法を提案したものであり、5章からなる。

第1章は序論であり、研究の背景と動機を述べた。

第2章では、発展型ソフトウェア構築のためのデザインパターンの活用方法について述べた。具体的には、ソフトウェア中で将来、変更要求、及び拡張要求が予想される箇所をホットスポットと定義し、ホットスポットに関連付け

たデザインパターンの活用方法を提案した。提案手法では、ソフトウェアのホットスポットを同定し、各ホットスポットが要求する変更注目し、その変更に対して活用するデザインパターンを対応付ける。そのため、本論文では、ガンマらの23個の各デザインパターンについて、それらが扱うことのできる変更、拡張要求という観点からそれらのパターンの整理を試みた。デザインパターンの多くは、そのパターンがどのような変更に対してどのような柔軟性を意図しているかを明確にしているため、このようにホットスポットと関連付けたデザインパターンの活用は、ソフトウェアの柔軟性の実現に対して有効である。また、ホットスポットと適用するパターンを結びつけることは、なぜそのパターンを適用したかその理由を文書化することにも繋がる。このことは将来の変更や拡張において非常に有用である。

第3章では、機械学習の分野で研究開発されている決定木学習システムを用いた事例研究について述べた。第2章で述べた活用方法論に基づき、決定木学習システムに関する8つのホットスポットを同定し、延べ15のデザインパターンを活用した。さらに、各ホットスポット毎に、ホットスポットに対する要求とデザインパターンを用いた設計、その結果を文書化した。

第4章では、第3章で行なった事例研究を用いた活用方法論の評価について述べた。現状では、デザインパターン活用が柔軟性、拡張性に及ぼす効果についての定量的な評価が行なわれていないことから、本研究ではその定量的な評価を試みた。具体的には、(1)実際の拡張事例を用いた変更の手間、(2)ソフトウェアメトリクスを用いたソフトウェアの複雑度の2つの観点から、本提案手法を用いてデザインパターンを活用した決定木学習システムと、デザインパターンを活用せずに開発した決定木学習システムの2つの開発事例について評価を行ない、提案手法の有効性を確認した。

また、本研究で行なったソフトウェアメトリクスを用いた評価の中で、特定のデザインパターンと特定のソフトウェアメトリクスとの相関関係を見ることができた。そこで、第4章の後半では、その原因についても考察を行なった。その結果、例えば、オブジェクト間の協調関係をカプセル化するためのパターンである Mediator パターンが、クラスの凝集性の欠如を現わすメトリクス LCOM 値を高くすることがわかった。本論文の中で、ソフトウェアメトリクスとデザインパターンとの一般的な関係についてはまでは明らかにすることはできなかった。しかし、特定のメトリクスとデザインパターンの間の、このような関係を明らかにすることにより、デザインパターン活用の良さの評価や、デザインパターン選択の際の指針への、ソフトウェアメトリクスの利用可能性を示すことができた。

最後に第5章では、本論文のまとめとして、研究の成果および残された今後の課題について述べた。

## 論文調査の要旨

現代社会のほとんどのシステムがソフトウェアに依存している。いったん作られたソフトウェアに対して要求仕様の変更や使用環境の変化がしばしば生じる。しかし、ソフトウェアはそれらの変更や変化に柔軟に対応できるようには作られていないので、要求の変更や環境の変化にソフトウェアを対応させるためのコストがきわめて大きい。一方、社会で必要とされる大規模で複雑なソフトウェアは、その全体を初めから規定することが困難であり、漸増的に機能拡張を行うことによるのみ構築可能である。要求の変更や環境の変化に応じて柔軟に機能や構造を変更し拡張することができるソフトウェアを発展型ソフトウェアと名付ける。

デザインパターンとはオブジェクト指向設計においてしばしば現れる設計問題の解法に名前を付けて説明を加え評価したものである。本論文は、柔軟で拡張性のある発展型ソフトウェアを構築するために、デザインパターンを柔軟で拡張性のあるソフトウェアを開発するために適用する方法を提案しその有用性を評価したものである。

先ず著者は、ソフトウェア中で将来、変更要求や拡張要求が予想される箇所をホットスポットと定義し、ホットスポットに着目したデザインパターンの活用方法を提案している。そのために Gamma らが提示した 23 個のデザインパターンを精査して各パターンが扱うことのできる変更要求や拡張要求の観点からデザインパターンを整理している。これを前提にして、先ず、ソフトウェアのホットスポットを同定し、次に、各ホットスポットが要求する変更に対して先に整理したデザインパターンの中から適応できるパターンを選ぶ。最後に、選ばれたデザインパターンがホットスポットに対する変更要求や拡張要求をどのようにして達成できるかを明記して文書化する。ソフトウェアを変更する作業は容易ではない。たとい設計文書やソースコードが揃っていたとしても、設計からコーディングに至る開発の各段階で行ったさまざまな決定の理由が文書中に残されていないことが多いからである。ソフトウェア変更に当って、すべての決定理由を正しく推測し列挙するのは困難であり、見落としや見誤りを伴う。それに対して、上記の適用理由の文書化はソフトウェアの柔軟性・拡張性の保持にとって意義が深い。

次に著者は、この提案の有効性を評価するために事例研究として、機械学習の分野で研究開発されている決定木学習システムを、デザインパターンを使わない方法と著者の提案による方法の 2 通りで開発し両者の比較を行うことによって著者の方法の有効性を検証している。決定木学習システムは、事例の集合からその分類規則を機械学習によって決定木の形で導くシステムである。決定木を導く際にさまざまな学習アルゴリズムや学習性能を向上させる手

法が多数提案されて来ている。ユーザは与えられた事例集合を前にして学習アルゴリズムや手法を変更し、新しく採り入れながら試行錯誤を繰り返すことが可能でなければならない。決定木学習システムは典型的な発展型ソフトウェアである。

2 通りの方法で開発した決定木学習システムに実際に 6 通りの拡張を施しその際の変更の手間を評価した。その結果、いずれの拡張においてもデザインパターンを活用した版の方が、変更箇所の特定を容易に行うことができるので変更作業が軽減されることが具体的に明らかにされた。何故ならば、活用版ではどのクラスのサブクラスを作成すればよいか、サブクラスではどのメソッドを再定義すればよいかなど、拡張に必要な情報が、デザインパターンそのものと、活用版を設計する際に作成したデザインパターンの活用結果とに記述してあるからである。また、デザインパターンを活用した版が活用しなかった版にくらべて変更に必要なコード行数が約 7 割に収まっていることが分かった。従来、デザインパターンの活用には必ずしも適切な指針はなかった。この研究は、デザインパターンの系統的な活用法を与えたものと見なすこともできる。

なお、事例研究として開発された決定木学習システムは、柔軟性と拡張性に富む優れたソフトウェアであることを指摘しておく。

以上を要約すると、本論文はオブジェクト指向設計におけるデザインパターンを活用して柔軟性と拡張性を有するソフトウェアを開発する方法を提案し事例研究を通してその有効性を実証したものでソフトウェア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)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 松永真由美(福岡県)  
学位記番号 シ情博甲第92号(工学)  
学位授与の日付 平成12年3月27日  
学位論文題名 COUPLED-MODE ANALYSIS OF MULTILAYERED COUPLED MICROSTRIP LINES (多層結合マイクロストリップ線路の結合モード解析)

### 論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 安元清俊  
(副査) // // 西哲生  
// // 立居場光生

## 論文内容の要旨

多層多導体線路系は、マイクロストリップ線路を多層誘電体基板に配置した単純な構造をもち、マイクロ波やミリ波集積回路などに広く用いられている。小型で信頼性の高い伝送路である。また、近接する導体線路間の結合問題の

解明は、電磁界理論における重要な課題として、古くから解析的、数値的な研究対象となってきた。しかし、これまでの研究は、多層多導体線路系の電磁界を直接的に解析するものがほとんどであったため、導体線路の数が増えるにつれて未知関数の数が急激に増加し、応用的な見地から、解析可能な構造に制限があった。それゆえ、多層多導体線路系の解析に関するこれまでの研究の多くは、必ずしも回路素子の設計に効果的に結びついていたとは言えない。従って、解析・設計の両者の重要性という点からみれば、効率よく複雑な構造が簡便に解析できる精度の高い近似解法を開発する事が必要であることが分かる。これに対して、本論文では、多層多導体線路系の結合問題を効率よく解析する近似解法として、結合モード理論を提案している。この結合モード理論は、光回路の解析法として有名であった理論を導体線路系の解析に拡張したものである。

本論文は、多層多導体線路系の伝送特性、結合特性やインピーダンス特性を結合モード理論を用いて理論的に解明した一連の研究をまとめたものであり、5章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景、これまでの多層多導体線路系に対する研究状況について述べ、本論文の目的を示している。

第2章は、本論文の理論的基礎となる、多層多導体線路系に対する結合モード理論の定式化を行っている。最初に、誘電体基板に等方性媒質を用いた構造に対する結合モード方程式を定式化する。結合モード理論は、各マイクロストリップ線路が単独で存在しているときの固有電磁界を基にして、多層多導体線路系の電磁界を結合モード方程式で記述するものである。また、結合モード方程式は、結合係数を要素とする行列方程式の形で与えられるので、多層多導体線路系の結合問題は、標準的な固有値問題に帰着される。固有値は結合ストリップ線路の結合モードの伝搬定数を、対応する固有ベクトルは各ストリップ線路の電流励振率を与える。次に、本論文の全体において参照の便宜を図るために、スペクトル領域法及びガラーキンモーメント法の手法を解説する。各導体線路が単独で存在しているときの固有電磁界や結合係数を導出する際にこれらの手法を用いている。本章では更に、結合モード理論をマイクロ波集積回路の設計に応用するために、回路のモードインピーダンス及びインピーダンス行列を定式化した。

第3章では、第2章で定式化した結合モード理論による具体的な構造の解析と数値解析結果を示している。本章では、結合モード理論が精度の良い近似解法であることを実証することを目的とし、多層多導体線路系の伝送特性、結合特性、インピーダンス特性について数値解析を行っている。解析例として、同一層上に線路を配置した幅の違う2マイクロストリップ線路系と3マイクロストリップ線路系、及び幅の等しいNマイクロストリップ線路系、更に2層の誘電体基板それぞれに配置した2マイクロストリップ線

路系の数値解析を行った。これらの結果が、ガラーキンモーメント法等の直接的解法による解析結果とよく一致していることから、理論の有効性を明らかにしている。

第4章では、誘電体基板に異方性媒質を用いた多層多導体線路系の解析に結合モード理論を発展させている。異方性誘電体を用いたマイクロ波回路はアイソレータ、フィルター等に應用されており、その解析は非常に重要である。しかし、異方性媒質中では、非相反性が伝送波に表れることがよく知られているため、第2章で示した等方性誘電体基板を用いた構造に対する定式化をそのまま用いることはできない。本章では、この問題を解決するため、異方性媒質中を伝搬する電磁界の相反関係式を新たに導いている。ただし、異方性媒質として磁化フェライトを採用した。また、この相反関係式を基に、磁化フェライト基板を持つ多層多導体線路系に対する結合モード方程式を定式化した。解析例として、同一層上に配置した2マイクロストリップ線路の解析を行っている。

第5章は、本論文の結論であり、本研究の成果を述べると共に将来的課題及び展望として、結合モード理論のマイクロ波集積回路設計への応用について議論を展開している。

## 論文調査の要旨

複数のマイクロストリップ線路を多層誘電体基板の上に配置した多層多導体線路系は、マイクロ波やミリ波集積回路における基本的な回路素子として、方向性結合器、電力分配器、フィルタ等に幅広く利用されている。これらの回路素子の特性は、従来は準TEM波近似による静電キャパシタンス行列を用いて議論されてきたが、近年、回路の小型化や使用周波数の高周波化に伴い、電磁波動論に基づいたより正確な取扱いが求められている。しかし、多数の導体線路からなる伝送路の取り扱い是一般に容易ではない。導波路問題に対して数多くの数値解析法が開発されているが、これらの直接的な解法は伝送路の数が増えるに従って膨大な記憶容量と計算時間を要することになる。本論文は、多層多導体線路系における高周波電磁波の伝搬特性を簡便に解析する新しい近似解法として、導波電磁界に対する相反定理を用いた結合モード理論を提案し、種々の結合マイクロストリップ線路の解析に適用してその有効性を実証したものである。その成果は、特に以下に述べる三点において評価される。

第一に、著者は、多層多導体線路に沿って伝搬する高周波電磁波の問題を各導体線路の電流振幅に関する結合モード方程式を用いて近似的に解析する方法を提案している。このような近似解法は一般に結合モード理論と呼ばれるが、これまで導体線路系に適用されたことはなかった。著者は、光導波路の解析に利用されている導波電磁界の相反関係式を導体線路を含む系に拡張し、多層多導体線路に対する結合モード方程式を定式化することに成功している。結合モ

ード方程式における結合行列の要素は各導体線路が単独で存在しているときの固有電磁界及び固有電流分布の重なり積分で与えられている。また、著者は、結合行列の固有値及び固有ベクトルと多層多導体線路系の線路パラメータの関係性を考察し、所望の線路パラメータが結合行列の固有値問題の解を使って簡単に求められることを明らかにしている。

著者は、第二に、提案した結合モード理論を適用し、種々の結合マイクロストリップ線路に対して結合モードの伝搬定数、モード特性インピーダンス、インピーダンス行列を計算している。各マイクロストリップ線路が単独で存在しているときの固有電磁界をフーリエ変換領域で求めることにより、結合行列の要素は電流分布の空間スペクトルを用いた単純な数値積分で与えられる。その結果、簡単な行列演算から、所望の線路パラメータを求めることができる。著者は、共通の誘電体基板上に配置した対称2マイクロストリップ線路、非対称2マイクロストリップ線路、及び非対称3マイクロストリップ線路、更に2層の誘電体基板にわたって配置された2マイクロストリップ線路の解析を行い、簡単な計算で求めた結果がガラキン法を用いた複雑な数値解析の結果に良く一致することを示している。

第三に、著者は、提案した結合モード理論を磁化フェライトを基板に持つ異方性の多導体線路系に拡張している。まず、ある方向に磁化されたフェライト内の電磁界と逆方向に磁化されたフェライト内の電磁界の間に成立する一般化された相反関係式を導出し、次に、この相反関係式と磁化フェライト内を互に逆方向に伝搬する導波電磁界の対称性を利用して、異方性多導体線路の結合モード方程式を導いている。この結合モード方程式は等方性の誘電体基板の場合と全く同じ形をしており、様々な応用が期待される。著者は、その基本的な応用として、共通の磁化フェライト基板上に配置された結合2マイクロストリップ線路の結合モードの伝搬定数を解析し、前進波と後進波における伝搬特性の非相反特性を明らかにしている。

以上、本論文は、多層多導体線路系の高周波電磁結合の問題に対する新しい近似解法として結合モード理論を提案し、種々の結合マイクロストリップ線路への適用例を示してその有効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) 掛橋英典(大阪府)  
 学位記番号 シ情博甲第93号(工学)  
 学位授与の日付 平成12年3月27日  
 学位論文題名 磁気パルス圧縮回路によるHIDランプイグナイタに関する研究  
 論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 二宮 保  
 (副査) // // 原 雅 則  
 // // // 渡 辺 征 夫

## 論文内容の要旨

HIDランプは発光効率が高く明るくしかも長寿命で経済性に優れている特長をもち、強い明るさが求められる道路や大規模空間などに広く用いられている。種々のHIDランプの中でもメタルハライドランプは、高効率であるとともに高い演色性を有するため省エネルギーで快適な照明という時代の要請に適合するものとして急速に普及しつつあり、ハイビジョン放送に対応するサッカースタジアムなどの照明、店舗における商品を強調するスポット照明、液晶プロジェクタ用バックライトや自動車用ヘッドライトなどの用途へも展開されている。

メタルハライドランプは一般に放電開始電圧が高いため点灯させるにはイグナイタと呼ばれる高い電圧を発生する始動装置が必要となる。数kV程度の電圧パルスを出力する従来のイグナイタでは、ランプが冷えた状態における始動は可能である。しかし、ランプ点灯中に一旦消灯した後ただちに始動させようとする、ランプの管内は高温、高蒸気圧の状態で放電開始電圧が高くなっているためすぐには始動できないという課題があり、ランプが冷却して放電開始電圧が低下し始動が可能になるのに数分から数十分の時間を要する。一方、ランプ消灯後ただちに点灯可能な瞬時再始動の要求は、メタルハライドランプの用途展開に伴い増大してくるとみられる。たとえば、スタジアム照明では電源システムの停電復帰後すぐに照明の使用が可能となりスポーツやイベントの中断時間を大幅に短縮することが可能となる。また、自動車用ヘッドライトでは安全上瞬時再始動は必須である。

メタルハライドランプを瞬時に再始動させようとする、ランプの種類によっては数十kVの高電圧が必要となるが、従来の技術では性能、大きさ、経済性の面からこのような高電圧を発生するイグナイタの実用化は困難であった。イグナイタ回路の基本原理は、キャパシタに蓄えられた電荷をスイッチをオンすることによりパルストランス一次側へ放電して巻線数の多い二次側に電圧パルスを出力するもので、瞬時再始動の実現を狙い許容サイズで出力パルスの高電圧化を図ろうとすると、高耐圧、大電流のスイッチが必要となる。しかし、従来より用いられている半導体スイッチでは信頼性に優れたもののスイッチングできる電圧、電流に制約があり、また、古くから知られている放電ギャップスイッチではパルスの安定性やスイッチの寿命に根本的な課題がある。

そこで本研究では、堅牢で信頼度の高い磁気スイッチに着目し、半導体スイッチと併用して磁気パルス圧縮回路を構成することにより、半導体スイッチの責務を軽減し安定

性、信頼性に優れた高電圧パルスの発生が可能なイグナイタの提案を行い、メタルハライドランプの瞬時再始動を実現した。本論文は、これらの研究成果をまとめたもので、以下の4章からなる。

第1章では、研究の背景とメタルハライドランプの始動と再始動に関して述べた後、従来のイグナイタ技術について説明し、課題と本研究の目的を示している。

第2章では、磁気スイッチと磁気パルス圧縮回路の動作原理を説明し、HIDランプイグナイタへ応用するための条件について述べた後、一段磁気パルス圧縮による新しいイグナイタ回路を提案している。提案回路において出力パルス性能は各部品パラメータ、磁気スイッチ特性やパルストランス特性の影響を大きく受けると考えられ、提案回路の動作を等価回路を用いて詳述し設計のための解析式を導出している。得られた式を用いてパラメータの最適化を行い、実験検証の結果、試作したイグナイタでは磁気パルス圧縮の効果により10kVのパルス出力が可能であることを明らかにしている。一方、一段構成の磁気パルス圧縮回路で商用電源から数十kVのパルスを得ようとする、更に改善すべき問題点があることを述べている。

第3章では、前章の課題を克服するために磁気パルス圧縮回路を多段化する構成法を提案し、その有用性を示している。まず、多段化の概要を述べた後、提案する二段磁気パルス圧縮回路について回路動作とその等価回路による解析結果を明示している。次に、導出された解析式を用いて最適化設計を実施し、その結果に基づいて試作したイグナイタの特性を述べるとともに解析結果と実験結果の比較検討を行っている。最後に、本技術を応用した実用サイズの2kWメタルハライドランプ用瞬時再始動装置についてその構成と動作特性を示し、半導体スイッチとして安価で制御が容易なパワーMOSFETを用いながら、50kVの極めて安定した高電圧パルスを出力できるイグナイタを実用化したことを述べている。

第4章では、本論文の総括を行うとともにHIDランプイグナイタの将来技術についても展望している。

## 論文調査の要旨

HID(高輝度放電)ランプは、発光効率が高く、しかも長寿命で経済性に優れているという特徴をもち、道路や大規模空間などで明るさが求められる場所、および保守が困難な場所において広く用いられている。種々のHIDランプの中でもメタルハライドランプは、高効率でかつ高い演色性を有するため、省エネルギーで快適な照明空間の提供という時代の要請に適合するものとして、急速に普及しつつある。このメタルハライドランプには、一般に放電開始電圧が高いため点灯させるにはイグナイタと呼ばれる高電圧パルスを発生する始動装置が必要である。数kV程度の電圧パルスを出力する従来のイグナイタでは、ランプが冷え

た状態での始動は可能であるが、ランプ点灯中に一旦消灯した直後、ランプ管内が高温・高蒸気圧の状態となり放電開始電圧が高くなる場合には、すぐには再始動できない。メタルハライドランプの瞬時再始動には数十kVの高電圧パルスが必要となる。一方、イグナイタの基本原理としては、キャパシタに蓄えられた電荷をスイッチのターンオン時にパルストランスの一次側へ放電し、その結果、巻線数の多い二次側に高電圧パルスが出力されることを利用したものであり、瞬時再始動の実現を狙いパルスの高電圧化を図ろうとすると、高耐圧・大電流のスイッチが必要となる。しかし、従来から用いられている半導体スイッチでは、スイッチングできる電圧・電流に制約があり、また古くから知られる放電ギャップスイッチでは、パルス特性の安定性やスイッチの寿命に根本的な課題がある。

本論文は、この課題の解決のために、堅牢で高い信頼性を有する磁気スイッチに着目し、半導体スイッチと併用した磁気パルス圧縮回路を構成することにより、半導体スイッチの責務を軽減しながら安定性、信頼性に優れた高電圧パルスの発生が可能なイグナイタ回路を提案すると共に最適設計法を提示し、その有用性を実証した成果をまとめたものである。

著者はまず、一段磁気パルス圧縮方式のイグナイタ回路を提案している。この方式の原理は、半導体スイッチで作られたパルス電流に対し、磁気スイッチでパルスの圧縮と増幅を行い、その結果得られた大きなパルス電流でパルストランスを励磁し、二次側巻線から高電圧パルスを出力するものである。この提案回路におけるパルス性能は、回路定数や、磁気スイッチおよびパルストランスの特性の影響を大きく受けるので、提案回路の動作を等価回路により詳細に解析し、設計のための式を導出している。さらに、それらの式を用いてパラメータの最適化を行い実験的に検討した結果、約10kVのパルス出力が得られることを確認している。

ついで、一段磁気パルス圧縮方式で数十kVを得ようとする、補助スイッチである半導体スイッチの電圧・電流責務が大きくなると共に、パルストランスの二次側巻線数が多くなり損失が増大するため、磁気パルス圧縮回路を多段化する方式を検討している。ここでは、1個の半導体スイッチと2個の磁気スイッチ、キャパシタ、パルストランスで構成される二段磁気パルス圧縮回路を採用し、各スイッチのオン・オフの組み合わせからなる等価回路を詳細に解析し、出力電圧最大の観点から回路定数の最適設計法を確立している。さらに、その設計法に従いイグナイタを試作して実験検証を行った結果、約50kVの安定した高電圧パルスの発生が可能であることを確認し、2kWメタルハライドランプ用瞬時再始動装置として実用化に成功している。

以上要するに、本論文は、磁気パルス圧縮方式を用いたHIDランプイグナイタ回路を提案すると共に最適設計法

を提示し、試作器で50kVの高電圧パルスが得られることを確認することによって、その有用性を実証した成果をまとめたもので、電気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) 豊田 幸裕(福岡県)  
 学位記番号 シ情 博甲第94号(工学)  
 学位授与の日付 平成12年3月27日  
 学位論文題名 非線形系の同定:火力発電プラント蒸気温度制御への適用に関する研究

#### 論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 和田 清  
 (副査) // // 平澤 宏太郎  
 // // // 長谷川 勉

### 論文内容の要旨

電力需要の運用は、ベース負荷運用、中間負荷運用およびピーク負荷運用という三種の運用形態に分けられ、それぞれに適した発電設備が割り当てられている。近年、電力需要は増加の一途をたどり、昼夜間の電力需要格差も次第に大きくなってきているので、中間負荷運用を担う火力発電プラントへの負荷追従性に対する要求は益々厳しくなっている。負荷変化時には一時的に給水量と燃焼量の均衡が崩れ、蒸気温度、圧力の変動が大きくなる傾向があり、この傾向は負荷追従性を上げるに従い益々大きくなる。火力発電プラントに広く用いられている超臨界圧貫流ボイラでは、耐熱材のクリープ限界付近で使用されることが多く、そのため蒸気温度に対する許容範囲が極めて厳しい。このような条件下、負荷の急峻かつ大幅な変化に対して蒸気の温度と圧力を、許容範囲内に維持すべく制御することはプラントの負荷追従性を改善するためには極めて重要な課題である。これらの問題への対策として、既設PID制御系と並列に設置した制御装置の中に、線形モデルに基づいた最適レギュレータが組み込まれ、負荷変化時の制御性能を改善しようとする試みが見られたが、非線形性がとくに顕著な変圧運転超臨界圧発電ボイラ・タービンプロセスに対しては線形モデル使用に伴うモデル化誤差の問題や、そのモデルに基づいてオフラインで設計された最適フィードバックゲインの切り替えに伴う制御性能劣化の問題が残された。このような背景を踏まえて、本研究では「制御系設計のための同定」という観点から、火力発電プロセスに適した予測モデルとして非線形性を有する対象の負荷変化時の動特性の特徴を表現できる、外生変数依存型ARXモデルを提案し、その有効性を実測データおよびボイラ・タービン動特性モデルによる机上検証実験により確認した。また、このようにして得られた外生変数依存型ARXモデル

より導出した予測モデルに基づいたオンライン最適化制御系の設計を行い、その有効性をボイラ動特性モデルによる検証試験により確認した。ここでは、制御系設計問題の解法を制約付き非線形最適化問題に帰着させ、エンドユーザーが希望するどのような制御戦略のシナリオ(省エネルギー、環境規制など)にも対応可能な方式とした。

第1章では、火力発電プラントが置かれている立場と、更なる負荷追従性の向上と蒸気温度制御、圧力制御とのトレードオフの関係を示し、本研究の動機と課題を明らかにした。

第2章では、非線形系の同定モデル選定における一般化多項式を用いた非線形同定モデルと非線形近似写像能力に富むニューラルネットの問題点を明記し、提案モデルの優位性を議論した。また制御系設計の観点からは、火力発電ボイラに対する従来のモデルベース予測制御系の問題点を同定と制御の両面から考察し、線形モデルと最適制御ゲインを運転条件に応じて切り替えていく際の予測精度と制御性能の両面にまだ改善の余地が残されていることを指摘した。

第3章では、給水・蒸気、燃料・空気、火炉・火炉伝熱面からなる基本的なボイラ構成について解説を加え、ボイラプロセスの基本的制御の考え方を説明した。また、ボイラプロセスが有する非線形性に関する特徴を整理し、対象の挙動を支配する固有値が蒸気流量に依存して変化するメカニズムを物理的関係式から明らかにした。このとき得られた知見は、実機同定試験時収集データを用いた固有値解析結果を裏付けるものであった。これらの検討結果から火力発電プラントに特化したモデル構造のヒントを見出し、火力発電プラント特有の非線形性の定式化を行なうことができた。

第4章では、第3章での定式化の検討結果から導出した外生変数依存型ARXモデルの基本式と、その構成未知パラメータを得るための非線形最適化計算について解説し、第5章では、提案モデル検証実験用として構築したボイラ・タービン動特性モデルについて記述した。

第6章ではこの机上検証実験用動特性モデルを用いた提案モデルの未知パラメータの同定シミュレーションと、同定モデルから導出した予測モデルに基づくオンライン最適化制御系について検証シミュレーションを行ない、何れも狙いどおりの性能が得られることを確認した。

第7章では、実機同定試験時収集データを用いて提案モデルの有効性の確認を行なった。

その中の一つのケースは定格350MW変圧運転貫流ボイラの例で、低負荷帯、高負荷帯にて収集した時系列データを用いて構築した一種類の外生変数依存型ARXモデルの低・高各負荷帯での予測精度が、それぞれの負荷帯で得られた二種類のARXモデルとほぼ同等の精度を実現できることを確認した。もう一つのケースは発電所所内ドラム

ボイラの例で、蒸気流量が大きく変動し、非線形性が顕著な条件下において従来の ARX モデルよりも良好な予測精度が得られることを確認した。これら一連の成果を得て実用化のための基礎的研究を終えることができた。

### 論文調査の要旨

年々電力需要は増加の一途をたどり、昼夜間の電力需要格差も次第に大きくなってきているので、中間負荷運用を担う火力発電プラントへの負荷追従性に対する要求は益々厳しくなっている。負荷変化時には一時的に給水量と燃焼量の均衡が崩れ、蒸気温度、圧力の変動が大きくなる傾向があり、この傾向は負荷変化率を大きくするに伴い益々大きくなる。このような条件下において、負荷変化への追従性を上げながら、蒸気温度や圧力を許容範囲内に維持すべく制御することは極めて重要な課題である。これらの問題への対策として、既設 PID 制御系と並列に設置した制御装置の中に線形モデルに基づいた最適制御系が組み込まれ、負荷変化時の制御性能の改善が試みられたが、非線形性がとくに顕著な変圧運転超臨界圧発電ボイラに対しては、線形モデルを用いることによるモデル化誤差の問題や、そのモデルに基づいて設計された最適制御系の性能劣化の問題が残されていた。

本論文は、火力発電プロセスに適した予測モデルとして非線形性を有する対象の負荷変化時の動特性の特徴を表現できる外生変数依存型 ARX モデルを提案することにより、予測精度の改善とこの予測モデルに基づいたオンライン最適化制御系の制御性能を、シミュレーションと実機による実測データにて検証した結果をまとめたものである。

著者はまず、給水・蒸気、燃料・空気、火炉・火炉伝熱面からなる基本的なボイラ構成について検討し、ボイラプロセスの基本的制御の考え方およびボイラプロセスが有する非線形性に関する特徴を整理することにより、対象の挙動を支配する固有値が蒸気流量に依存して変化するメカニズムを物理的関係式から明らかにした。このとき得られた知見は、実機同定試験時収集データを用いた固有値解析結果を裏付けるものであり、これらの検討結果から火力発電プラントに特化したモデル構造のヒントを見出し、火力発電プラント特有の非線形性の定式化を提案している。

次に著者は、先の定式化の検討結果に基づいて外生変数依存型 ARX モデルの基本式を導出し、その構成未知パラメータを得るための非線形最適化計算について検討している。また、制御系設計問題の解法を、制約付き非線形最適化問題に帰着させ、省エネルギー、環境規制などの多くの制御戦略のシナリオに対応可能な方式を提案している。さらに提案モデルの未知パラメータ同定のシミュレーションを動特性モデルを用いて行い、同定モデルから導出した予測モデルに基づくオンライン最適化制御系の有効性を実験的に検証している。

最後に著者は、実機同定試験時収集データを用いて提案モデルの有効性の確認を行っている。一つの実験では、定格 350MW 変圧運転貫流ボイラの低負荷帯、高負荷帯において収集した時系列データを用いて構築した、一種類の外生変数依存型 ARX モデルを用いて得られたそれぞれの負荷帯での予測精度が、低負荷帯、高負荷帯で別々に同定して得られた二種類の ARX モデルの予測精度と、ほぼ同程度の精度が実現できることが確認できた。同定試験に要する時間が約 10 時間程度、またこの試験に携わる人員が 10 名程度ということを考えてみると、提案モデルを用いることは、労力と試験費用の面で大きな改善となる。さらにもう一つの実験では、発電所内ドラムボイラの蒸気流量が大きく変動する、すなわち非線形性が顕著な条件下において、外生変数に依存しない従来の ARX モデルよりも良好な予測精度が得られることを実験的に検証している。

以上要するに、本論文は制御系設計のための同定という観点から、非線形性の強い火力発電プラントに特化した同定モデルを提案してその有効性を実験的に検証し、実用化のための研究をまとめたもので、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) 佐藤克己(山形県)  
 学位記番号 シ情博甲第95号(工学)  
 学位授与の日付 平成12年3月27日  
 学位論文題名 高耐圧・大容量サイリスタの高性能化に関する研究

#### 論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 宮尾正信  
 (副査) // // 黒木幸令  
 // // // 二宮保

### 論文内容の要旨

パワーエレクトロニクス技術は、電力機器、電鉄機器、各種産業機器からコンピュータやその周辺機器などの情報関連機器の電源およびエアコン、洗濯機、冷蔵庫などの家庭電気機器に至る生活のあらゆる分野に展開され、目覚ましい発展を遂げている。この原動力は電力変換と電力制御を担うパワーデバイスの進歩である。パワーデバイスの中で、サイリスタやゲートターンオフサイリスタ(GTO: Gate Turn-off Thyristor)は最も高耐圧化、大容量化が進んだデバイスであり、大電力を変換する電力機器や電鉄機器などに重用されている。

最近、次世紀に向けた社会インフラストラクチャーの整備や生活の利便性追求などによって電力需要は増加の一途にある。一方、温暖化現象などの地球環境問題やエネルギー資源の枯渇問題が重大視され出し、エネルギーの有効利

用、環境保全が強く求められている。この社会的要請に答え、電力分野や電鉄分野において、高効率、小型、軽量の大型電力変換機器を実現するためには、サイリスタやGTOの更なる高耐圧化、大容量化、低損失化が必要とされている。

本論文は世界最大容量(8kV/3.6kA)のサイリスタおよび従来のGTOシステム損失を半減できるゲート転流型ターンオフ(Gate Commutated Turn-off)サイリスタの実現を目的として、新しいデバイス構造の提案と新プロセスの導入を検討したものであり、7章から構成されている。

第1章では、本研究の背景、目的および概要について述べている。

第2章では、従来サイリスタ(6kV)より耐圧を30%以上向上し、高耐圧サイリスタ(8kV)を実現するための課題について検討している。高耐圧化には、ウェハ厚さの増加が必要である。しかし、ウェハ厚の単純な増加はサイリスタの諸特性の悪化を招く要因となる。そこで本章では、ウェハ厚のサイリスタ諸特性に及ぼす影響を解析し、高耐圧(8kV)サイリスタの実現に必要な特性パラメータの目標を示している。

第3章では、サイリスタの高耐圧化に必要な二特性の改善方法を検討している。第一は $dv/dt$ (オフ電圧上昇率)耐量を減少すること無く $di/dt$ (オン電流上昇率)耐量を増加する手法の開発であり、 $di/dt$ 耐量の2倍化を可能にする新ゲート・エミッタ構造を提案している。第二はオン電圧を増加すること無く逆回復電荷を低減する手法の開発であり、荷電粒子をp形エミッタ/n形ベース接合近傍のみに局所的に照射することにより、逆回復電荷の半減が可能であることを明らかにしている。以上の新構造、新プロセスを用いてサイリスタを試作し、世界最大容量(8kV/3.6kA)サイリスタの動作に成功している。

第4章では、GTOのターンオフ過程における破壊モードの解析を行い、「ターンオフゲインが1」となるGCT機構を新たに見出し、その機構の解析を行うとともにその機構で動作するGCTサイリスタを創出している。さらに、そのGCTサイリスタがスナバ回路を付加せずとも遮断動作ができること、および、その遮断耐量が極めて高いこと(300kW/cm<sup>2</sup>から400kW/cm<sup>2</sup>)を明らかにしている。

第5章では、優れた遮断耐量を損なうことなく大容量GCTサイリスタを実現するために、大面積化に伴う面内均一動作の検討を行っている。特に、n形エミッタの幅構造と面積および面内の均一動作との関係を解析し、n形エミッタの幅をゲート電極から各々のサイリスタまでの距離に反比例させることで、均一動作を高めることができることを突き止め、GCTサイリスタの大容量化に成功している。さらに、GCTサイリスタと高耐圧の絶縁ゲート形バイポーラトランジスタ(HVIGBT: High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor)を比較した結果、高耐圧領域(4.5kV以上)では、GCTサイリスタがHVIGBTより優れ

た性能を有していること、したがって、GCTサイリスタが高耐圧・大容量パワーデバイスの次期主要デバイスになり得ること等を指摘している。

第6章では、GCTサイリスタを用いた大容量インバータ回路を構成する際に必要となる高耐圧還流ダイオードの検討を行っている。特に、周辺回路のノイズ源となる逆回復動作時の電流、電圧振動の発生機構を解析し、電流、電圧振動を抑制するための解決策を提案している。

第7章では、本研究全体のまとめとして、研究総括、今後の課題を述べるとともに、その解決策を提言している。

## 論文調査の要旨

パワーエレクトロニクスは電力機器、電鉄機器、各種産業機器から情報関連機器の電源及び家庭電気機器に至る広い分野に適用されている重用技術である。これらを支えているのが電力の変換と制御を行う半導体パワーデバイスである。最近、社会インフラストラクチャーの整備や生活の利便性追求等により電力需要は増加の一途にある。一方、温暖化現象等の地球環境問題やエネルギー資源の枯渇問題に対処する為に、エネルギーの有効利用が強く求められている。これらの社会的要請に応えるには、パワーエレクトロニクスの更なる進歩、なかでも半導体パワーデバイスの高性能化が重要である。

半導体パワーデバイスは入力信号によりオフからオンへの切り替えしかできないが高圧化に適しているデバイスと入力信号によりオンとオフの相互切り替えができる自己消弧形のデバイスに大別できる。各々の中で、最も高耐圧・大容量化が進んだデバイスがサイリスタ及びGTO(Gate Turn-off:ゲートターンオフ)サイリスタである。本研究はサイリスタの更なる高耐圧化とGTOサイリスタの高効率化を目的とし、新デバイス構造及び新プロセス技術の開発を行い、半導体パワーデバイスの高性能化に成功したものである。

本研究により得られた結果は以下の点で評価できる。

- (1) 著者はサイリスタの更なる高耐圧化を目的とし、それに必要な諸要因を要素実験及びシミュレーションを用い解析している。その結果、従来6kV耐圧であったサイリスタを8kV程度に高耐圧化するには「オフ電圧上昇率耐量を減少することなく、オン電流上昇率耐量を2倍化すること」及び「オン電圧を増加することなく、蓄積電荷を半減化すること」が必要であることを明らかにした。
- (2) 上記課題を完遂する為に「主サイリスタが全ての補助サイリスタを個々に取り囲む新ゲート・エミッタ構造」を考案すると共に「荷電粒子をp型エミッタ/n形ベース接合近傍のみに照射するライフタイム制御法」を開発した。以上の結果、世界最大容量8kV/3.6kAの高耐圧サイリスタを試作し実用化に成功した。

- (3) 著者は自己消弧機能を有する GTO サイリスタの高効率化を目的とし、その動作特性を要素実験及びシミュレーションを用い解析している。その結果、ゲート電流上昇率を従来より 2 桁程度上昇させて数千 A/ $\mu$ s とすると、主電流が瞬時にゲートに転流して高速で遮断動作する現象を発見し、GCT (Gate Commutated Turn-off: ゲート転流型ターンオフ) モードと名付けた。かつ、この動作モードを用いることにより従来の GTO サイリスタでは必要であった電流遮断時の外部保護回路が不要となり、従って電力損失が約 60% 減少することを明らかにした。
- (4) GCT モードの詳細解析を行い、動作遮断時の電流分布がゲートからの距離に依存すること、従って、各セグメントにより遮断状況が変動し、大口径のサイリスタでは GCT モードが不安定動作することを明らかにした。この課題を克服する為に「各セグメントのエミッタ面積がゲートからの距離に反比例する構造」を考案すると共に「少数キャリアライフタイムの空間分布の最適化法」を開発した。以上の結果、GCT モードの安定化に成功し、外部保護回路を必要としない高効率の GCT サイリスタの創出に成功した。

以上要するに本研究は、サイリスタの高耐圧・大容量化について詳細な実験とシミュレーションを行い、新しいデバイス構造を提案すると共に新プロセス技術を導入してサイリスタの更なる高耐圧化及び自己消弧機能を有する高効率の GCT サイリスタの創出に成功したもので、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) 大久保 彰 人 (長崎県)  
 学位記番号 シ情 博甲第 96 号 (理学)  
 学位授与の日付 平成 12 年 3 月 27 日  
 学位論文題名 Learning Theory of Neural Networks for Satellite Data Analysis (衛星データ解析のためのニューラルネットワークの学習理論)

#### 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

人工衛星をプラットフォームとするリモートセンシングは、広域性、反復性、即時性、多チャンネル性などの特徴をもっているため、環境、農業、水産業、水資源などの分野での利用が広がりつつある。衛星データの解析では、観測された電磁波の反射、散乱および放射などのデータをも

とにして、温度や水分量のような物理量を抽出したり、地表面の状態をその目的に応じて分類するといったことをしばしば行う。このような解析では、重回帰分析や最尤法などのような統計的手法がよく用いられる。しかしながら、このような方法では、衛星データ以外の説明変数を必要としたり、母集団が正規分布に従うという仮定を必要とする。したがって、説明変数が揃わなかったり、分布の仮定が成立しない場合は、統計的手法では限界がある。このような事情から、最近では、ニューラルネットワークを用いる方法が提案されている。しかしながら、ほとんどが既存の学習法、たとえば、逆誤差伝播法やコホーネンの自己組織化学習法に基づいている。逆誤差伝播法による分類では、訓練データに対しては分類が保証されるが、未知データに対してどの程度分類可能であるかは分からない。一方、自己組織化学習法では、訓練データは必要としないが、クラスタリングされたデータの解析が難しい。

本論文では、3層ニューラルネットワークに対して認識領域という新しい概念を導入し、この認識領域を広げるような学習法を提案した。認識領域の形状は、訓練データと教師信号の対によって決まる。しかしながら、認識領域の境界は非線型関数を含んでおり、それに含まれるニューラルネットワークの結合荷重やしきい値を、その領域を最大にするように決めることは容易ではない。本論文では、認識領域の隠れ層空間への写像がいくつかの超平面と超立方体で囲まれた形状をもつことと、その写像に含まれるアフィン変換を利用して、認識領域を広げる学習アルゴリズムを構築した。このアルゴリズムによって学習された認識領域は、訓練データが属するカテゴリーごとに異なり、決して共通領域をもたない。このことは、学習されたニューラルネットワークが分類能力をもつことを意味する。しかも、訓練データ以外の未知のデータを分類する場合、それらをそのニューラルネットワークに入力して出力値をみる必要はない。未知のデータがどの認識領域に含まれるかだけをチェックすればそのデータを分類できる。逆誤差伝播法では、未知のデータをニューラルネットワークに入力し出力値を計算しなければ分類が不可能である。

本論文では、このような認識領域にもとづいて二種類の学習法を提案した。ひとつは、隠れユニット追加学習法と、角錐状の認識領域を最大化する方法を組み合わせた学習法である。もうひとつは、一般の形をした認識領域を最大化する学習法である。このような学習法を土壌水分推定と土地被覆分類に応用し、重回帰分析や最尤法よりも良好な結果を得ることができた。

本論文は以下の 7 章より構成される。

第 1 章では、研究の目的、背景、および論文の構成について述べた。

第 2 章では、第 3 章以降で必要となるリモートセンシングの知識について述べた。具体的には、電磁波の性質と人

工衛星からの計測原理, 地球観測衛星の仕様, およびデータの前処理について概観した。

第3章では, 3層ニューラルネットワークに対し, 出力層での2乗誤差を最小化する隠れユニット追加学習法と, 隠れ層における出力に制限を加えて得られた認識領域を最大化する方法を組み合わせた学習法を提案した。

第4章では, 第3章で提案した学習法を用いて, マイクロ波の合成開口レーダによって得られたデータをもとに, 水循環の過程で重要なパラメータである土壌水分の推定を行った。また, 推定結果を, 重回帰分析を用いて得られた推定結果と比較した。

第5章では, 3層ニューラルネットワークに対し, 隠れ層の出力値にいかなる制限も加えることなく, 入力空間における認識領域を最大化する学習法を提案した。

第6章では, 第5章で提案した認識領域最大化学習法を用いて土地被覆分類を行った。また, 得られた分類結果を, 客観的指標のひとつである土地利用データを媒介にして, 最尤法による分類結果を比較した。

第7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

人工衛星をプラットフォームとするリモートセンシングは, 広域性, 反復性, 即時性, 多チャンネル性などの特徴をもっているため, 環境, 農業, 水産業, 水資源などの領域で広く利用されている。これらの領域では, リモートセンシングによって得られた電磁波の反射および散乱の観測データをもとにして, 温度や水分のような物理量を抽出したり, 地表面の状態をその目的に応じて分類することなどが重要な問題である。このような解析を行うために, 重回帰分析や最尤法などの統計的手法がしばしば用いられる。しかしながら, 統計的手法では, 地表面粗度や斜面の傾きなどの衛星データ以外の説明変数を必要としたり, 母集団が正規分布にしたがうという仮定を必要とする。したがって, 説明変数が揃わなかったり, 分布の仮定が成立しない場合は統計的解析では限界がある。このような事情から最近では, ニューラルネットワークによる解析が試みられている。しかし, ニューラルネットワークの学習は, 逆誤差伝播法やコホーネンの自己組織化学習法などの既成の方法にとどまっている。逆誤差伝播法によって学習されたニューラルネットワークでは, 訓練データ以外のデータに対して汎化能力を評価することは難しいし, 自己組織化学習法では, 訓練データは必要としないが, クラスタリングされたデータを解析することは容易ではない。

本論文では, ニューラルネットワークに対して認識領域という新しい概念を導入し, この認識領域を最大にするような二つの学習法を提案している。そして, これらの学習法を土壌水分推定と土地被覆分類に応用している。

最初の学習法は, 隠れユニット追加学習法と, 角錐状の

認識領域を最大化する方法を組み合わせた学習法である。著者はまず, 隠れユニットを追加する毎に出力誤差が小さくなるような, 隠れ層と出力層間の結合荷重の決め方を与えている。また, 訓練データの入力に対する隠れユニットの出力に教師条件を課すことにより, それぞれの訓練データを含む角錐状の領域を入力空間に導入し, その領域に属するすべてのパターンが訓練データと認識されることを示している。さらに, 隠れユニットを追加していくと, その認識領域がどのように変化するかを調べるとともに, その認識領域を最大にするような, 入力層と隠れ層間の結合荷重およびしきい値の決め方を提案している。著者は, この学習法の応用として土壌水分推定を行っている。土壌水分を推定したい地域において合成開口レーダによって取得された観測データをもとに, その地域の土壌水分を推定している。その地域における比較的少数の地点で測定した土壌水分と, それらに対応する観測データの対を訓練データとして用い, ニューラルネットワークの学習を行っている。そして, すべての観測データに対して, それらがどの認識領域に入るかをチェックすることによって土壌水分推定を行っている。また, 重回帰分析を用いて得られた土壌水分推定結果と比較し, 提案する方法がすぐれていることを示している。

もうひとつの学習法は, 境界に非線形関数を含む認識領域を最大にする方法である。著者はまず, 訓練データに対する不等式型の教師条件のもとで, 非線形の境界をもった領域を入力空間に導入し, その領域に属するすべてのパターンが, 訓練データと認識されることを示している。また, 教師条件が異なればこれらの認識領域は互いに共通領域をもたないことを示している。このことは, 訓練データに対する不等式型の教師条件のもとでは, ニューラルネットワークの汎化能力を評価できることを意味している。しかしながら, このような認識領域は非線形関数を含んでおり, それに含まれるニューラルネットワークの結合荷重やしきい値を, 認識領域を最大にするように学習させることは容易ではない。そこで著者は, 認識領域の隠れ層空間への写像がいくつかの超平面と超立方体で囲まれた形状をもつことと, 写像関数が単調増大で, その関数の変数が入力のアフィン変換になっていることに着目し, 認識領域を最大化する学習法を提案している。著者は, この学習法を土地被覆分類に応用している。セマティックマップによって取得された観測データのうち, すでに分類がわかっているデータを訓練データとして用い, ニューラルネットワークを学習させている。そして, 分類が未知の観測データがどの認識領域に属するかを判定することにより, 土地被覆分類を行っている。また, 得られた分類結果を, 客観的指標のひとつである土地利用データを媒介にして, 最尤法による分類結果と比較し, 提案する方法がすぐれていることを示している。

以上のように、本研究は、3層ニューラルネットワークに対して認識領域の概念を導入することによって、ネットワークの汎化能力を評価できることを示し、また、認識領域に基づいた二つの学習法を確立し、さらに、これらの学習法を用いて、膨大な衛星データをもとに、土壌水分推定や土地被覆分類を行ったものであり、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) 中松和巳(和歌山県)  
 学位記番号 シ情博甲第97号(理学)  
 学位授与の日付 平成12年3月27日  
 学位論文題名 Annotated Logic Program and its  
 Application(真理値付き論理プログラム  
 とその応用)

#### 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

知的推論を表すシステムとして種々の推論体系が提案されてきた。近年、複数種類の推論体系や矛盾を同一システムで取り扱うことが必要となってきた。例えば、マルチエージェントシステムでは、エージェント内での矛盾の解消に真理保全システムが適用でき、対立する情報を持つエージェント間の意志決定にはディフィージブル推論が適用できる。しかし、これらの推論体系には、非単調性、すなわち、結論の集合が公理の集合の変化に対し単調に変化するとは限らない性質がある。また、それぞれ異なる意味論をもつので、単純には統合できない。これらの推論体系を同一システムとして実現するためには、複数種類の推論と矛盾の処理が統一的に扱える論理基盤が必要である。

本研究では、真理値付き論理の論理プログラムを提案し、複数種類の推論と矛盾の処理に対する統一的論理基盤となることを示した。真理値付き論理では完備束の要素を注釈として原子論理式に付加する。しかし、多値を持つのは原子論理式だけで、一般の論理式は2値として解釈される。したがって、多値論理的性質を持つにも関わらず、通常の多値論理で困難な論理プログラミングの計算機実装が容易である。

本研究の前半では、従来の真理値付き論理プログラムに強い否定を加えた論理プログラムを導入し、その意味論を与えた。そして、4値の完備束という単純な束を真理値の集合として選び、この強い否定と合わせて、3つの重要な非単調な推論矛盾が真理値付き論理プログラムにより統一的に扱えることを示した。後半では、各成分が非負整数値

を取る2次元ベクトルの完備束に基づくベクトル真理値付き論理プログラムを導入し、対立解消のための意志決定推論ディフィージブル推論が扱え、エージェント間の対立解消に応用できることを示した。

本論文は全9章から成る。第1章では、本研究の目的、背景、研究成果及び、本論文の構成について述べた。第2章では、da Costa, Subrahmanianらによって導入された真理値付き命題論理の基本的性質と定理を述べた。第3章では、節の本体に強い否定を認めた真理値付き論理プログラムの拡張であるが、強い否定を含む通常の論理プログラムと同様に、安定モデル意味論が構成できることを示した。

第4章では、非単調推論の1つ Reiter のデフォルト推論が ALPSN の推論で実現できることを示した。これに基づき、デフォルト理論の2つの例に対してそれぞれのモデルを対応する ALPSN の安定モデルの計算によって具体的に求めた。第5章では、非単調性のみならず矛盾の取り扱いが本質的である Dressler の非単調推論を扱える ATMS (仮設に基づく真理保全システム) から ALPSN への翻訳を与えた。これにより非単調 ATMS の推論が ALPSN の推論で実現できる。第6章では、論理プログラムにおける否定情報の導出規則である失敗を否定と見なす規則に対する真理値付き論理式に基づく意味論を与えた。これは一階述語論理式に基づく失敗を否定と見なす規則の意味論である Clark の完備化を真理値付き論理式に基づくように拡張したものである。この真理値付き完備化の中の原子論理式にはプログラムの成功と失敗を表す真理値がつけられている。真理値付き完備化の利点として2つの異なる論理プログラム間での矛盾、即ち、一方の論理プログラムでの成功と他方での失敗を検知できることを示した。

第7章、第8章では、ディフィージブル推論を扱うために ALPSN の新しい形である強い否定を含むベクトル真理値付き論理プログラム VALPSN を導入し、その応用を示した。VALPSN は各成分が非負整数値をとる2次元ベクトルの完備束に基づいている。ベクトルの第1成分が原子論理式を支持する肯定情報の量、第2成分が否定情報の量を表すと解釈できる。これらの量を単純な整数値化したことによって4値の完備束に基づく ALPSN では扱えないディフィージブル推論のような非単調推論が VALPSN によって扱えることを示した。第7章では、Billington のディフィージブル理論から VALPSN への翻訳を与え、ディフィージブル推論が VALPSN の安定モデル計算によって実行できることを示した。第8章では、これを複数のエイジェントが共通の会議に出席するためのスケジュール調整の際に起きる対立の解消に応用した。また、VALPSN における2次元ベクトルの各成分を非負整数値から閉区間  $[0, 1]$  の要素に変更することによりデフォルトファジィ推論が扱えることを示した。

第9章では、結論と今後の課題を述べた。

## 論文調査の要旨

人間が日常行なっている推論では、観点の違いによって矛盾や対立が起きたり、あるときまで結論として得られていたものが、新たに知識が獲得された結果、推論によって導かれなくなったりすることがある。このような非単調性や矛盾を扱うため、人工知能における様々な推論の体系が提案されてきた。近年、複数種類の推論体系や矛盾を同一システムで取り扱う必要が生じてきた。例えば、マルチエージェントシステムにおいて、真理保全システムをエージェント内の矛盾の解消に適用し、ディフィージブル推論を対立する情報を持つ各エージェント間の意志決定に適用する場合がそうである。しかし、これらの推論体系は異なる意味論を持つため、同一システム内で実現することは困難であった。

本研究では、パラコンシステント論理のひとつである真理値付き論理に基づく論理プログラムを提案し、それが、非単調性と矛盾を扱う種々の推論体系に対し、統一的論理基盤となることを実証したもので、以下の成果を得ている。

まず、矛盾を扱うための真理値付き論理プログラムに、強い否定を導入した真理値付き論理プログラムを提案し、任意のプログラムについて安定クラスというものがあることを証明することにより、意味論としての基盤を与えている。さらに、具体的に安定クラスを求めるアルゴリズムを与えることにより、実現可能であることを示している。

次に、真理値として4値をもつ束に着目し、非単調推論の体系として重要な三つの体系、すなわち、Reiterのデフォルト理論、Dresslerの非単調真理保全システム、プログラムの失敗を否定と見なす規則等についてそれぞれの意味論が真理値付き論理プログラムの意味論により表現できることを示している。具体的には、Reiterのデフォルト理論とDresslerの非単調真理保全システムについては、それぞれ真理値付き論理プログラムへの翻訳を与え、その外延と真理値付き論理プログラムの安定モデルが一対一に対応することを示している。失敗を否定と見なす規則については、プログラムの成功と失敗を真理値と考え、一階述語論理式に基づくClarkの完備化を真理値付き論理式に基づく場合に拡張し、二つの異なる論理プログラム間での矛盾を検知できることを示している。4値の束という非常に単純な真理値にも拘わらず、非単調推論の意味論を明解に記述できたことは、真理値付き論理プログラムの有効性を実証したことになる。

さらに、非負整数を値としてもつ2次元ベクトルを真理値とするベクトル真理値付き論理プログラムを提案し、4値の束に基づく真理値付き論理プログラムでは扱えないディフィージブル推論の翻訳を与え、ベクトル真理値付き論理プログラムにおける安定モデルの計算によりディフィージブル推論が可能であることを示している。この2次元ベ

クトルという考えは、原子論理式を支持する肯定情報の量と否定情報の量という、独自の自然な発想に基づくものであり、複数のエージェントのスケジュール調整で起きる対立の解消という実際的な問題についても、明解な記述を与えている。

以上要するに、本研究は、4値の束および非負整数値2次元ベクトルという具体的な束に基づく真理値付き論理プログラムを提案し、非単調性と矛盾の処理を扱う種々の推論体系に対する統一的論理基盤を与えたもので、情報科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) 有田大作(鹿児島県)  
学位記番号 シ情博甲第98号(工学)  
学位授与の日付 平成12年3月27日  
学位論文題名 画像認識の適応性向上のための自動知識獲得と並列化に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 雨宮真人  
(副査) // // 長谷川隆三  
// // // 谷口倫一郎

## 論文内容の要旨

画像認識の技術は、セキュリティや生産ラインの自動化、医療など様々な応用に利用されようとしているが、必ずしも十分な能力が達成されている訳ではない。画像認識の広範な利用を困難にしている点として、知識構築の難しさと計算量の多さが挙げられる。知識構築の問題は、画像認識のために必要な対象物に関する知識をどのように構築するかであり、従来は、画像認識システムを設計・開発する者が知識を機械化し、直接的にシステムに組み込んでいた。しかし、対象が複雑になるにつれ、知識構築の労力が大きくなり、画像認識の適用範囲拡大を阻む要因となっている。また、計算量の問題は、画像データの情報量の多さと画像認識アルゴリズムの複雑さに起因するもので、現実的な計算時間で処理結果を得るための仕組みが必要であり、並列処理技術の導入が不可欠である。特に、実時間動画像処理のように処理結果を得るまでの時間的制約が厳しいものについて、どのようなシステム構成を採ればよいかは、簡単な問題ではない。そこで本論文では、領域分割の階層性を利用した対象物知識獲得とその並列化、および、PCクラスタを利用した実時間並列画像処理環境を実現する方法について述べ、これらにより上記の画像認識における問題点を解決し、画像処理の適応性を向上させることができることを示している。

本論文は以下の六つの章から構成されている。第1章は序論であり、上で述べた画像認識の問題点と本論文で提案

する解決法の概略について述べている。第2章では、複数の例示画像から画像認識における対象物に関する知識(対象物モデル)を自動的に構築する手法を提案している。獲得される対象物モデルは画像の領域を要素とするものであり、各領域の色、形状、位置、大きさといった領域特徴と、画像を領域分割するときの領域間の類似の程度を変化させることにより得られる画像の階層構造を表す木(分割木)により記述される。対象物モデル構築時は、例示画像とその中の対象物の位置をユーザが与え、それから対象物モデル(データモデル)を構築し、知識として保持している対象物モデル(知識モデル)と領域特徴の整合性と分割木の構造の整合性を基に二つの対象物モデル間の領域の対応を取り、知識モデルを更新する。対象物探索も同様の方法によって実現できる。第3章では、第2章で提案した二つの対象物モデル間の領域の対応をとる処理を並列に行う手法を提案している。この処理は領域特徴の整合性と分割木の構造の整合性を満たす解をもとめる必要があり、もっとも計算時間のかかる部分である。ここでは、対象物モデルの各領域と領域間の親子関係マルチエージェント型並列処理の考えを導入し、共有メモリ型並列計算機上に実現した、分割木のノード(領域)とリンク(領域間の関係)をエージェントとし、それらがメッセージをやりとりしながら並行動作することで、領域の対応を求める。第4章では、実時間画像処理の高速化のための分散型並列計算機システムの構成法について提案している。実時間画像処理は計算量が多く、時間的な制約もあるので並列処理による高速化が望まれている。さらに、複数視点の画像処理を行うためには、複数カメラを接続するために分散型並列計算機を利用することが合理的である。そこで、ここでは複数のパーソナルコンピュータ(PC)を高速ネットワークによって結合した分散型並列計算機(PCクラスタ)を利用し、安価で高性能な実時間画像処理システムを構築している。このようなシステムを構築する場合、高速データ転送機構、同期機構、エラー処理機構が必要になり、これらの機能をソフトウェアで効率的に実現する方法を明らかにしている。第5章では、第4章で提案したPCクラスタ上の実時間画像処理環境を利用するためのプログラミングツールを提案している。PCクラスタ上の実時間画像処理に必要な機能の実現にはシステムの詳細まで熟知しておく必要があり、そのプログラミングは容易ではない。提案したツールを利用することにより、このようなシステムの詳細は隠蔽され、プログラマはPC間のデータフローとPC内のデータ処理タスクのみを記述することにより、実時間画像処理アプリケーションを構築できるようになる。第6章は結論として、本論文で得られた結果と今後の課題について述べている。

## 論文調査の要旨

画像認識の技術は、セキュリティや生産ラインの自動化、

医療など様々な分野で応用されようとしているが、必ずしも十分な性能が達成されている訳ではない。画像認識の広範な利用を困難にしている点として、知識構築の難しさと計算量の多さが挙げられる。知識構築の問題は、画像認識のために必要な対象物に関する知識をどのように構築するかが問題となるが、従来は、画像認識システムを設計・開発する者が知識を機械化し、直接的にシステムに組み込んでいた。しかし、対象が複雑になるにつれ、知識構築の労力が大きくなり、画像認識の適用範囲拡大を阻む要因となっている。また、計算量の問題は、画像データの情報量の多さと画像認識アルゴリズムの複雑さに起因するもので、現実的な計算時間で処理結果を得るための仕組みが必要であり、並列処理技術の導入が不可欠である。特に、実時間動画像処理のように処理結果を得るまでの時間的制約が厳しいものについて、どのようなシステム構成を採ればよいかは、簡単な問題ではない。以上の背景から、本論文は、領域分割の階層性を利用した対象物知識獲得とその並列化、および、分散メモリ型並列計算機を利用した実時間並列画像処理環境を実現する方法について提案したもので、以下の点で評価できる。

第一は、複数の例示画像から画像認識における対象物に関する知識(対象物モデル)を自動的に構築する手法を提案している点である。獲得される対象物モデルは画像の領域を要素とするものであり、各領域の色、形状、位置、大きさといった領域特徴と、領域の階層構造を表す木(分割木)により記述される。本手法は、領域分割における領域間の類似の程度を事前に指定する必要がないので、対象物モデル構築が安定して行えるという特徴を有している。また、最も計算時間のかかる部分である分割木のマッチングに関して、マルチエージェント型並列処理による高速化手法についても提案している。

第二は、実時間画像処理の高速化のための分散メモリ型並列計算機システムの構成法について提案している点である。実時間画像処理は計算量が多く、時間的な制約もあるので並列処理による高速化が望まれている。特に、近年よく利用されるようになってきた複数視点の画像処理を行うためには、複数カメラを接続するために分散メモリ型並列計算機を利用することが合理的である。そこで、本研究では複数のパーソナルコンピュータ(PC)を高速ネットワークによって結合した分散メモリ型並列計算機(PCクラスタ)を利用し、安価で高性能な実時間画像処理システムを開発している。特にこのようなシステムを構築する場合に重要である、高速データ転送機構、同期機構、エラー処理機構について、これらの機能をソフトウェアで効率的に実現している。

第三は、上述したPCクラスタ上の実時間画像処理環境を利用するためのプログラミングツールを提案している点である。PCクラスタ上の実時間画像処理に必要な機能の

実現にはシステムの詳細まで熟知しておく必要があり、そのプログラミングは容易ではない。提案したツールを利用することにより、このようなシステムの詳細が隠蔽されるため、プログラマはPC間のデータフローとPC内のデータ処理タスクのみを記述すれば良く、システム開発者以外でも実時間画像処理アプリケーションを容易に構築できるようになる。

以上要するに本研究は、画像認識において従来はシステム開発者が明示的に組み込まなくてはならなかった画像認識のための知識を例示画像から自動的に獲得する手法を提案すると共に、画像処理を高速化するための並列化手法、特に、分散メモリ型並列計算機で実時間画像処理を効率的に実現する手法を提案し、それらの有効性を明らかにしたものであり、知能システム学上価値ある業績である。よって、本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。



氏名(本籍) 王 波 涛 (中国)  
 学位記番号 シ情 博甲第99号 (情報科学)  
 学位授与の日付 平成12年3月27日  
 学位論文題名 The Study on Design, Implementation and Performance of a Distributed Parallel Spatial Database Sequoia 2000 on an Object Database System *ShusseUo* (オブジェクトデータベースシステム「出世魚」における分散並列空間データベース Sequoia2000 の設計, 実装及び性能についての研究)

#### 論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 牧之内 顕 文  
 (副査) " " 雨 宮 真 人  
 " " " 松 尾 文 碩

### 論文内容の要旨

データベースシステムの科学・工学分野への応用の中でも、最近、地球科学への応用が注目を集めている。地球科学分野への応用では、地理データの検索が必要になるが、そのためのデータ表現や検索手続きが複雑になり関係データベースでは扱う事ができない。さらには、地理データと衛星画像データとをともに格納・検索対象とするため、データの量が巨大になり、新しい効率的検索手法が必要とされる。SEQUOIA2000はそのような地球科学のためのデータベースとして地球科学者たちの必要性を考慮して考案されたデータベースシステム性能評価ベンチマークデータベースである。一般に、地理データベースは、そのサイズが巨大となることと検索処理が複雑であることから効率的探索には並列分散処理が必要であるとされる。一方、データベースの適用範囲が従来の事務処理から科学・工学の応用

分野へ広がるにつれて関係データモデルの限界が指摘されはじめて久しい。その限界を広げるべく提案されたデータモデルがオブジェクトデータモデルである。

本研究では、SEQUOIA2000ベンチマークおよびその拡張版である拡張 SEQUOIA2000ベンチマークを地理データベースの典型例として取り上げ、そのデータベースの設計、実装および性能評価を行った。特に、インデックスを使うフィルタリングアルゴリズムとその並列処理手法、データベースの分散化とそれに基づく並列検索手法に焦点を当て、新しい手法を提案するとともに実装・評価によりその有効性を確認した。なお、実装と性能評価には、筆者がその一員として研究開発に加わった分散並列オブジェクトデータベースシステム「出世魚」を利用している。

本論文は5章からなる。第1章は序論であり、研究の背景と目的について述べている。

第2章は、SEQUOIA2000ベンチマークデータベースのオブジェクト指向設計とその性能評価について述べている。「出世魚」の特徴の一つはファイル管理の方法であり、その性能を評価する目的で単一計算機上での検索性能を評価・分析している。また、地理データベースの検索では、インデックスを使って解候補集合を検索するフィルタリングと解候補集合の内から真に条件に合った解を見いだすリファインメントとの2段階に分かれる。本章では、オブジェクトモデルに基づくデータベース設計法により、複雑なデータタイプをどのように表現するかについて述べている。また、システムの柔軟性を保持しながらI/O操作を減らす技術と、フィルタリング時に解候補集合を出来るだけ小さくして性能を向上させる技術についても述べている。さらに、ファイル管理によるクラスタリング策略の性能に対する影響も評価・分析している。

第3章は、フィルタリングを分散並列処理して検索性能を向上させるためのR-treeインデックスの並列検索法について論じている。R-treeは空間問い合わせを効率的に評価実行するための手助けとなる空間インデックスとして開発された。この研究では、従来のマルチプロセッサあるいはマルチディスクを有する1つのワークステーションの上でのR-treeの並列探索アルゴリズムと違って、負荷分散を考慮したR-treeの並列探索アルゴリズムを提案している。本アルゴリズムを「出世魚」の分散共有仮想メモリ機能を使って実装している。本アルゴリズムの性能評価のために、SEQUOIA2000ベンチマークを使ったテストを行い、その性能測定を行い、期待した結果を得ている。

第4章では、拡張 SEQUOIAベンチマークデータベース分散並列検索のスケーラビリティと速度向上率の評価について述べている。拡張 SEQUOIA2000ベンチマークは元のベンチマークデータベースを拡張して、より大規模にしたデータベースであり、今後の地球科学分野でありうるデータベースの規模を実現している。データベースサイズが

超大規模であるため、データベースを分散配置し、分散されたデータベースからの問い合わせを並列処理する。それにより検索効率を向上させるが、一般には必ずしも台数効果（並列処理に参加する計算機の台数が増えれば効率が向上する）が実現されるとは限らない。そのため、検索処理の並列化には種々の工夫がある。本研究ではラウンドロビン法による動的および静的データ分散法を採用した2種類の分散データベース設計を行った。それら2つのデータベースに対して、それぞれ12台までのワークステーションを使って、検索を実施し、分散並列処理の効果を実証した。

第5章は、本論文のまとめを行い、今後の課題について述べている。

## 論文調査の要旨

地理データベースは検索処理が複雑で計算量が大きいことやそのサイズが巨大となることから、効率的探索には並列分散処理が必要であるとされる。一方、データベースの適用範囲が従来の事務処理から科学技術応用分野へと広がるにつれて、関係データモデルの限界が指摘されて久しい。特に、地理データベースは、関係データベースでは構築できないものの一つとして早くから指摘されてきた。関係データベースの限界を広げるべく提案されたデータベースがオブジェクトデータベースである。

本論文は、地理データベースのベンチマークとして提案されている SEQUOIA2000 ベンチマークおよびその拡張版である拡張 SEQUOIA2000 ベンチマークを地理データベースの典型例として取り上げ、分散並列オブジェクトデータベースシステム「出世魚」を利用して、オブジェクトデータベースのための地理データベース設計法、インデックスを使って検索候補を求める並列フィルタリングアルゴリズム及びデータベースの分散化とそれに基づく並列検索法に焦点を当て、新しい手法を提案するとともに実装・評価によりその有効性を確認したもので、以下の点で評価出来る。

第1に、SEQUOIA2000 ベンチマークデータベースを使ったデータベースシステムをオブジェクト指向方法論を基に設計・実装し、その性能を評価したことである。まず、オブジェクトデータベースの標準化機構である ODMG (Object Data Management Group) が提案したオブジェクトモデルに基づいてデータベース論理設計を行っている。その設計に基づき、オブジェクトデータベースシステム「出世魚」上に実装している。実装したデータベースを用いて、各種の実験を行っている。まず、「出世魚」の特徴の一つであるメモリマップドファイルの性能を評価するため、単一計算機上での検索性能を測定し、結果を評価分析している。また、フィルタリング段階で候補集合を出来るだけ小さくして検索の全体的性能を向上させる一つの手法を提案し、実際にそれが有効であることを実証している。最後に、各

種のデータクラスタリング戦略が検索性能に与える影響を分析・評価している。

第2に、フィルタリングを分散並列処理して検索性能を向上させるためのインデックスとして R\*-tree を採用し、その分散並列探索法に関して新しい手法を提案するとともに、実装・評価してその効果を実証していることである。従来提案されている R\*-tree の並列探索アルゴリズムと違って、負荷分散を考慮した並列探索アルゴリズムを提案している。本アルゴリズムを「出世魚」の分散共有仮想メモリ機能を使って実装し、SEQUOIA2000 ベンチマークを使った実験を行い、有効性を確かめている。

第3に、拡張 SEQUOIA データベースを使った巨大地理データベースの分散並列検索を実装・実験し、データ分散に関して各種手法を工夫することにより分散並列検索が有効に働くことを実証したことである。拡張 SEQUOIA2000 データベースは元のベンチマークデータベースを拡張して、より大規模にしたデータベースである。データベースが超大規模であるため、データベースを分散配置し、分散されたデータベースからの問い合わせを並列処理する。並列処理に参加する各サイトの負荷を平準化するために、ラウンドロビン法によるデータ分散法を採用している。さらに、分散法に関して、予め分散しておく静的分散法と必要に応じて分散する動的分散法とを比較するため2種類の分散データベース設計を行うとともに、それら2つのデータベースに対して、それぞれ12台までのワークステーションを使った実験を行い、静的分散法及び動的分散法ともに並列処理の効果を確認している。

以上を要約すると、本論文は複雑で大規模である地理データベースの効率的検索法に関して、オブジェクト指向に基づくデータベース設計、インデックスの分散並列探索法、およびデータベースの分散化とそれに基づく並列検索法に焦点を当て、新しい手法を提案するとともに実装・評価によりその有効性を確認したもので、データ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)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 高橋 伸 弥 (大分県)  
 学位記番号 シ情 博甲第100号(工学)  
 学位授与の日付 平成12年3月27日  
 学位論文題名 雑音画像中の軌跡群を検出する構文解析型アルゴリズムに関する研究

### 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

画像からの軌跡の検出は、パターン認識/理解のための基本的かつ重要な問題の一つであり、医用画像処理や図面の自動認識など多くの分野で軌跡の自動検出の高度化が要求されている。軌跡を自動検出する方法としては濃度値の最大点を連ねるとというのが最も簡単な方法であるが、重畳雑音のレベルが高くなると検出性能が急速に低下する。そこで検出対象の軌跡の構造に関する事前知識を組み込んだモデルを用意し、モデルに最大一致する軌跡を検出しようとする方法がとられる。例えば、軌跡の連続性や平滑性を利用した軌跡検出法や、対象軌跡の構造を形式文法で記述し、その構文解析手法を応用して軌跡を検出する方法が検討されている。

これらの軌跡検出法の拡張の一方として、複数軌跡すなわち軌跡群の検出問題がある。これに対して従来試みられた方法は単独の軌跡検出処理の単純な繰り返しであり、利用する事前知識も連続性や平滑性といった個々の軌跡の性質に留まっている。また、処理が個々の軌跡ごとに行われるため、局所的な最適解を求めることになり、大局的な最適解とはいえない軌跡を検出する場合があると予測される。

本研究はこのような問題意識に立ったもので、個々の軌跡に関する事前知識に加えて軌跡間に存在する相互的知識の利用を可能とし、かつ局所解を避けるために軌跡群全体としての最適解を得る枠組みの実現とその有効性を検討したものである。基本的な考え方は、個々の軌跡の振舞いと軌跡相互間の関係に関するモデルを形式文法で与え、モデルが生成する軌跡群と入力多値画像との間で最大一致をとる形で解析するというものである。解析の結果、最適解としての軌跡群と、それらの各部に対する解釈(ラベル付け)及び一致の度合の評価値とを得る。

本論文は、以上の方針に基づき、軌跡間の相互情報を用いて軌跡群を検出する構文解析方アルゴリズムを検討したものであり、以下の6章より構成される。

第1章では、本研究の背景と位置付け、その概要について述べた。

第2章では、以下の章への準備として、本論文で対象とする軌跡群の定義と、そのモデル化について述べ、いくつかの例を示した。軌跡群を形式文法でモデル化するために、個々の軌跡の局所的な性質と軌跡相互間の関係との組合せとして終端記号を定義し、軌跡群の全体的な構造を書換え規則によりモデル化する方法を示した。

第3章では、正規文法で記述される軌跡群を検出するためのアルゴリズムを提案した。このアルゴリズムでは、各軌跡の振舞いと軌跡間の相互関係とに関する記述を正規文法と等価な有限状態オートマトンで与え、動的計画法を用いてモデルに最もよく一致する軌跡群を検出する。この動的

計画の処理過程にビームサーチを導入して計算量の低減をはかった。テスト画像を対象とした軌跡検出実験を行い、軌跡検出精度と計算量低減効果とを検討した。軌跡間の相互関係を考慮したモデルを用いて軌跡を追跡することにより、雑音に対してロバストな解析が可能になることを示し、アルゴリズムの有効性を確認した。またビームサーチによる計算量の低減効果を実験的に検討し、約1~2桁の計算量低減効果を示した。

第4章では、第3章の軌跡群検出アルゴリズムを、未知の遅延が軌跡間に存在している場合に拡張した。このアルゴリズムでは、遅延のない状態での個々の軌跡の振舞いと軌跡間の相互関係とに関するモデルを用意し、遅延量を最適化パラメータに含めた探索問題を動的計画法を用いて計算することにより、モデルに最もよく一致する軌跡群を検出する。テスト画像を対象とした軌跡検出実験を行い、遅延を伴う軌跡群の検出が可能であることを確認した。またビームサーチによる計算量の低減効果を実験的に検討し、約1~2桁の計算量低減効果を示した。

第5章では、文脈自由文法で記述される、より複雑な軌跡群の検出法を検討した。CYK法に基づく検出アルゴリズムを提案し、ビームサーチを導入して計算量の低減を検討した。テスト画像を対象として、第3章の正規文法モデルを用いたアルゴリズムとの比較実験を行い、検出精度に関する相対的優位性を示した。またビームサーチによる計算量の低減効果を実験的に検討し、約2~3桁の計算量低減効果を示した。

最後に第6章で、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

時間軸と空間軸の張る平面上に、雑音をともなった画像として観測される軌跡の検出問題の拡張として、複数の軌跡、すなわち軌跡群を検出する問題を扱っている。従来から、雑音に対する耐性を高め、検出精度を向上する目的で、検出対象となる軌跡に関する事前知識を組み込んだモデルを用意しておき、モデルに最もよく当てはまる軌跡を検出するという構造解析型のアルゴリズムが試みられている。この方法を軌跡群の検出に適用する場合、個々の軌跡をそれぞれのモデルに従って独立に解析して検出するという方法が採られていた。このため、軌跡間に存在する特徴を事前知識として用いることが出来ず、また解析処理は軌跡ごとの最適当てはめに留まり、軌跡群としての大局的な最適検出とはなっていなかった。

本論文は従来法のこれら問題点に対して軌跡相互間の特徴を扱えるモデルと、動的計画法に基づいて軌跡群を並列的に解析するアルゴリズムを提案し、実験的に有効性を示したものである。

著者はまず、従来の軌跡群検出の研究を調査して、そこ

で用いられている検出法が(1)軌跡相互間の特徴に意味が認められる場合においても、これを利用する枠組みとなっていないこと、(2)個々の軌跡を独立に検出するという個別軌跡検出操作の単純な繰り返しで、軌跡群としての最適検出法となっていないことを指摘して、これらの問題の解決を研究の目的とするとの立場を明らかにしている。

これを受けて、まず正規文法でモデル化を行う枠組みでの検討を行っている。軌跡相互間の特徴に関する知識の利用法を検討し、個々の軌跡に関する知識とあわせて軌跡群のモデルを記述する枠組みを提示している。さらに解析法として、モデルに合致し、かつ線上各点の濃度値和が最大になる軌跡群を並列的に探索するという新規な動的計画アルゴリズムを提案し、実験によりその有効性をしめしている。また、アルゴリズムの高速化に関して検討し、動的計画法の計算過程にビームサーチを組み込むことにより1桁以上の高速化を達成している。

次いで、軌跡間に未知の位相差が存在する軌跡群の検出問題への拡張・適用を検討している。この問題に対して零位相形でモデルを記述し、軌跡間の位相差を最適化パラメータに加えた動的計画問題を計算するという解決法を示し、実験によりアルゴリズムの妥当性を実証している。

最後に、正規文法によるモデル記述の限界を指摘し、文脈自由文法モデルへの拡張を検討し、動的計画法に基づくCYK型の解析アルゴリズムを提示している。正弦波軌跡群を例に取り、正弦波の縦軸対称性を文脈自由文法で記述してモデルに取り込み、厳密性を向上することにより、正規文法近似に比して大幅な検出精度向上が達成されることを実験的に示し、モデル高度化の効果を明らかにしている。

以上要するに、本論文は軌跡群検出問題に対して、軌跡間特徴の利用、軌跡間での並列的解析という新たな方向に沿って解析アルゴリズムを提案し、有効性を示したもので、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) 田中完爾(福岡県)  
学位記番号 シ情博甲第101号(工学)  
学位授与の日付 平成12年3月27日  
学位論文題名 移動ロボットの観測による環境地図の更新作業に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 長谷川 勉  
(副査) " " 山下 雅史  
" " " 平澤 宏太郎

## 論文内容の要旨

オフィスや病院を始めとする非整備環境では、清掃、保守、運搬といった作業の担い手として、移動機能を有する

自律ロボットが求められている。この要求に応えるには、新たに二つの機能が必要となる。一つは、物体配置の変化に適応し行動する機能、もう一つは、地図を更新する機能、すなわち環境内を探索して、変化を検出し、環境知識を最新に保つ機能である。とりわけ後者の機能は、計画に基づいて作業を確実に遂行するために不可欠である。

従来、地図更新作業を行うときに、更新前の地図を利用する方法が確立されていなかった。更新前地図を用いなければ、地図を最初から作成する場合と同等の労力・時間を要してしまう。他方、更新前地図は環境変化によって誤りを含むものとなっているので、そのまま用いるとエラーを引き起こしてしまう。例えば、更新前地図に記された物体群を計測の基準として用いれば、それだけ多くの物体位置を正確に計ることができると考えられる。しかし、位置が変化した物体を一度でも用いると、それ以降に観測した物体の位置を誤って認識してしまう。また、例えば、領域を広く見渡せる観測地点を計画するために、更新前地図を利用することも考えられる。しかし、予期せぬ環境変化に遭遇し、移動を妨げられたりして、かえって作業効率が低下するおそれがある。

本論文は、地図更新作業を実現することを目的とし、地図をもとに環境を推定しながら地図に含まれる誤りに注意する方法について検討した。地図を利用する2種類の状況、1) 物体位置の推定、2) 観測計画について、環境情報とその不確かさの性質を明確にし、評価に用いることにより、計画の質と所要時間の両方について改善がなされた。本論文はこれらの成果をとりまとめたもので、6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、移動ロボットに関する基礎的な説明を行い、地図更新作業に関する問題について説明した。そして、これらの問題を扱った従来の研究を概観し、未解決の問題を示した。

第3章では、地図更新作業における問題設定、本研究におけるアプローチについて述べた。まず、対象とする作業環境と環境変化の性質を明確にし、ロボットシステムと作業の目的について述べた。次に、本研究で取り上げる環境変化検出法、観測計画手法のシステム内での位置付けを示した。最後に、以上の条件をもとに、地図が備えるべき性質を導き出し、本論文で対象とする地図形式を示した。

第4章では、局所的な環境情報を完全にするために、センサデータをもとに環境変化を検出する方法を提案した。地図とセンサデータは、物体群を異なる座標系で表している。幾つかの変化でない物体が求めれば、それらを基準として両座標系を正確に重ね合せ、対応がとれない物体を変化として検出できる。本論文では、変化でない物体群を選び出す方法を提案した。まず、地図とセンサデータを対応

づけ、変化でない物体群の候補を生成する手法を示した。次に、各候補に含まれる不確かさの性質を明確にし、環境変化が生じている状況を系統的に整理した。そして、変化物体の位置・形状が一様な分布に従うことを利用して、環境変化が生じている確率を推定する方法を示した。この確率を基準として各候補を評価し、変化を誤検出する可能性が最も低い物体群を選出する方法を提案した。

第5章では、観測地点を計画する手法を提案した。環境変化は、生じた位置によって、作業に及ぼす影響が異なる。この影響が最大となるいくつかの位置範囲 critical region に、環境変化が生じているかどうかによって、環境を場合分けすれば、考慮すべき必要不可欠の環境群を網羅できる。このとき、critical region を境目にして作業領域を分割し、各部分領域を探索する問題を個別に解く方式を提案した。考慮すべき全ての環境は、いくつかの部分領域の組み合わせにより表すことができ、各環境について繰り返して探索問題の解を求める処理を、省くことができる。まず、動的計画法による従来の行動計画手法を修正し、観測地点を決定する原理を示した。そして、実時間処理のために問題を簡略化した。次に、critical region が満たすべき条件と、critical region の求め方を示した。また、経路グラフとよぶ補助的なデータを用いて、考慮すべき環境群を高速に計算機内に生成する手法を提案した。

第6章は、結論であり、本研究で得られた結果を総括するとともに、今後の課題について述べた。

## 論文調査の要旨

移動ロボットが環境に適応した合目的行動を行うためには、環境に関する知識を地図の形で持つ必要がある。ロボットはセンサで得られる周囲の空間構造情報と地図とを照合して自己位置を同定し、与えられた目標までの経路を地図に基づいて計画する。一方、人間活動や他のロボットの作業行動により環境は常に変化する。この変化を随時検出し地図を訂正しておかなければロボットは正しい行動をとれない。

ロボットが環境内を探索し地図を自動的に作成する研究は従来より数多くなされてきたが、環境が広い場合には時間がかかる。部分的な環境変化があっても地図には有効な情報も多く残されており、これを手がかりにして短時間で地図の更新ができるようになればロボットシステムの環境適応性が改善され作業効率は向上する。しかし、ロボットに搭載されたセンサが誤差を含むこと、その計測範囲がロボット近傍に限定されること、物体の背後に隠されている物体を測定できないこと、計測の基準となるロボット位置にも移動に伴う誤差があることなどの問題から、地図更新手法の研究はほとんどなされていなかった。本研究は、ロボットによる地図更新作業という新しい問題設定を行い、対象作業環境と環境変化の性質を明確にしたうえで、その

解決に必要な手法を考案したもので以下の点で評価できる。

第一は、環境中の物体配置及びその変化に関する事前知識を利用して、地図更新作業を効率化させる手法を提案したことである。従来の研究は、センサ性能の向上や局所的な観測計画の最適化による高精度の観測に頼るものが多かった。これに対し、センサ雑音および環境変化によって生じる観測データの曖昧さを前提として、既にある地図に含まれる物体配置情報やセンサ雑音の統計モデルを利用した新しい地図更新法を開発している。

第二は、与えられた地図とセンサデータをもとに環境変化を検出する手法を提案したことである。地図とセンサデータとを対応づけて環境中で変化していない物体群の候補を生成したうえで、個々の物体の変化確率を基に、変化を誤検出する可能性が最も低い物体群を選出する。地図中の観測範囲からこれらを除いたものを変化として検出している。地図データを有効に利用したこのような段階的環境変化検出によって、ロボットの自己位置推定の精度を改善し、観測データの誤解釈を減少させることに成功している。

第三は、地図の更新作業を効率よく実施するための観測地点の計画手法を提案したことである。ロボットの移動と観測とはコストがかかることから、検出される環境変化を計量評価したうえで、観測と移動の一連の繰り返しの系列について評価を最大化するものを選ぶことにより観測地点を計画している。さらに、環境変化はその生じた位置によりロボットの行動に及ぼす影響が大きく異なることに着目して、生じうる環境変化を少数の典型的な場合に分類したうえで、そのそれぞれについて観測経路の計画をしておけばよいことを明らかにしている。個別の環境変化の差異の全てについての詳細な計画計算は省略できるため、地図更新作業の効率化が可能となっている。

以上要するに本研究は、移動ロボットの合目的行動を可能にする環境地図について、実世界の種々の不確定誤差のもとで、環境変化を検出する手法とその効率的な実行を可能にする環境観測地点の計画を行う手法を考案し、地図更新作業の有効性を示したもので、ロボット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) 堀之口 浩 征(鹿児島県)  
 学位記番号 シ情 博甲第102号(情報科学)  
 学位授与の日付 平成12年3月27日  
 学位論文題名 空間インデックスの効率化についての研究

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  
 " " " 日 高 達

## 論文内容の要旨

データベースに格納したオブジェクトの空間的な属性（例えば、位置や広がり等の情報）に基づく索引構造を空間インデックスと呼ぶ。今日、電子地図等の地理情報を扱うデータベースの応用として、高度道路交通システム（ITS: Intelligent Transport Systems）における地理情報の利用や、携帯情報端末による発信者の位置特定、鯨等の無線による追跡等が挙げられる。空間インデックスはこれらの環境下において、データベース内におけるデータの位置を特定する役割を持つ。

空間データベースに対するユーザの要求は、空間領域を伴う質問（空間質問）として与えられる。例えば、ある車の運転者が現在地に最も近いガソリンスタンドの位置を知りたいとする。この要求を処理するために、空間データベースに対して、利用者の関心のあると思われる空間領域（例えば、ユーザの現在地から半径5 kmの円）内にあるデータを抽出させる空間質問が与えられる。空間質問は質問領域とそれに付随する質問条件の2つの要素を持つ。上の例における質問領域は「半径5 kmの円」であり、質問条件は「質問領域に内包されるガソリンスタンド」となる。

空間インデックスは空間質問の質問領域を入力とし、解の可能性を持つデータ集合を出力する。空間質問を効率良く処理するために、全データの空間的な見取り図となる構造を空間インデックスは持つ。これを実現する基本的なデータ構造としては多分木（一つのノードが複数の子を持つ木）が多く用いられてきた。多分木は互いの距離が短い空間データの集合をまとめて管理するのに適しているからである。位置的に近い空間データをまとめて管理する事は、空間質問の処理に必要なI/O数を減らすために重要である。

空間質問は連続する2つの段階（フィルタリングとリファインメント）を経て処理される。このフィルタリングとリファインメントはパイプの様につながれ、この順に動作する。一段目にあたるフィルタリングは、各オブジェクトの空間的な位置決めを高速に行なう。空間インデックスはこのフィルタリングにおいて用いられる構造である。その処理は、予め構築しておいた多分木の探索である。多分木では、オブジェクトの具体的な領域表現の代わりに、オブジェクト領域の近似領域（二次元空間においては、対象領域を内包する長方形）を用いる。近似領域の利用により、オブジェクトの空間内におけるおおよその位置を少ないデータ量で表現出来る。フィルタリングの処理は木の探索とそれに伴う近似領域の交差比較のみなのであり、高速である。しかしながら、近似領域を用いるために、その出力には解以外をも含まれる解の候補集合となる。

解の候補集合から空間質問の条件を満たさないデータを除く段階がリファインメントである。リファインメントは

近似領域の代わりに、データベース中の空間データを用いる。そのため、空間データ取得に関わる大量のI/Oのコストがかかる。一方で、空間質問を正確に処理出来る。リファインメントは空間質問の処理に必要な時間的コストの大部分を占める。

本研究では、まず多次元の空間インデックスを実装した。その上で、時間や角度等の異なる単位系や量を表わす属性に応用する方法について研究した。ついで、この空間インデックス構築から得られた経験を元に、空間インデックスの構造に対する改良方法を提案している。

また、空間データベースに対する検索効率を向上させるために、空間インデックスの構成についても研究した。オブジェクト領域の形状表現を構造化し、これに適応したフィルタリングやリファインメントの方法を提案している。本論文は空間インデックスの処理効率改善を提案したものであり、4章からなる。

第1章は序論であり、以後の章のための準備をおこなう。まず、フィルタリングとリファインメントの各々の役割について述べる。次に、空間インデックスの基本的な構成と動作、またその応用について説明する。

第2章では、時間や角度等の異なる単位系に属する量を空間インデックスで扱う方法について述べる。空間インデックスは、元来地理情報の様な単一の単位系に属するデータを対象していた。多次元に対する空間インデックスの単純な応用では、異なる単位系に属するデータをうまく扱えない場合が存在する。本研究では、まず高次元領域を扱えるフィルタリング構造を実装した。

異なる単位系に属する値であっても、その数値のみを扱う限りは空間インデックスをそのまま利用出来る。しかしながら、空間インデックスは異なる属性間で関連の強さ（データ空間内の位置的な遠近）を機械的に、つまり数値上の大小で判断している。角度や温度等の属性間の性質の違いを抜きに、数値のみを取り出し、評価したとしても、それは本当にデータ間の関連の強さを反映していると言えるだろうか。

空間インデックスはデータ間の位置的な関連の強さを遠近で表現していると言える。全ての属性が同じ地理的な単位系で統一されていた間は、この仮定が成り立っていた。しかしながら、異なる属性を一つのインデックスで管理しようとする時にはこの仮定は成り立たない。本研究では、空間インデックスに位置的な関連の強さに加え、意味的な関連の強さを表現する正規化を導入する。正規化を施された値は属性固有の情報を持たないため、データ間の関連の強さのみを純粹に比較する事が可能となる。

本研究では、正規化の有効性を確かめるために、異なる属性を表現するデータを用いた計算機実験を行なった。実験の結果、異なる属性を統一的に、しかも、一元的に扱う事で、空間インデックスの処理効率を向上させる事を確認出

来た。

第3章では、空間質問の処理効率を上げるために、空間インデックスの構成を変更する。空間質問の処理には、フィルタリングとリファインメントの各々の効率も重要であるが、両者間のバランスも重要であると考えた。そこで本研究では、位置や領域等の空間情報に加えて、オブジェクトの持つ形状についても構造的に表現する。

フィルタリングはオブジェクト領域の近似領域を用いて、解の候補集合を作る。フィルタリングは木の探索とそれに伴う近似領域間の交差判定を行なう。一方で、リファインメントではデータベースからオブジェクトの形状データを得た上で、幾何計算を行なう。解集合を得るためにはリファインメントのコストは回避出来ない。しかしながら、フィルタリングの出力する解候補の数を少なく出来るならば、リファインメントの処理量も少なく出来る。そこで、本研究では、オブジェクト領域の形状に関する情報についてもフィルタリングで利用する事を提案する。また、そのために必要となる、オブジェクト領域の近似的表現手法についても検討した。

本研究では、オブジェクト領域を近似的に表現するために、領域を細かい断片に分割した上で、多分木を用いて管理する方法を提案している。この断片の管理構造は個々のオブジェクトに対して提供される。オブジェクトの形状を木により表現する事で、領域の交差判定処理の一部を木の探索により置換する事が実現出来た。

本研究では、単にオブジェクト領域を断片に分割するだけでなく、断片の近似形状に関する交差判定処理についても提案する。近似形状同士が持つ交差の型（交差型）の一部には、その内部の形状に非依存に交差を判定可能にするものが存在する事が分かった。この断片のレベルにおける近似領域の交差判定は矩形質問を処理するのに特に有効であると考えられる。交差型による判定は、質問領域の大きさと関係が深く、オブジェクト領域の断片に適用した場合により有効に働くと考えられる。本研究では、オブジェクト形状の構造化した表現方法と近似領域の交差型による判定法の導入の効果を、現実の地理データを用いて実験している。

最後に第4章では、本論文のまとめとして、研究の成果、および残された今後の課題について述べる。

## 論文調査の要旨

米国のシャトル宇宙船エンデバーによる地球の3次元地図作製が最近話題となったように、地球規模の地理情報の収集とそのデータベース化が国内外で重要な研究開発課題となってきた。地理空間中に存在する対象物の空間位置や形状は空間属性と呼ばれる。そのような空間属性を持つデータ（空間データ）からなるデータベースで、空間属性を検索条件としてデータの検索を行うデータベースを空間デ

ータベースと呼ぶ。空間データベースの研究は、主に2次元地図情報を対象に研究されてきた。現在は、立体物を対象とする3次元空間情報や、さらに2次元あるいは3次元空間に存在する物が時間とともにその位置や形を変化させる時に生じる時空間情報を対象とした、より高次元の空間データベースへと研究の焦点が移っている。空間データベースでは、空間属性を質問条件（空間条件）として与える（空間質問）。与えられた空間条件を満たすデータの集合は一般に2段階に分けて探索される。まず、空間インデックスと呼ばれる索引を利用して、解となり得るデータ（解候補）の集合を探す。この操作をフィルタリングと呼ぶ。ついで、この解候補集合の中から、与えられた条件を真に満足するデータを選ぶ。これをリファインメントと呼ぶ。本論文は、空間インデックスを利用したフィルタリングの効率的処理法に関していくつかの新しい手法を示し、それらの手法の有効性を実証したもので、以下の点で評価できる。

第1は、2次元あるいは3次元の地理データを対象として考案された空間インデックスの代表例であるR\*-treeを時空間データベースにも適用できるように拡張したことである。まず、1次元から任意の高次元までに対応できる多次元R\*-treeを実装した。ついで、R\*-treeで使われるクラスタリング手法を拡張した。R\*-treeでは基本的に、「より近い位置にあるデータは木中の互いに近いノードから参照される」といった地理的概念を用いるクラスタリング手法がとられている。しかし、地理的空間軸と、それとは異なる時間軸とで構成される多次元空間では、距離や面積といった物理的性質によるクラスタリングが必ずしもうまく働くととは限らない。そこで、地理軸と時間軸といった空間の軸属性が異なる場合にも空間データのクラスタリングがうまく行われるように正規化の概念を提案している。また、この概念をR\*-treeに実装し、場合に応じて正規化を使えるようにした。そして、実験により、この正規化手法が、それを使わない従来のクラスタリング手法よりも良い結果を示すことを実証し、その有効性を示している。

第2に、空間インデックスで利用する近似形状に注目し、新しい形状近似手法を提案したことである。従来の方法では、空間データをその外接矩形（2次元では長方形、3次元では直方体）により近似し、インデックスを作る。しかし、このような大雑把な近似では、空間データの形状によっては解候補が多くなる。一般に、空間データベースの検索処理では、リファインメント処理にコストの大部分が掛かることが知られている。従って、候補の数を出来るだけ少なくすることが空間データベース検索における処理効率化の要である。著者は、空間質問で最もよく使用される矩形交差質問（空間条件としての矩形を与え、それと交差する空間データを検索する質問）に注目し、その場合に有効な新しい空間データの形状近似手法を提案している。まず、データベースに格納されている空間データの形状を1つの

大きな凸多角形とその回りの小さな複数の三角形とで内側から近似し、それらを1つのR\*-treeに構成する。ついでこの木を、近似外接矩形を使って作られたR\*-treeの葉ノードに繋ぐことにより、全体で1つのR\*-treeを作る。この木を使うことにより、矩形交差質問におけるフィルタリングの精度を上げ、解候補の数をより少なくし、結果として空間質問処理の効率を向上させることを提案している。また、これを実装し、Sequoia2000地理データベースに適用し、その効果を実証している。

以上を要約すると、本論文は、異なる属性を持つ軸から構成される空間中の空間データクラスタリングに関して新しい手法を提示し、実験によりその有効性を示すとともに、矩形交差質問に有効な形状近似法とのインデックス化を考案し、実際のデータベースによりその有効性を実証したものであり、データ工学上価値ある業績である。よって博士(情報科学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) Alexander N. Lozhkin (ロシア)  
 学位記番号 シ情 博甲第103号(工学)  
 学位授与の日付 平成12年3月27日  
 学位論文題名 Novel Digital Signal Processing and Synchronization Schemes for High-Speed Digital Receivers (高速デジタル受信機用デジタル信号処理と同期の新方式)

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

In order to fill the gap between the consumer demands and the technologies available till date, extraordinary growth is evident in capabilities for the future digital radio communications, the union wireless, satellite and mobile technologies. When we use term "high speed" we assumed that the information symbol rate as a ratio to the data transmission system bandwidth exceeds 2 Bit/Hz. These public demands have motivated this thesis and novel solutions, synthesize and analyses were proposed for a spectrally efficient, high speed reliable digital data transmission over narrow band channels.

For spectral efficiency in terms of data transmission system capacity, design of data processing algorithms which increase the data reliability during data transmission over the narrow band channels (for exam-

ple high speed digital data transmission over voice channel) is very important. The basic novelty in the proposal is the discreet time finite state Markov process application to derive the optimum symbol-wise detector structure. Optimum symbol-wise and optimum sequence detection are not synonymous. In a sense, optimum sequence detection considers all erroneous sequences to be equally bad. Thus for low signal-to-noise situations, errors may lead to detected sequences that very far from the true sequence.

In Chapter 2 we have derived and synthesized, under endless and fixed delays, the optimum and sub-optimum detector for digital communication channels having intersymbol interference. The proposed detector has a non-linear structure and feedback links. So, the problem of the optimum symbol-wise receiver is solved in a general form for the simple homogeneous Markov process of the first order. The impact of the interfered signals energy difference on the optimum symbol-wise receiver structure was clarified. The proposed method of the synthesis was successfully applied for FM signal with the continuous-phase modulation with modulation index 0.5 (MSK signal). The proposed synthesis procedure can be used when the interference interval has an arbitrary duration.

The noise immunity of the optimal symbol-wise detector synthesized in Chapter 2 is theoretically analyzed in Chapter 3 with various non-linearity approximations. It has been shown that non-linear unit can be omitted for low SNR without any significant degradation in performances. However, in the case when SNR is large enough (5,10 or more), non-linear signal processing can significantly improve receiver's performance.

The previously reported theoretical  $P_{ERR}$  evaluation has established optimum value for the limiting level of the non-linear unit's transfer function. The presented results which were obtained with the aid of machine computation are verified as this optimum value and optimal performance of receiver. The superiority of the non-linear signal processing is supported by computer simulation results.

A new independent synchronizing subsystems for the coherent MSK/GMSK demodulator for FDMA systems were designed and investigated in Chapter 4. Through the simulation tests, it has been shown that it is possible to detect carrier frequency and phase errors independently from the information symbols delay, and

at the same time provide BER similar to the conventional scheme. For error probabilities of  $10^{-3}$  and  $10^{-5}$  the proposed system improves SNR by 0.5 dB compared with the conventional Costas loop. While limited to higher SNR ratios, the proposed system is suitable for many applications and can be realized with simple circuitry well suited for IC implementation.

A new method for high-speed initial synchronization for TDMA/CDMA communication system is proposed and investigated in Chapter 5. The special preamble synchro-signal implementation increases the communication system's throughput capability. The parallel processing of the proposed preamble signal reduces time for initial synchronization. The strong mathematical proofs of the proposed method are given. System application has been discussed. The demodulator that used the proposed preamble signal, offers automatic frequency and phase control and frame and symbol timing recovery, enable us to shorten the preamble length to one quarter that of a conventional one. The proposed preamble is a strong candidate for TDMA or CDMA systems that require the high data-transmission and frequency utilization efficiency. It is concluded that the proposed initial synchronization scheme well suits high data rate wireless LAN systems.

## 論文調査の要旨

通信情報のマルチメディア化にとめない、デジタル伝送技術の高度化が求められている。具体的には伝送速度の高速化、送受信機を含めた伝送路における伝送遅延時間の低減、良好な受信誤り率特性の達成、変復調回路の容易な実現などが重要な課題である。これらの課題は互いに深く関連している。例えば、限られた帯域内で高速伝送を行うと符号間干渉が生じるため誤り率特性が劣化するとともに、復調回路が複雑になる。また、限られた送信電力のもとでは、受信機における同期確立に時間を要し、伝送遅延が大きくなる。本論文は高速デジタル通信において、符号間干渉下における受信特性を改善するとともに、同期確立を高速に行う新しい手法を提案したものであり、以下の点で評価できる。

第一に、マルコフ過程に基づく符号間干渉下において、シンボル毎の検出を行いながら、誤り率が最小となる意味での最適受信機の構成法を示している。この構成法は従来の構成法に比べて回路規模を小さくできるとともに、最適受信における非線形信号処理の役割を明確にしている。また、検出遅延を固定して記憶回路の規模を減少させた場合でも、最適の場合に比べて誤り率の劣化が少ない受信回路構成法を提示した。さらに、電源効率を重視する無線通

信において多用される定振幅変調方式の一つである最小位相推移変調方式 (MSK) に対して受信回路を具体的に示している。

第二に、上で与えた最適受信機構成法について、受信機非線形回路の特性を近似することにより、符号間干渉下において誤り率特性を解析的に明らかにしている。この解析結果は計算機シミュレーション値とよく一致することが確かめられている。また、上記の非線形回路が誤り率特性に大きく影響することを示し、近似した非線形回路に対して誤り率が最小になるようなパラメータを導出した。

第三に、MSK 信号の同期検波において、搬送波同期、クロック同期を独立に行う方式を提案している。これにより、搬送波信号に周波数誤差が存在する場合においても、同期を高速に確立することを可能にした。また、この方式を集積回路化に適しているデジタル回路により実現する手法を提示し、従来のアナログ回路を用いた場合に比べて、同等の誤り率特性を得ている。

第四に、時分割多重通信 (TDMA) などのパースト通信における同期確立用の新しいプリアンブル信号及びその受信法を提案している。このプリアンブル信号は、直線的に周波数が変化するものであり、これを二つの整合フィルタを用いて受信することにより搬送波信号の周波数誤差、位相誤差、およびクロックタイミングとフレームタイミングを並行して同時に検出することを可能とした。これにより、低い信号対雑音電力比のもとでも高速に同期を確立することができ、従来のプリアンブル信号の長さを  $1/2$  に低減できることを示した。

以上、要するに本論文は高速デジタル通信システムにおいて、マルコフ過程に基づく符号間干渉下で誤り率を最小とする受信機構成法を示し、高速同期を確立する二つの方法を提案し、それらの構成法と同期法の有効性を明らかにしたものであり、通信工学上価値ある業績と認める。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) 井上 昭彦(福岡県)  
学位記番号 シ情 博甲第 104 号(工学)  
学位授与の日付 平成 12 年 3 月 27 日  
学位論文題名 Design Techniques for Cost and Power Reduction of Embedded Systems (組み込みシステムのコストと電力削減のための設計技術)

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  
" " " 雨 宮 真 人

## 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、家電製品や情報通信機器に組み込まれる個々の組み込みデジタルシステムの機能の全ては一つの大規模集積回路 (LSI) により実現され、その LSI はシステム LSI と呼ばれるようになっていく。本論文の目的は、電力消費が小さく、かつ、安価なシステム LSI を短期間に設計する技術を確立することである。システム LSI はある製品に特化して設計されるため、システム LSI の生産量はその LSI が組み込まれる最終製品の生産量と等しく、その製品の市場規模に応じて様々である。数百個しか生産されないシステム LSI から数百万個生産されるシステム LSI まで統一的に設計できる設計手法が強く望まれている。本論文では、3種類の実装方法を持つ設計手法を提案する。設計者はシステム LSI の市場規模に応じて実装方法を選択することができる。更にその要素技術として、組み込みシステムの動作を記述するための言語、特定用途向きのプロセッサに対してマシンコードを生成するコード生成技術、および、少量生産されるシステム LSI に対する設計技術を提案する。

本論文は6つの章から構成される。1章は序論である。2章では、システム LSI のコストに関する新しい評価指標を定義し、システム LSI の市場規模とコストの関係性を述べた後、提案する設計手法について説明する。

第3章では、組み込みシステムの動作を記述するための言語を提案する。組み込みシステムの動作記述にはC言語等の従来のプログラミング言語が使用される場合が多いが、従来のプログラミング言語で記述されたプログラムはプロセッサのデータパス幅に依存しているため、用途に応じてデータパス幅を変更するとそのプログラムの再利用が難しい。例えば、32ビットのデータパス幅を持つプロセッサに対して記述されたCプログラムは、20ビットのデータパス幅を持つプロセッサ上で同様に動作することは保証されない。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 言語を提案している。更に、Valen-C 言語を使用すると、従来のプログラミング言語を使用した場合より少ないハードウェア資源とエネルギーでプログラムを処理できる。なぜなら、プログラム中の各変数のビット幅が明記されるため、各変数を保持するためのレジスタやメモリ、および、演算器の面積を小さくすることができるからである。

第4章では、まず、用途に応じてプロセッサのデータパス幅を最適化する手法を説明する。データパス幅は組み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み込みシステムを設計する上で重要な問題である。しかし、従来のコ

ンパイル技術では、プログラムを固定したまま様々なデータパス幅を持つプロセッサに対してコード生成することは難しい。本論文では、Valen-C 言語で記述されたプログラムを各々が異なるデータパス幅を持つプロセッサに対してコンパイルする手法を提案し、そのコンパイラの実装について述べる。提案するコンパイラは、例えば、20ビット幅を持つ変数同士の加算を、10ビットプロセッサ上では2つの加算命令、下位10ビットの加算と上位10ビットの加算、に自動的に変換する。プログラムの演算精度を保ちつつ、データパス幅を変更することにより、性能を保持したまま最大40%の面積と34%のエネルギーが削減されることを示した。

第5章では、少量生産されるシステム LSI に対する設計技術を提案する。システム LSI のチップコストは様々な要因により決定されるが、少量生産されるシステム LSI の場合、その設計コストとマスクコストが支配的になる。これらのコストを削減するために、可能な限りシステム LSI を汎用的に設計し、複数の用途に応じシステム LSI を使用すれば良い。これにより、大量生産が可能になり、1つの LSI に対する設計コストとマスクコストが削減される。しかし、汎用的な LSI は必要以上に電力を消費する場合がある。消費電力が大きいとシステム LSI の市場価値が損なわれ、逆に生産量が小さくなるおそれがある。本論文では、このジレンマを解決するために、ある工程段階まで処理の進んだウェハを多くのシステム LSI 間で共有し、製造の最終工程で回路の不必要な部分への電力供給を遮断することにより、用途に応じたシステム LSI を実現する技術を提案している。提案手法により、設計とマスクの再利用による低コスト化と不必要な電力消費の削減による低電力化を両立することができる。計算機実験により、従来手法に対する優位性を示した。

6章では本論文の結論と今後の研究の方向性を述べる。

## 論文調査の要旨

微細化による集積回路製造技術の進歩によって、1000万素子以上を含む LSI (大規模集積回路) が実現できるようになり、LSI は従来の部品からシステム (システム LSI と呼ばれる) へと、その製品としての性格を大きく変えようとしている。本論文は、家電製品や情報通信機器に組み込まれる安価で消費電力の小さな組み込みシステム LSI を短期間で設計するための設計手法に対する新しい設計規範とそれに基づく設計方法論を提案したものである。システム LSI はそれぞれの製品に特化して設計されるため、その市場規模は様々であり、それぞれの規模に応じた設計手法が必要となる。本論文では、数百個しか生産されないシステム LSI から数百万個以上生産されるものまでの上流設計手法を統一し、製品の市場規模に合わせて異なる実装方法の中の適当なものを設計者が選択できる設計手法とそれを

実現するための要素技術を提案している。

著者は、まず、システム LSI のコストに関する新しい評価指標を定義している。設計コスト、マスクコスト、製造コスト、テストコスト、パッケージコスト、ソフトウェアコスト、製品数をパラメータとした1チップの原価モデルを提示し、市場規模によって決まる製品数によって設計および実装手法を変える必要があることを示している。

次に著者は、組み込みシステムの動作を記述するためのプログラミング言語を提案している。組み込みシステムの複雑な動作は、基本的にはソフトウェアとして記述され実現されることが多いが、広く利用されているC言語では各変数のビット幅がプロセッサのデータパス幅に依存しているため、用途に応じてプロセッサのデータパス幅を変更するとプログラムの計算精度が保証されずプログラムの再利用が難しい。本論文では、C言語を拡張し、各データ型のビット幅を1ビット単位でプログラムの中で指定可能とすることにより、プロセッサのデータパス幅に対するプログラムの独立性を確保するValen-C言語を提案している。Valen-C言語を使用すると、プロセッサやメモリのデータパス幅が変わっても同じプログラムをそのまま再利用することが可能となり、設計コストの大幅な削減につながる。また、従来のプログラミング言語を使用した場合より少ないハードウェア資源と電力消費でプログラムを処理することが可能となることも示している。さらに、Valen-C言語による動作記述を直接ハードウェアに変換し実現する場合もレジスタや演算回路のビット幅を必要最小限に押さえることができ、低コスト化、低消費電力化に大きく寄与すると考えられる。

さらに著者は、Valen-C言語で記述されたプログラムを異なるデータパス幅を持つ種々のプロセッサに対してコンパイルするリターゲットブルコンパイラを提案し、そのコンパイラの実装について述べている。このコンパイラとデータパス幅をパラメータとして指定できるソフトコアプロセッサを用いることにより、プログラムの計算精度を保ちつつ、プロセッサやメモリのデータパス幅を柔軟に変更して専用プロセッサを持つシステム LSI の最適化が出来る。12桁10進電卓の例では、データパス幅を32ビットから20ビットへ削減することで、性能を保持したまま、面積で40%、消費電力で34%の削減効果を示している。

最後に、少量生産されるシステム LSI に対する設計技術および回路方式として FlexSys とよぶ新しい方法を提案している。FlexSys では、汎用的なシステム LSI のベースとなる回路を設計しておき、ある工程段階まで処理の進んだチップを多くのシステム LSI に共通に利用する。製造の最終工程で個々の応用に対して unnecessary な部分回路への電力供給を最終マスクで遮断することにより、用途に応じたシステム LSI を実現する。これは、従来広く用いられてきたマイクロコンピュータとゲートアレイの利点をシステム LSI

向きに構成したもので、少量多品種生産されるような製品のシステム LSI 化の可能性を開くものとして評価出来る。提案手法により、設計とマスクの再利用による設計コストおよびマスクコストの低減と unnecessary な電力消費の削減による低電力化が両立できることを従来手法と比較しながら定量的に示している。

以上、要約すると、本論文は、組み込みシステム向けのシステム LSI 設計手法に関して新しい設計規範と設計手法を提案し、その実現のためのプログラミング言語の拡張とそのリターゲットブルコンパイラの開発および少量多品種生産に適した回路方式の提案を行いそれらの有効性を示したもので、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) 廣瀬 啓(福岡県)  
学位記番号 シ情 博甲第105号(工学)  
学位授与の日付 平成12年3月27日  
学位論文題名 信号の多値化と伝送方式の工夫による  
LSI 回路設計手法の研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 安浦 寛人  
(副査) // // 香田 徹  
// // 黒木 幸令

## 論文内容の要旨

微細加工技術の進歩に伴い、LSI に搭載可能な論理素子数は飛躍的に向上し、システム LSI のような大規模システムを一つのチップ上に実現することが可能となった。また、論理合成技術を核とした CAD 技術の発達により、大規模 LSI を短期間のうちに設計することが可能となった。CMOS 論理回路はその低消費電力性、ノイズマージンの大きさによりデジタル LSI の標準回路方式となっている。しかし、CMOS LSI はチップ上の配線に起因する問題のためにその性能向上が限界に近づきつつある。

配線の遅延時間は、配線の抵抗と容量の積に比例する。微細化の進行に伴って論理素子の伝播遅延時間は減少してきたが、配線断面積の縮小による配線抵抗の増加と配線間隔の縮小による隣接配線間容量の増加により、従来論理素子の遅延時間と比べて問題にならなかった配線の遅延時間が相対的に増加している。微細化の進行はまた、配線間のクロストークという新たな問題を引き起こしている。クロストークは配線間容量を介して隣接配線に誘起される電圧変化であり、回路の誤動作や配線遅延の増加の原因となる。

本論文は、広く用いられている CMOS デジタル回路技術や同期回路設計方式との親和性を保ちながら、信号の多値化や信号伝送方式の工夫により高集積・高性能 LSI 回路を実現する LSI 回路設計手法について述べる。局所的に多値信号を利用する新しい回路素子の利用と、長距離配線

におけるクロストークの影響を低減する信号伝送手法により、配線に起因する問題の解決を図る。

本論文は6章から成る。

1章は序論である。2章では本研究の背景および目的について詳説する。

3章では、局所多値/広域2値通信の概念を導入した算術演算器設計について述べる。局所多値論理素子としてニューロンMOSトランジスタを用いる。多値論理素子内部でのみ多値信号を利用して素子外部は2値信号を用いることで、信号の信頼性を確保したまま高集積・高性能LSI回路を実現することができる。本論文では、ニューロンMOSトランジスタを用いて算術演算回路を実現することで、CMOSデジタル回路の利点を維持したまま多値論理の有効性を活かす回路が実現できることを示す。すべてCMOSで設計する回路と比べて配線数と配線長を削減できるため、配線問題によるCMOS2値同期回路の問題を緩和することができる。面積と実行速度の評価を行い、CMOSよりも高速な乗算器を小さい面積で実現できることを示す。

4章では、新しいデバイスであるニューロンMOSと既存のCMOS技術の親和性を、CMOSプロセスを用いたチップ試作により確認する。VDECのチップ試作サービスを利用したモトローラ社のアナログ向け1.2 $\mu\text{m}$ 2層メタル、2層ポリシリコンCMOSプロセスを用いて基本的なニューロンMOS回路を設計し、試作チップの動作テストを行う。CMOSアナログプロセスを用いてニューロンMOS回路を試作することにより、CMOS回路とニューロンMOS回路の混在が容易に可能であることを示す。また、当該プロセスにおけるニューロンMOS回路の問題点とその解決法を示す。

5章では、チップ内の長距離並走配線において問題となるクロストークによる遅延増加に対して、ドライバの同期性を緩める準非同期的な信号伝送方式により、クロストークの影響を低減する手法を提案する。大規模集積回路の長距離単方向バス状配線においては隣接配線が同時に逆方向に遷移する場合に遅延時間が最大となることに着目し、バスドライバの遷移タイミングを意図的にずらすことによりクロストークによる遅延増加を低減する信号伝送手法を提案する。提案手法による遅延削減率を良い精度で予測することができるバス遅延の近似式を導入し、リピータを挿入したバス配線に対して本手法が有効であることを示す。また、SPICEを用いたシミュレーションにより最大20%程度最悪遅延時間を改善できることを示す。

最後に、6章で本論文をまとめる。

## 論文調査の要旨

半導体集積回路の加工寸法の微細化と動作速度の高速化にともない、大規模集積回路(VLSI)の設計において、素子

遅延に対する配線遅延の相対比の増大が顕著となり、配線間の相互作用の影響や配線上のノイズおよび信号のスキューなど従来考慮しなくてもよかった因子を考慮する必要がでてきた。配線の遅延時間は、配線の抵抗と容量の積に比例するが、微細化の進行に伴って配線断面積の縮小による配線抵抗の増加と配線間隔の縮小による隣接配線間容量の増加により、配線の遅延時間が回路設計上の大きな問題となっている。本研究では、CMOSデジタル回路における長距離配線の削減および配線遅延の低減を目指して、多値論理回路の部分的な導入に関する検討と新しい信号伝送方式の提案を行っている。特に、広く用いられている2値CMOSデジタル回路技術や同期回路設計方式との整合性を保ちながら、信号の多値化や信号伝送方式の工夫により高集積・高性能回路を実現する回路設計手法を提案している。具体的には、局所的に多値信号を利用する新しい回路素子の利用による回路内配線数の削減と、長距離配線におけるクロストークの影響を低減する信号伝送手法を提案してその効果を示している。

著者は、東北大学で発明されたニューロンMOSトランジスタを多値論理素子として用いて、局所多値/広域2値の概念を基本とした算術演算回路の設計を行っている。多値論理素子内部で多値信号を利用することで回路内の配線量を削減し、素子外部は2値信号を用いることで信号の耐ノイズ性を確保する回路設計手法を提案している。特に、従来の2値CMOSデジタル回路とプロセス的にもレイアウト的にも整合性の高い回路方式とすることで、CMOSデジタル回路の内部に部分的に多値論理回路を組み込んで両者の利点を引きだすことが可能であることを示している。従来のCMOSデジタル回路より配線数と配線長を削減できるため、面積と計算速度において優れた乗算回路が設計できることを示している。

次に、上で提案したニューロンMOS回路の実現性を評価するために、基本的なニューロンMOS回路を集積回路としてVDEC(東京大学大規模集積システム設計教育研究センター)において試作し、その特性を測定・評価している。通常の1.2 $\mu\text{m}$ 2層メタル2層ポリシリコンCMOSプロセスを用いて基本的なニューロンMOS回路を試作することにより、CMOS回路とニューロンMOS回路の混在が容易に可能であることを実証している。また、当該プロセスにおけるニューロンMOS回路の問題点を検討しその解決法を与えている。

さらに、チップ内のバスのような長距離並列配線において問題となるクロストークによる配線遅延の増加に対して、ドライバの同期性を緩める準非同期的な信号伝送方式を提案している。大規模な集積回路の長距離バス状配線においては、隣接配線上の2値信号が同時に逆方向に遷移する場合に、見掛け上の配線間容量が大きくなるため配線遅延時間が大きくなる。そこで、隣接する配線を駆動するバスド

ライバの遷移タイミングを意図的にずらすことによりこの遅延増加を低減する信号伝送手法を提案している。この信号伝送手法によって配線遅延が20%程度削減されることをSPICEを用いたシミュレーションによって示している。また、提案手法による遅延削減率を良い精度で予測することができるパス遅延の近似式を考案し、遷移タイミングのずらし量を比較的簡単に設計する手法も示している。

以上を要約すると、本研究は、デジタル集積回路における配線遅延の増加の問題を局所多値/広域2値の概念に基づく配線量の低減と信号の遷移タイミングを意図的にずらす信号伝送方式によって解決したもので、デジタル集積システムに対する新しい設計手法を示したものと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) 木 許 雅 則 (大分県)  
 学位記番号 シ情 博甲第106号(工学)  
 学位授与の日付 平成12年3月27日  
 学位論文題名 高速な収束性を有する適応アルゴリズム  
 とエコーキャンセラへの応用に関する研  
 究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 西 哲 生  
 (副査) // // 香 田 徹  
 // // // 迫 江 博 昭

## 論文内容の要旨

ある未知システムの入出力データから、そのシステムのインパルス応答を適応的に推定する、いわゆる学習機能を持ったデジタルフィルタは適応フィルタと呼ばれる。適応フィルタは、その出力と未知システムの入出力との誤差を0とするようにフィルタ係数を逐次的に更新することにより、未知システムと同様の入出力関係を持つようにする。特にその係数更新部分は適応アルゴリズムと呼ばれ多くの手法が提案されている。

適応フィルタの技術の主な応用の一つは、国際電話や携帯電話などで発生するエコーの消去、すなわちエコーキャンセラである。エコーキャンセラでは、時々刻々に変化するエコー経路のインパルス応答を逐次推定して疑似エコーを生成し、それを真のエコーから減ずることでエコーを消去するというものである。最近では、入力がマルチチャンネルであるテレビ会議システムなどでエコー除去にも応用され、適応フィルタの必要性は益々高まってきている。しかしながら、上記の応用に際して従来のアルゴリズムは係数収束特性、および係数更新毎に必要な演算量などの点で必ずしも満足する性能は得られていない。また、マルチチャンネルの場合においてはそれぞれ特有の問題が生じ、これらを改善する手法が望まれている。

上記の要求に対して、本論文では一般的適応アルゴリズム及びマルチチャンネルエコーキャンセリングアルゴリズムの収束特性向上に関して行った研究をまとめている。すなわち、一般的アルゴリズムでは係数修正のためのステップサイズを係数更新毎に準最適化する手法を提案し、またマルチチャンネルエコーキャンセリングアルゴリズムでは、全チャンネルの入力情報を有効に用いることで高速な収束を得る手法を提案している。さらにマルチチャンネルエコーキャンセラの重要な問題である係数の不定性と呼ばれる問題に関連して、適応フィルタの係数収束特性を解析的に示している。

第2章では、適応フィルタの基礎であるパラメータ推定についての説明を行い、以後の議論を行う準備として典型的アルゴリズム及びブロック信号処理について説明している。また、主な適用例としてエコーキャンセラなどのモデルを用い、適応フィルタの必要性及び有効性について述べる。

第3章では、ブロック処理を適用したLMS-Newtonアルゴリズム(以下ではBlock LMS-Newtonアルゴリズムという)に対して準最適ステップゲインの原理を導入した手法を提案する。Block LMS-Newtonアルゴリズムを含む従来の手法は、出力誤差の二乗和が最小となるようにフィルタ係数を更新している。これは、システム同定などのように未知系、推定系それぞれの係数の直接的距離を最小にすることが要求される場合では、必ずしも求めるべき未知系係数に対して最適係数修正を行っていない。本章で議論する準最適ステップゲインは、係数更新毎に推定系係数から未知系係数への距離ベクトルを係数修正ベクトルへ射影することにより得られる。つまり、係数更新毎に未知系、推定系係数の直接的距離に基づいた準最適係数修正ベクトル上の点を決定する。計算機シミュレーションにより提案法が従来法に対し高速な収束速度を示し、かつ5dB程度推定精度が良いことを示す。また、係数更新当たりの演算量の軽減化を実現する手法についても示している。この手法によれば、フィルタのインパルス応答長を $N$ とする演算量は $O(N^2)$ から $O(N)$ へ減少する。

第4章では、線形結合形マルチチャンネルエコーキャンセラを対象とした高速な収束速度を持つアルゴリズムを提案する。従来法では一つのチャンネルの係数更新に着目するとそのチャンネルに対応した入力信号しか利用しておらず他チャンネルの入力信号情報及び各チャンネルの入力信号間の相互相関の情報を利用されていない。本章で議論する手法は、一つのチャンネルの係数更新に対して全チャンネルの入力信号空間を探索することを基礎としており、さらに各チャンネル間の相関行列全てを係数更新に利用することで高速な収束速度、および高い推定精度が得られる方式である。実際に計算機シミュレーションにより、種々の入力信号下において提案法が従来法に対し高速かつ10dB程度推定精度が良い

こと、及び従来法に対し20%以下の演算量で実行が可能であることを示している。

第5章では、線形結合形エコーキャンセラの重要な問題である“係数の不定性”の問題に関連した平野らの係数収束性の解析に対して、入力信号が有色である場合の解析を行っている。線形結合形エコーキャンセラでは、その構成上出力誤差が0であっても必ずしもフィルタ係数誤差は0にならない、いわゆる係数の不定性と呼ばれる問題がある。これに関連した平野らの係数収束性の解析は白色信号を対象としたものであり、入力信号が一般に有色信号であることを考慮するとこの解析は一般的ではない。本章では、平野らと同じモデルの基で入力信号が有色である場合の解析を行っており、本解析は平野らの解析を大幅に一般化したものである。入力信号の拡大共分散行列の非正則性が白色信号入力時と同様であることを示し、その結果係数の誤差が一般には0にならないことを示す。また拡大共分散行列の階数の上限についても述べる。

最後に第6章では、本研究のまとめを行い、今後の課題について言及している。

## 論文調査の要旨

デジタル信号処理分野で基本的な技術の一つは、時間的に変化する未知システムの特性を適応的に推定することであり、この技術の中核は適応アルゴリズムまたは適応フィルタといわれる。適応フィルタは、国際電話回線で発生するエコー除去のためエコーキャンセラとして重要な役目を果たしているほか、最近では、複数の入出力をもつテレビ会議システムなどのマルチチャネルシステムでのマルチエコーキャンセラをはじめ、極めて多くの分野で用いられている。

適応アルゴリズムでは、対象とする未知システムを $N$ 次FIR (Finite Impulse Response) フィルタと仮定し、これと同じ次数の推定フィルタを用意して、入力信号をこれらのフィルタに同時に入力したときの出力の差(出力誤差)を0に近づけることにより推定システムの係数ベクトルを未知システムのそれに近づけようとする。すなわち、入力信号及び出力誤差の情報から推定フィルタの係数ベクトルを逐次修正していく。この際、係数ベクトルの修正方向及び修正ステップ長の求め方が問題であり、方法の優劣は、収束までの時間(収束速度)、要する総演算量、推定精度、収束特性の入力信号依存性などで評価される。適応アルゴリズムに関して従来多くの手法が提案されているが、多様な応用に対し必ずしも満足する性能は得られておらず、また特にマルチチャネルの場合には特有の困難な問題もあり、アルゴリズムの一層の改善が望まれている。

本論文は、単一チャネル及びマルチチャネルシステムに対する適応アルゴリズムにおいて、収束の高速化、演算量の軽減、推定精度の向上に関して行った研究をまとめたも

ので、結果は次の三点で評価できる。

(1)従来高速な収束特性で知られるブロック処理方式LMS-Newton法(以下Block LMS-Newton法という)では、出力誤差の二乗和を最小とするように修正方向・修正ステップ長を決めていたのに対して、本論文ではある計量空間のもとでの直交条件から、LMS-Newton法で求めた修正方向上で未知フィルタと推定フィルタの $N$ 次元係数ベクトルの距離を直接最小とするステップ長をうまく導出し、これによる新しい準最適ステップ長適応アルゴリズムを提案している。提案した方法は、Block LMS-Newton法より高速な収束性を示しかつ5dB程度正規化推定誤差が小さいことを、シミュレーションにより示している。また演算量が多いというBlock LMS-Newton法の欠点を改善するため、演算量の大部分を占める逆行列の繰り返し計算を間引いて $N$ 回に1回だけ行うことを提案している。これにより収束速度は多少遅くなるものの、演算量は $O(N^2)$ から $O(N)$ へ大幅に減少し、推定精度は殆ど変わらないことを数値シミュレーションで示している。

(2)従来の線形結合形マルチチャネルエコーキャンセラでは一つのチャネルの係数更新に当該チャネルへの入力信号しか利用していなかったのに対して、本論文では全チャネルの入力信号を利用した係数修正方法を提案し、このための係数ベクトルの更新式を導出している。収束特性のよいとされる射影法に基づく従来法と比較して、提案した方法は高速な収束特性を有すること、平均10dB程度エコー抑圧量が小さいこと、及び20%以下の演算量で済むこと、を種々の入力信号に対するシミュレーションにより示している。

(3)線形結合形マルチチャネルエコーキャンセラにおいて入力信号が白色信号の場合、エコーキャンセラの出力誤差が0となっても必ずしもフィルタ係数は未知システムのそれと等しくならないという、いわゆる係数の不定性があることが知られている。本論文で著者は、より一般の場合として有色信号の場合に対しても、白色信号入力時と同様に入力信号の拡大共分散行列が非正則であることを解析的に示し、この非正則性が係数の不定性をもたらすことを明らかにしている。さらに拡大共分散行列の階数の上限を与え、不定性の度合いを評価している。

以上を要約すると、本論文は、適応フィルタの収束性の高速化、演算量の軽減、推定精度の向上に関し新たなアルゴリズムを提案し、エコーキャンセラ設計に適用してその有効性を示したもので、情報工学に寄与するものである。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

氏名(本籍) 丸山博史(福岡県)  
学位記番号 シ情博甲第107号(工学)

学位授与の日付 平成12年3月27日  
学位論文題名 プログラムスライシングの拡張とその関  
数型言語およびVRML言語への適用

#### 論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 荒木 啓二郎  
(副査) // // 廣川 佐千男  
// // 谷口 倫一郎

### 論文内容の要旨

プログラムスライシングは、プログラム内の命令間の依存関係をもとに、ある変数の値に影響する部分的なプログラムをスライスとして求める技術である。一般に、スライスは元のプログラムよりも小さくなる。その変数に関する動作テストをこの小規模なスライスを実行するだけで実施可能な点、あるいはその変数の値が誤った場合にその原因であるバグが存在し得る範囲をこのスライス部分内に限定できる点など、この技術はプログラム開発作業において有用な点を多く持っている。

プログラム開発時に、変数値への影響とは異なる影響を分析したいという要求が発生する場合がある。しかし、現状のスライシングは変数値への影響に限定して対象を取り扱うため、その場合に対して有効な方法が無かった。本研究の目的は、スライシング技術を拡張し、このような場合に対しても適用可能なものにするこゝで、プログラム開発作業を支援することである。

本論文では、関数型プログラムに対しデータ型に関する影響を扱うスライシングの適用を試みる。さらに、各種三次元物体を含んだ空間をインターネット上で構築する場合に有効であるVRMLプログラムという別の対象について、実行時の表示上の影響を扱うスライシングの適用を試みる。また、VRMLスライシングに要するコストを軽減する方法を提案する。

準備として、第2章で従来のプログラムスライシングの概要を述べる。ここでは、典型的なプログラムスライシングである静的、動的、ハイブリッドスライシングの特徴について説明し、それらの有効性を述べる。また、従来のプログラムスライシングの適用範囲が限定されているという問題点について説明する。

第3章では、スライシングの題材として採用する準備として、関数型プログラムにおけるデータ型について議論する。型に関して豊富で協力的な概念を持っている関数型プログラムでは、型の概念が有効に利用されている。しかし、プログラミング時に発生する型に関する誤りが複雑なため、その修正作業が困難となっている場合も多い。そこで、言語仕様は単純ではあるけれども、型の体系に関しては十分な機能を持ち一般性を有している関数型プログラミング言語Expを対象として、型誤り修正を支援する方法をいくつか提示した。特にプログラムスライシングに基づく方法が

深い知識と手間を必要とせずに効率良く支援できる点で有効であることを示した。

次に第4章では、このデータ型に関するスライシングの方法を具体的に提示する。データ型スライシングの実現に必要な型付けの影響に関する情報をデータ型の計算過程の履歴を用いて取得する方法、およびその情報を用いたスライス形成方法を構築することにより、データ型スライシングのアルゴリズムを提示して、試作システムを実現した。

スライシングを別の対象であるVRMLプログラムに適用する背景として、第5章でVRMLの概要と問題点を挙げる。三次元物体が動的に変化するVRMLプログラムを開発する場合、まだ新しい分野であるために種々の経験の蓄積が乏しいという点、および三次元空間に時間の流れという次元が加わり概念的に複雑であるために扱いが難しいという点により、動的振る舞いに関するテストやデバッグ作業に関して、系統的手法の確立やツールによる支援が十分ではない。ここでは、VRMLプログラムの開発に関わる問題点について考察した。

第6章では、上記問題の解決のためにVRMLプログラムに対するスライシングを提示する。VRMLプログラムの実行時における表示上の影響という、変数の値の変化として現れない影響も考慮する必要がある事を示し、VRMLプログラムのスライシングに必要な命令間の依存関係の提示、およびその分析方法を検討した。さらにスライス形成方法を構築し、VRMLスライシングの方法を提示した。また、その支援ツールを実現し、実際にいくつかの例に適用し、有効性を確認した。さらに、このVRMLスライシングを提示する際に考案したスライシングの改良方法を述べる。ここでは、ハイブリッドスライシングに必要なプログラムの実行情報の一部を、従来の方法に比べ、より簡易に取得する方法を提示した。また、静的およびハイブリッドスライシングにおける依存関係分析の際に無駄な処理を省く方法も提示した。これらの改良方法は、VRMLスライシングに限らず、広く適用可能な一般性を持っている。

本研究により、関数型プログラムおよびVRMLプログラムという新しい領域にスライシングを適用でき、それらのスライシングの支援ツールを実現できたことに加え、スライシングを拡張することで、より多くの分野にその適用範囲が広がる可能性を示すことができた。

### 論文調査の要旨

プログラムスライシングとは、プログラム中のある特定箇所に現れる変数の値に影響を与える部分プログラムを抽出することであり、プログラム構成要素間に成り立つデータ依存関係や制御依存関係などを分析して、着目すべきプログラムの範囲を限定する。得られるプログラムスライスは、一般に元のプログラムよりは小さく、かつ、完結した

プログラムとして実行できるために、主にプログラムのデバッグにおいて誤りの原因を特定する際に有効である。さらに、プログラム中の各種の依存関係の分析に基づいて、プログラムの構造や振舞を理解する上でも有益である。

本研究は、プログラムスライシングを、単に変数の値に対する影響のみならず、関数型プログラミング言語における型の体系ならびに三次元物体の構築および表現のために用いられるVRMLプログラムにおける物体間の関係に対して適用することを試みることによって、プログラムスライシングの概念を拡張し、それぞれの場合における有用性を示したものである。

関数型プログラミング言語では多相型や高階関数ならびに型推論や型検査などを含む高度な型の体系を提供している。そのため、型に関する誤りが発生した時に、その原因を究明して修正することが困難になる場合も多い。本研究では、型の体系において、型付けに関する依存関係を定義して、それに基づくスライシングを新たに考案して、型誤りの修正を支援する方法を提案し、ツールの実現を行ってその有効性を示した。

また、三次元物体の構築および表現を行うVRMLプログラムに対して、プログラム中に現れる物体間の相互作用や位置関係、光源や視点などに関する依存関係を定義して、それらに基づくスライシングを新たに提案した。このVRMLプログラムに対するスライシングは、研究の新規性および研究成果の有用性において国際的にも高く評価されている。

さらに、VRMLプログラムを対象としてスライシングを行うツールを実現し、実用規模のVRMLプログラム開発に適用して、その有効性を実証した。本ツールは、利便性の高いユーザインタフェースを備えており、これを用いてVRMLプログラムの開発を効率良く行うことが可能となった。スライスを求めるための処理の効率化と得られるプログラムスライスの精度向上とを目的として、プログラムスライシング方法に対する改良案を提案し、それをVRMLプログラムスライシングツールに実装して、その効果を確認した。

以上、本研究は、プログラムスライシングを従来の変数の値に対する影響のみに限定せずに、関数型プログラミング言語における型の体系や、VRMLプログラムにおける物体間の相互作用などに対する依存関係を新たに定義することによって拡張し、それらに関するツールの実現を行い、それぞれの有用性を実証することによってプログラムスライシングの新たな概念と適用可能性を示したものであり、情報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)に値するものと認める。

氏名(本籍) 石 福 烈(韓国)

学位記番号 シ情 博甲第108号(工学)

学位授与の日付 平成12年3月27日

学位論文題名 A Basic Study on Electrical Insulation of Simulated Pool Cooled HTc Superconducting Coils for Electric Power System (電力用浸漬冷却模擬高温超伝導コイルの電気絶縁に関する基礎研究)

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

超伝導機器の電力分野への応用は、常伝導機器では不可能な磁気エネルギー貯蔵や従来の機器に比べ飛躍的な小形・大容量・高信頼化が可能なことから期待されており、現用機の限界をブレイクスルーする技術として注目を浴びている。しかし、超伝導機器を実用化させるためには、線材技術の開発や実系統に適用するための冷却技術の確立など、多くの課題が残されている。中でも、超伝導電力システムの信頼性確保のためには、超伝導機器内部における電気絶縁信頼性が大切な検討課題の一つとして挙げられる。特に、超伝導機器内部でクエンチが起ると、抵抗の発生に伴うジュール熱により気泡が発生すると同時に電力システム内で発生する高電圧に加えて急激な電流変化によるサージ高電圧が発生することにより、電気絶縁上、極めて厳しい環境になると予想される。これまで、クエンチ模擬環境下における電気絶縁特性について、気泡挙動や破壊特性に関して研究が行われてきたが、その多くは円筒対平板及び平行平板などの基礎的な電極系におけるものであり、実際の超伝導変圧器や超伝導限流器などのコイルを模擬した電極系におけるそのような研究はほとんど行われていない。今後、実用スケールの超伝導機器の開発と電力システムへの適用の進展に伴い、超伝導コイル環境下における電気絶縁特性の解明が、その設計データとしてますます重要になると考えられる。

本論文は、電力用浸漬冷却高温超伝導コイルにおけるクエンチ時の電気絶縁特性に関する基礎研究の一つとして、著者が研究を行ってきた同軸円筒コイル電極系における熱気泡挙動及び部分破壊、破壊(完全破壊)特性に関する成果をまとめたものである。本論文は、6章より構成され、主な内容は以下の通りである。

第1章は序論であり、現在の電力系統における課題をブレイクスルーする技術として期待されている超伝導電力機器における電気絶縁の課題をまとめるとともに、電力用浸漬冷却高温超伝導コイルにおいて、最も厳しい絶縁環境がクエンチ発生時であることを指摘し、本研究で取り上げた課題の位置付けと意義をまとめた。

第2章では、浸漬冷却高温超伝導コイルにおけるクエンチ時の電気絶縁特性を調べるために気泡発生用ヒータを備えた模擬電極を開発し、その中で気泡挙動及び部分破壊発生時の発光を直接観測するための光学観測系、ならびに部分破壊及び破壊特性を測定するための計測系についてまとめ、さらに、本研究に共通する実験方法についてまとめた。

第3章では、超伝導コイルにおいて発生し得ると考えられる超伝導巻線とボビンの3つの配置について、電界計算を行うとともに気泡挙動のシミュレーション計算を行った。これらにより、気泡挙動は超伝導巻線の配置に著しく影響され、さらに、気泡の浮上経路を確保するためには、超伝導巻線をボビン内に埋め込むことが有効であることを明らかにした。

第4章では、開発したクエンチ模擬コイル電極系を使用して気泡挙動に対する印加電界、冷却チャンネル幅 ( $1c$ ) 保持用スペーサの影響を調べ、以下の新しい知見を得た。すなわち、 $1c$  が気泡直径  $2a$  より十分に大きい場合は、気泡は印加電圧には無関係にコイル系外に放出されるが、 $1c/2a$  の比が1-3程度になると電圧印加によって気泡がコイル導体下部にトラップされるようになり、トラップされた気泡はスパイラル状コイルの下部を沿って上昇するようになる。もし、コイル間の溝を塞ぐ構造のスペーサが設けられると気泡の上昇が阻害されて気泡集塊が起り、集塊された気泡が周期的に冷却チャンネル内を垂直方向に噴出される。この噴出気泡は、コイル電極先端の高電界領域を通過することになり、電気絶縁上極めて危険な絶縁環境を招く。一方、 $1c/2a$  の比が1以下になると、気泡は低い電圧印加からコイル導体間の溝にトラップされる。印加電圧を上昇すると、トラップが強固になって気泡表面にEHD不安定による波が励起され、波の振幅が大きくなるとコイル導体の両側の気泡が間欠的に合体し、気泡が少量ずつ上方に噴出される。電圧印加が高いとEHD不安定による波はコイル電極先端の高電界領域に進入するので、この場合も電気絶縁上厳しい環境になる。

第5章では、4章と同じ電極条件で部分破壊と完全破壊時の電圧特性を調べるとともに、気泡挙動を考慮した破壊機構を光、部分放電電荷、部分放電電流によって詳細に検討した。その結果、気泡が電極系にトラップされてコイル電極先端の高電界領域を通過して噴出するが、EHD不安定による波が高電界領域に進入するとそこで部分破壊が起り、絶縁系に介在されている固体絶縁物がこの部分放電によって劣化されること、ならびに、部分放電によって絶縁系の耐電圧が電圧印加時間とともに低下することを明らかにした。また、耐電圧向上にはクエンチ時の気泡を加圧などによって防御することが有効であることを指摘した。

第6章は総括であり、本研究の成果をまとめるとともに、今後の研究課題について述べた。

## 論文調査の要旨

高温超伝導体の発見以来、超伝導の電力分野への応用が積極的に検討され、特に機器のコンパクト化と環境調和の観点から超伝導変圧器が、また電力システムへの電流インパクト低減の観点から超伝導限流器が、開発の対象として取り挙げられている。これらの機器の超伝導部は基本的には浸漬冷却のコイル構造をしており、絶縁部には常規電圧とともに電力システム内で発生する種々の異常電圧がかかる。さらに、導体でクエンチが起こる可能性があり、特に限流器ではクエンチ現象が正常動作の重要な過程になっており、これらのクエンチ時には冷媒液体中に気泡が発生するので、電気絶縁上極めて厳しい環境になる。この問題に関して、九州大学ではこれまで世界に先駆けてクエンチ環境下の気泡挙動と破壊特性を固体絶縁物が介在しない2次元電極系で研究してきたが、上記の機器の基本構造である絶縁フレーム上にコイルを巻いた複合絶縁系におけるクエンチ時の絶縁破壊の機構と特性に関しては未解決であった。著者は、これらの絶縁系をG-FRP (Glass-Fiber Reinforced Plastics) 表面上に粗巻きしたコイル・液体窒素層 (冷却チャンネル)・G-FRP・同軸円筒電極からなる電極系で模擬することを提案し、理論と実験によりクエンチ環境下の絶縁破壊の機構と特性を詳細に調べ、多くの知見を得ている。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、提案した模擬電極系のコイル導体をG-FRPに埋め込む深さを変えて、絶縁系の電界ならびに液体窒素中における球形気泡に作用するグレイディエント力を計算している。また、これをもとに高電界下の気泡挙動を推定して、コイルがG-FRP表面から突出している場合には絶縁系の破壊電圧の数分の一の低い電圧で気泡がコイル間の溝にトラップされる可能性があることを示すとともに、冷却チャンネル幅と気泡トラップ開始電圧の関係を求めている。

第二に、ガラス表面に蒸着した酸化チタン膜による透明電極を使用した高電界中の気泡挙動を観測できる実験系を開発し、コイル間に気泡がトラップされる過程を背面ストロボ照射によるVTR撮影法で観察し、次の現象を見いだしている。冷却チャンネル幅が自由気泡固有の直径より狭い場合は、低い印加電圧から表面張力の効果で気泡がコイル間の溝にトラップされ、気泡はスパイラルコイルに沿って上方に流れるが、それを阻害するスペーサ等の物体があると気泡が溝内に集積される。電圧を上昇すると、集積された気泡表面にEHD不安定による波が励起され、この波がコイル先端の高電界領域を横断するとコイル導体上下の溝内の気泡が部分的に合体し、気泡中のガスが少量ずつ上方に流れる。冷却チャンネル幅が気泡直径より広くなると、電圧を上昇したときに始めて気泡がコイル下部にトラップされ、溝を塞ぐスペーサが存在すると気泡の集塊が始まり、

集塊気泡がある一定以上の大きさに成長すると、気泡がコイル先端の高電界領域を横断して上方に噴出するようになる。また、気泡の観測から、理論による気泡トラップ開始電圧の推定結果が実験と一致することを示している。

第三に、上記の気泡挙動の観測ならびに、放電発光の空間分布と部分破壊時の放電電荷の測定から、部分破壊の発生と成長過程を解明し、それらと気泡挙動の関係を明らかにしている。すなわち、1)部分破壊は、冷却チャンネルが狭い場合にはEHD不安定による波に沿うように現れ、広い場合には噴出気泡とともに放電発生位置から上方に移動する、2)部分破壊は交流電圧のピーク値付近で開始されるが、後続の部分破壊発生位相は先行の部分破壊による空間電荷効果で前方にずれる、3)部分破壊はブレイクダウンストリーマ型放電である。

第四に、部分破壊が継続的に発生した後に完全破壊に至る場合(破壊機構A)と、部分破壊を経由しないで破壊する場合(破壊機構B)の二通りに、破壊機構を分類できることを見いだしている。すなわち、冷却チャンネル幅が狭くチャンネル部の破壊電圧がG-FRP部の破壊電圧より低いときには破壊機構Aとなり、チャンネル幅が広く絶縁系からの気泡排出が容易な場合には破壊機構Bになる傾向がある。

第五に、破壊機構Aの下で固体絶縁物が部分破壊に数時間晒され、荷電粒子によって絶縁劣化される場合には、破壊電圧がG-FRP単体の破壊電圧まで低下することを見いだすと同時に、破壊電圧の向上には、スパーサに気泡流通孔を設けるとともに液体窒素をサブクールにすることが有効であることを指摘している。

以上要するに、コイル構造を有する高温超伝導機器の模擬複合絶縁系におけるクエンチ時の気泡挙動と破壊前駆現象を解明し、耐電圧向上の指針を与えている。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) 鶴 信一郎(福岡県)  
 学位記番号 シ情 博甲第109号(工学)  
 学位授与の日付 平成12年3月27日  
 学位論文題名 液体窒素温度の固体絶縁物における密閉ボイドの部分放電特性と絶縁劣化機構の基礎研究

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

電気抵抗が零となる超伝導現象を応用した電力用超伝導

機器は、現用の電力機器が抱える課題をブレイクスルーする技術として、実用化に期待が集まっている。超伝導電力機器の導入のメリットの1つである、コンパクト化と大容量化を達成するためには、機器の高電圧化が重要な鍵となる。機器の高電圧化に伴い、機器内部の固体絶縁物は、極低温、高電界という過酷な環境に曝され、絶縁物にはこれまで以上に高い信頼性が要求される。しかし、部分放電発生の原因となる、機器の製造工程における固体絶縁物への気泡(ボイド)の混入を完全に防ぐことは難しい。固体絶縁物中に混入したボイドで発生する部分放電は、検出が困難であるとともに、絶縁物を内部から劣化させるため、しばしば機器の絶縁破壊事故を招く。超伝導機器においては、絶縁物が極低温に冷却されるため、ボイド内部のガスの相変化に伴いガス密度が低下し、室温より低い電圧で放電が開始される可能性がある。これまで、室温のボイドで発生する部分放電の特性については、多くの研究が行われてきたが、極低温下における部分放電下における部分放電の機構と特性については未解明である。今後、超伝導機器の実用化の進展に伴い、機器の絶縁信頼性の確保がますます重要度を増していくものと考えられ、極低温下における固体絶縁物の部分放電の特性と絶縁劣化機構は早急に解明されるべき重要な課題である。

本論文は、超伝導機器内部の固体絶縁物の劣化の主要因の1つと考えられている部分放電に焦点を当て、固体絶縁物中に混入したボイド内で発生する部分放電の発生機構と特性、および部分放電による固体絶縁物の絶縁劣化機構に関して著者が研究を行ってきた成果をまとめたものである。本論文は、6章より構成され、主な内容は以下の通りである。

第1章は序論であり、超伝導電力機器の絶縁系における固体絶縁物の役割と、その絶縁性能についてまとめるとともに、極低温環境下において最も厳しい絶縁劣化要因の1つが部分放電であることを指摘し、本研究で取り上げた課題の位置付けと意義をまとめた。

第2章では、液体窒素浸漬冷却状態の試料で発生する部分放電発光を直接観測するために、導電性薄膜を導入して開発した実験試料について説明するとともに、高速な部分放電現象の電気的特性と光学的特性の観測を行うために構築した部分放電計測システムの概要について述べた。

第3章では、温度の低下に伴う部分放電開始特性の変化について実験で調べ、液体窒素温度のボイドの部分放電開始電圧が室温のものよりも約20%低下することを明らかにした。さらに、部分放電開始電圧とパッシェン曲線を用いて、液体窒素温度におけるボイド内部のガス密度を推定し、放電開始電圧の低下が酸素の液化によるものであることを示した。また、液体窒素温度においては、室温に比して非常に大きな放電開始遅れが存在し、これが、超伝導機器の欠陥検出において障害となる可能性を指摘するとともに

に、その解決策として X 照射などによるボイド外部からの強制的な初期電子供給が有効であることを示唆した。

第4章では、今回構築した部分放電計測システムを用いて、液体窒素における部分放電の電流と発光特性の観測と解析を行い、極低温下のボイド中で発生する部分放電は経過時間とともに形態が激しく変化することを初めて明らかにした。さらに、常伝導機器の絶縁診断に広く採用されている放電発生時の電源位相対電荷量特性の測定を液体窒素温度で行い、それらの特性は試料の温度に大きく依存することを指摘するとともに、液体窒素温度におけるその経時変化特性のメカニズムを部分放電形態の変化に着目して解明した。

第5章では、液体窒素温度における固体絶縁物の部分放電劣化機構について、部分放電の電荷量特性と電子顕微鏡による絶縁物表面の劣化状態の観察による検討を行い、ボイドを含む固体絶縁物の絶縁寿命は、試料の冷却速度に強く依存し、試料の冷却過程においてボイド表面に微小なクレイズが発生する場合には、絶縁寿命が著しく低下することを明らかにした。さらに、絶縁劣化の進行と部分放電特性との関係について検討を行い、試料の絶縁破壊直前には、部分破壊現象に伴う部分放電電荷量と発生頻度の急激な増加が発生することを明らかにし、部分破壊から絶縁破壊に至る機構について、部分放電発生時に固体絶縁物に加わる電界の変化を数値解析することにより解明した。

第6章は総括であり、本研究の成果をまとめるとともに、今後の研究課題について述べた。

## 論文調査の要旨

電力需要の増大、ならびに近年の電力分野における規制緩和と地球環境への関心は、電力システム構成機器のコンパクト化、高機能化、高効率化、ならびに環境調和への対応の推進を要求している。これらの課題を解決する方法として高温超伝導の電力分野への応用が目ざされ、実規模機器の設計が行われるようになってきている。小規模の実験用高温超伝導機器を検討する段階では導体開発に力が注がれてきたが、大容量になると機器内の絶縁空間における磁界と電界を絶縁材料の持つ性能の限界に近づけることになり、極低温における電気絶縁が検討すべき重要な課題になってきた。特に、極低温における固体絶縁物の主要な劣化機構が絶縁系における部分放電になると推定されることから、実用化に近い超伝導電力ケーブルの絶縁に関連して、極低温におけるトリ現象、バッドギャップにおける部分放電などの検討がなされてきた。しかし、超伝導変圧器、超伝導発電機などの各種超伝導巻線を想定した複合絶縁系、特に放電の弱点部であるボイドを含む絶縁系における部分放電の体系的な研究はほとんどなされていない。著者は、極低温下におけるボイド中の部分放電の詳細な研究に有利な人工ボイドと部分放電観測・測定系を開発し、ボイド放電の

開始から複合絶縁系の完全破壊に至る過程を詳細に調べ、多く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、極低温状態で密閉状態を保持しつつボイド中の放電発光を観測でき、かつ放電劣化の加速試験が可能なボイド試料を開発するとともに、部分放電に伴う電荷、電流、発光および部分放電発生時の電圧位相を計測できるシステムを構築している。

第二に、部分放電開始電圧が極低温領域において低下するとともに大きなバラツキを示すことを実験で見だし、開始電圧の低下はボイドの冷却によってボイド中の酸素ガスが液化したことによること、大きなバラツキは極低温におけるボイド内の初期電子不足に基づく放電統計遅れの増大によることを明らかにしている。また、これらを基に超伝導機器の部分放電による絶縁劣化は、常伝導機器におけるより低い電界から始まる可能性があることを指摘している。

第三に、極低温における部分放電機構の経時変化と放電基礎特性を明らかにしている。まず、放電パルスの観測から常温においてはストリーマ型の部分放電になりやすいが、極低温では電圧印加の初期においてはストリーマ型で、数分後にはタウンゼント型放電が支配的になり、約50分後にはパルスを伴わない群小化部分放電に移行することを見だし、このような放電機構の変化は液化酸素の部分放電による気化と固体絶縁物表面の劣化によっていることを示している。次に、低温における部分放電電荷量対発生位相特性が常温におけるものと異なることを見だし、低温におけるボイド検出基準の指針を与えている。

第四に、極低温下の部分放電による固体絶縁物の劣化機構と特性を解明している。まず、固定絶縁系の冷却速度と絶縁寿命の測定結果から、冷却速度をおおよそ5 K/minより速くすると絶縁物表面に微細なクレイズが形成され、この部位に部分放電が集中して劣化が促進され、絶縁寿命が著しく短縮されることを見だししている。つぎに、劣化過程における部分放電強度の経時変化とボイド表面状態の観察、および複合絶縁系の電界計算結果から、最初は高電界電極側のボイド表面におけるクレイズに部分放電が集中してこの部分の絶縁層が破壊され、続いて破壊層とボイドを貫通する部分放電が発生し、最後に低電界電極側の絶縁層に高電界ストレスが発生して完全破壊に至ることを明らかにしている。これらの結果より、超伝導機器の冷却速度は固体絶縁系の寿命と密接に関係しており、絶縁系のあらゆる場所において冷却速度が5 K/min程度以下になるようにすべきであることを指摘している。

以上要するに、ボイドを含む固体絶縁系の液体窒素温度における部分放電の開始と経時変化、部分放電による固体絶縁物の劣化の機構と特性を解明し、部分放電を考慮した超伝導機器の絶縁設計と電気絶縁から見た超伝導機器の冷

却速度に関する指針を与えている。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) 足立和郎(鳥取県)  
 学位記番号 シ情博甲第110号(工学)  
 学位授与の日付 平成12年3月27日  
 学位論文題名 移行形アークプラズマを用いた雑固体廃棄物の溶融処理に関する基礎研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 原 雅 則  
 (副査) " " 岡田 龍 雄  
 " " " 渡辺 征 夫

### 論文内容の要旨

加熱対象が一方の電極になる移行形アークプラズマは、金属の製造、廃棄物処理、材料製造における高効率の高温加熱源として利用されている。特に原子力発電所の運転に伴い発生する低レベル放射性雑固体廃棄物や、原子燃料サイクルにおいて発生する金属廃棄物は、溶融による減容と性状安定化が望まれており、移行形アークプラズマを用いた加熱・溶融処理技術の研究開発が進められている。本研究は、移行形アークプラズマ加熱による原子力バックエンド廃棄物の溶融処理や新しい材料製造という、現代の電気事業においてニーズの高い課題に寄与することを目的に、筆者が行った研究成果を取りまとめたものである。論文の構成は7章からなり、その主要な内容は以下の通りである。

第1章では、アークプラズマ加熱技術の特長とその利用法をまとめ、移行形アークプラズマ加熱技術の原子力バックエンド廃棄物および材料合成への適用に関連する研究課題を抽出し、本研究で取り上げた課題の位置付けと意義をまとめた。

第2章では、微粒子が混入した移行形アークプラズマの電気特性や流速の計測、および混入微粒子の挙動観測手法として、石英管型器壁安定化装置と、干渉フィルターを装着した高速度CCDカメラを組み合わせた「安定化アークプラズマ流観測システム」の開発結果を述べ、アークプラズマ内に注入された廃棄物微粒子のプラズマ内滞留時間と蒸発挙動が測定できることを明らかにした。また、本技術を応用し、アークプラズマの流速測定用トレーサーとして、微量な水素などの気体を注入し、その移動速度から流速を得ることに成功し、気体トレーサーの実現可能性を明らかにした。

第3章では、雑固体廃棄物中の含有量が多く、また製鉄プロセスにおいても移行形アークプラズマ加熱が用いられる鉄に着目し、鉄が安定化アルゴンアーク中に蒸気として混入した場合のアーク電界・アーク電流特性を数値計算に

より求めた結果を示した。更に「安定化アークプラズマ流観測システム」を用いて、鉄粉混入アークの電界・電流特性を実測し、計算の妥当性を明らかにした。この結果、微量でも鉄蒸気が混入した場合には、アルゴンアークの電圧は大きく低下することと、その機構を明らかにした。

第4章では、「安定化アークプラズマ流観測システム」を用い、器壁安定化アルゴンアーク中に、不燃物粒子が注入されたときのアーク電圧の変化と、混入粒子の蒸発挙動を調べた。この結果、注入時に電圧上昇が観測され、また不燃物粒子は、注入の直後にアークプラズマの導電性を低下させていることを示した。このため、不燃物粒子の注入によるアーク電圧上昇の原因は、短ギャップにおいては粒子の温度上昇と相変化によるアークプラズマからの吸熱にあることを明らかにした。

第5章では、実用の廃棄物処理用プラズマ溶融炉に近い構造を持つ、小型の実験用プラズマ溶融炉を用い、代表的な不燃性廃棄物や可燃性廃棄物を炉中に投入したときのアーク電圧の変化を調べ、いずれの場合もアーク電圧が一時的に上昇することを確認した。この結果、不燃性廃棄物よりも可燃性廃棄物の方がアーク電圧に与える影響が大きいこと、また可燃性廃棄物の中でもゴムなど、熱分解速度が速い廃棄物が、木などの熱分解速度が遅い廃棄物よりもアーク電圧を上昇させやすいことを明らかにした。更にビデオカメラによる熱分解生成物の炉内存在時間の測定等から、熱分解生成物のプラズマ内への侵入による電圧上昇機構を提案した。プラズマ溶融炉への空気中入量を増加し、熱分解生成物の濃度を低下させたときに投入時の電圧上昇が抑制されたことから、この提案が有効であることを述べた。

第6章では、実験用プラズマ溶融炉を用い、将来、原子力発電所の燃料棒の再処理工程において発生する、ハル・エンドピースと呼ばれるジルカロイを主体とした高融点金属材料を模擬した未使用ジルカロイ廃材の溶融処理を実証した結果を述べた。この結果、移行形アークプラズマを用いてジルカロイ廃材を、溶融・固化することが可能であることを明らかにし、更にジルカロイの融点を降下させるための添加物の最適添加量、加熱雰囲気に対する混入空気許容量などの運転条件の指針を示した。また、移行形アークプラズマを用いた場合の最適な溶融・固化手順として、少量の廃棄物を逐次溶融し、積層上に固化体を作製していく手法(逐次溶融)が効率的であることを明らかにした。

第7章は総括であり、本研究で得られた成果をまとめるとともに、工学的応用について論じている。なお、本研究の成果は(財)電力中央研究所において、低レベル放射性雑固体廃棄物およびTRU(超ウラン元素)核種を含む放射性廃棄物のプラズマ溶融処理に関する試験研究に応用されている。

## 論文調査の要旨

近年、都市ゴミ焼却灰ならびに原子力発電所の運転に伴って発生する低レベル放射性廃棄物や金属廃棄物などの溶融固化が、廃棄物の体積縮小による処分場の有効利用と廃棄物の性状安定化による有害成分の拡散防止の観点から注目されている。ところが、これらの廃棄物は融点が高いため、燃焼ガスなどの化学反応を利用した加熱では、溶融が難しいばかりでなく、副次的な環境汚染ガスを多量に排出する恐れもある。アーク放電は、電気的に電子を加速して周囲の原子を加熱するので高温を得やすく、また雰囲気ガスの制御も容易であるため、これまでアーク溶接やプラズマトーチによる金属加工、アーク炉による金属の溶解・精練などに利用されてきた。特に、1980年以降、電気エネルギーの有効利用と環境保全を同時に追求する観点から、先進諸国の電力関連研究機関でアークプラズマの大容量加熱源としての利用を目指した研究が、積極的に推進されている。

著者は、融点の高い有害雑固体廃棄物の溶融固化にアーク放電を利用する目的で、加熱対象を一方の電極とする移行形アークプラズマの特性を、溶融固化条件を模擬できる器壁安定化アークプラズマ発生装置と試験用溶融炉を用いて調べている。また、原子力燃料サイクルの過程で発生する高融点のジルカロイの溶融固化へのアーク加熱の適用を試みて、多くの知見を得ている。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、実際のプラズマ溶融固化炉におけるアークプラズマの特性を支配するパラメータを抽出して定量化するために、外部からアーク形態を観測できると同時にアーク電圧、アーク内の温度、ガス流速、混入微粒子の運動速度を測定できる器壁安定化アークプラズマ発生装置を開発している。

第二に、雑固体廃棄物炉において生じる鉄蒸気が混入するアークプラズマの電圧-電流特性を実験で調べるとともに従来の理論を適用して検討し、鉄蒸気混入率・アーク電流・アルゴンガス圧の関係を解明している。さらに、雑固体廃棄物燃焼時に含まれるシリカボードおよびフライアッシュなどの代表的粉塵粒子がアークプラズマに混入したときの、粒子の蒸発過程におけるアークの電圧-電流特性を測定するとともにアークパラメータを熱・光学的側面から検討し、粒子の蒸発によって生成された金属蒸気によるアークプラズマの誘電率と熱伝導率の変化がアーク電圧変化の主要な原因であることを明らかにしている。また、これらを基に溶融炉の電源設計の指針を与えている。

第三に、プラズマトーチ、るつぼ、廃棄物供給装置、ガス置換装置、各種観測装置からなる100kW級試験用溶融炉を開発し、溶融炉に珪酸カルシウム、ゴム、金属などの廃棄物を投入したときのアーク電圧変化を雰囲気ガスを

変えて調べ、不純物投入時におけるアーク電圧上昇の原因が、投入によって生じるプラズマの冷却とプラズマ組成の変化による導電率の低下、アーク長の増大、浴湯の温度変化による導電率の低下にあることを明らかにしている。また、これらの結果より、プラズマ安定化の観点からプラズマ溶融炉の電源設計と運転条件の最適化を行うための指針を与えている。

第四に、原子力燃料集合体で使用される高融点のジルカロイ廃材の溶融固化に移行形アークプラズマ炉を適用し、加熱エネルギー、添加材の量、加熱雰囲気などを変えて溶融固化状況を分析し、ジルカロイ廃材の移行形アークプラズマによって溶融固化が可能であること、加熱エネルギーがある一定値以上になると溶融状態は変わらずダストの発生が急増すること、雰囲気としてアルゴンガスが好ましく、空気の混入は加熱効率を著しく低下させることを見いだしている。さらに、るつぼに廃材を供給する方法として、多量に一括供給するよりも少量ずつ逐次に供給することにより消費電力が約1/10、ダスト発生量が約1/100に低減できることなどの、移行形アークプラズマ炉の運転指針を与えている。

以上要するに、プラズマ溶融固化炉におけるアークプラズマの特性を解明するとともに、試験用溶融炉に移行形アークプラズマを適用して種々の原子力関連廃材の溶融固化に成功し、さらに、溶融炉の電源設計と運転の最適化の指針を与えている。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) 榎波龍雄(神奈川県)  
 学位記番号 シ情博甲第111号(工学)  
 学位授与の日付 平成12年3月27日  
 学位論文題名 リソグラフィ用狭帯域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 岡田龍雄  
 (副査) // // 前田三男  
 // // // 黒木幸令

## 論文内容の要旨

光リソグラフィ用光源は微細なデザインルールを実現するための短波長化が進み、水銀ランプのg線、i線の時代を経てエキシマレーザの時代に突入した。既に0.3 $\mu\text{m}$ 以下のデザインルールを必要とする半導体量産工場には、KrFエキシマステップが大量に導入され累積台数で千台以上稼働している。また、次世代リソグラフィ技術(0.15 $\mu\text{m}$ )の最有力候補として、ArFエキシマリソグラフィの技術開発が進められている。さらに最近では0.1 $\mu\text{m}$ 以下の領域に対し

て、 $F_2$  レーザを使った光リソグラフィの可能性について検討が開始されている。

リソグラフィ用エキシマレーザは安定した発振性能と高い耐久性が要求される。発振性能で最も重要な特性は狭スペクトル化であり、これにより露光装置での結像性能が決定される。エキシマレーザの狭帯域発振技術は古くから色素レーザで行われていた手法を踏襲しており、用いる波長選択素子と構成により区別される。しかしながら、エキシマレーザは波長が短い分だけ使用可能な光学部品が限られ、狭帯域発振効率の低下、耐久性の低下が課題となる。

本研究は、リソグラフィ用エキシマレーザの開発のためエキシマレーザの狭帯域化メカニズム、高効率・高出力な狭帯域化手段や狭帯域化素子の長寿命化についての研究の成果をまとめたもので、以下の6章から構成される。その主要内容は以下のとおりである。

第1章は、序論で本研究の技術的背景とその目的と意義について述べる。

第2章では、エキシマレーザの狭帯域動作を解析した研究結果について述べる。エキシマレーザの発振スペクトルは、発振パルス幅内で変化することが知られている。この狭帯域化メカニズムを明らかにするため発振パルス幅とスペクトル幅の関係を求めることができる計算コード、および、発振パルス幅内のスペクトル変化を測定できる高時間分解能分光器を開発して、両者で得られる結果を比較検討し、エキシマレーザ装置固有の各種パラメータに対するスペクトルへの影響を定量的に明らかにした。

第3章では、1つの放電領域を用いたエキシマレーザ発振・増幅器構成を提案し、高出力化の可能性について示す。本方式は狭帯域化素子にエタロンと回折格子を併用し、狭帯域共振器に用いない利得領域を増幅器に利用する新しい概念の構成である。これにより、XeCl レーザでスペクトル幅 0.18pm、ビーム広がり角 0.6mrad、出力エネルギー 1.7 mJ を達成した結果を示す。また、さらなる高出力化の1手段としてエキシマレーザ発振・増幅器で得られた出力を、もう1つの放電領域に注入同期する方式を試み、最終的にスペクトル幅 0.28pm、ビーム広がり角 0.3mrad において最大出力エネルギー 70mJ を達成した結果を示す。

第4章では、自己増幅型共振器構成を提案し、狭帯域化素子の長寿命化と実際のリソグラフィへの適用結果について述べる。自己増幅型共振器は放電領域をプリズムにより分割し一方にエタロンを用いた狭帯域化発振器を構成し、一方を増幅器として利用する方式である。エタロンに入射するレーザ光をプリズムによって分割・拡大することで、エネルギー密度を低減し従来の1/10まで負荷を軽減し高出力化を行っている。本方式ではKrF レーザでスペクトル幅 1 pm を保ったまま、出力パワー 8 W で長時間安定に動作した結果を示す。また、得られた狭帯域化光を用いて実際の光リソグラフィを試み、0.25 $\mu$ m 以下の解像度を実現

したことを示す。

第5章では、半導体リソグラフィ用光源の特徴と、それ専用開発したKrF およびArF エキシマレーザについて述べる。リソグラフィ用エキシマレーザには発振性能のみならず安定性、耐久性も高い水準が要求される。開発した1kHzKrF エキシマレーザで5ピリオンパルスの発振期間中、スペクトル幅、出力エネルギーが安定していることを示す。また、繰り返し周波数を2kHzまで高めたKrF レーザの性能について示す。ArF エキシマレーザはKrF レーザより発振効率が低い等の課題があったが、KrF と同様に1kHzまで周波数を高めたレーザ装置の開発に成功した。開発したArF レーザで2ピリオンパルスの発振期間中のスペクトル性能、エネルギー性能の劣化特性を示し、半導体リソグラフィ用光源として十分な性能を持つレーザの開発に成功したことを示す。

第6章では、以上の研究を総括し、今後の展望について述べる。

## 論文調査の要旨

リソグラフィ技術は、半導体集積回路の微細な回路パターンをウエハ上に光学的に転写する技術であり、集積回路の微細化を牽引してきた半導体プロセスの基盤技術の一つである。近年、半導体集積回路のデザインルールの微細化にともなって、より高い解像度を得るためにリソグラフィ用光源の短波長化が重要な課題となっている。既にデザインルール 0.3 $\mu$ m 以下を必要とする半導体量産工場には、波長 365nm の水銀ランプに代わって、発振波長 249nm のKrF エキシマレーザを用いたリソグラフィ装置が導入されつつある。また、次世代リソグラフィの最有力光源として、発振波長 193nm のArF エキシマレーザが期待されている。リソグラフィ光源用エキシマレーザには安定した発振性能と高い耐久性が要求されるが、発振性能の中で最も重要な特性は発振スペクトル幅の狭帯域化であり、これがリソグラフィ装置の結像性能に大きな影響を与える。従来は、長時間安定に狭帯域動作を維持することが困難であったため、エキシマレーザを用いたリソグラフィの実用化が阻まれていた。著者は、エキシマレーザの狭帯域化のメカニズムを解明するとともに、高効率で高出力化に適した狭帯域化法を考案し、狭帯域化素子の長寿命化を計って実用的なリソグラフィ用狭帯域エキシマレーザを開発している。本論文は、それらの研究成果をまとめたもので、次の諸点で評価できる。

第一に、エキシマレーザの狭帯域化メカニズムを解析するため、発振パルス幅とスペクトル幅の関係を求めることができるシミュレーションコードと、発振パルス幅内のスペクトル幅の変化を測定できる高時間分解能分光器を開発して、エキシマレーザ装置の各種パラメータがスペクトル幅へ与える影響を定量的に明らかにしている。

第二に、一つの放電領域を共有するエキシマレーザー発振・増幅器構成を新たに提案し、XeCl エキシマレーザーでスペクトル幅 0.28pm, ビーム広がり角 0.3mrad, 出力エネルギー 70mJ を達成して新構成法の有効性を示した。

第三に、放電領域をプリズムにより二つに分割し、一方はエタロンを用いた狭帯域発振器とし、他方を増幅器として利用する自己増幅型共振器構成を新たに提案し、狭帯域化素子の長寿命化を計っている。本方式を採用した KrF エキシマレーザーでスペクトル幅 1pm を保ったまま、出力パワー 8W の長時間安定動作に成功し、得られた狭帯域光を用いて実際にリソグラフィを試み、0.25 $\mu$ m 以下の解像度を実現してその有効性を示している。

第四に、繰り返し周波数 2kHz の狭帯域 KrF エキシマレーザーを開発し1週間にわたる連続運転期間中、スペクトル幅揺らぎ 0.6pm と出力エネルギー揺らぎ 6% を達成している。さらに、繰り返し周波数 1kHz の ArF エキシマレーザーを開発し、 $2 \times 10^9$  回の発振期間中、スペクトル幅揺らぎ 0.8 pm 以下を達成している。この結果、半導体リソグラフィ用光源として十分な性能を持つエキシマレーザーの開発に成功している。

以上要約すると、本論文は、半導体リソグラフィ用の狭帯域エキシマレーザーの開発において、狭帯域化のメカニズムを理論的、実験的に解明し、リソグラフィ用光源として十分な性能を持つ狭帯域エキシマレーザーの開発に成功したもので、レーザー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) 梶 木 善 裕 (神奈川県)  
 学位記番号 シ情 博甲第 112 号 (工学)  
 学位授与の日付 平成 12 年 3 月 27 日  
 学位論文題名 超多眼領域による自由で自然な立体動  
 画表示に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 前 田 三 男  
 (副 査)        "        "        松 永 勝 也  
               "        "        岡 田 龍 雄

## 論文内容の要旨

現在、博覧会やテーマパークなどの大きなイベント会場では、必ずと言って良いほど立体映像を用いた展示施設があり、美しい立体映像を楽しむことができる。目前に浮かぶ立体映像に手を出して触りたくなったり、前方から飛来する物体の映像に思わず目を覆って伏せてしまうほど、立体映像は従来の二次元映像とは全く異なる視覚的なインパクトを我々に与える。しかし、これら立体映像システムには、立体メガネの装着の煩わしさや、立体映像に対する様々な違和感や、それらに伴う疲労などの問題があり、こ

れらのシステムがそのまま家庭や職場に普及するとは到底考え難いほどに未熟な技術である。

本論文は、将来の立体映像システムに要求される自由で自然な立体動画の表示技術として、超多眼領域という新たな立体表示手法の概念と、その概念を実現する数種の立体表示技術を提案し、試作によりその有効性を実証したものである。さらに超多眼領域の立体像に対する人間の立体視覚についての検討も行い、これらを通して超多眼領域による自由で自然な立体表示について総合的に論じた。本論文は6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章では、人間の立体視覚について概説し、本研究の背景である将来の立体映像システムに対する従来の立体表示技術の課題と、本論文の意義と概要を述べた。

第2章では、従来の立体表示技術の原理と課題を分析し、その結果を基に「超多眼領域による立体表示」という新たな表示手法の提案を行った。従来の立体表示の多くが二眼式ステレオグラムの原理に基づいているのに対し、「超多眼領域」とはステレオグラムにおいて視差の標本間隔が観察者の眼球の瞳孔径よりも狭い場合をいう。超多眼領域による表示手法は従来の方式に比べ視聴者にとって自由で生理的に自然な立体表示ができ、動画化すれば将来の立体テレビジョンに求められる理想に近い条件を満たす可能性がある。超多眼領域による立体テレビジョンの構想は、来る21世紀の情報通信社会に向けて現実的で有望な研究テーマであり、その特徴を明らかにした。

第3章では、超多眼領域による立体表示手法を実現する技術として、「集束化光源列による表示技術」を提案し、試作を通してその有効性を実証した。「集束化光源列」とは多数の光源の光束を1点に集めたもので、これを用いると非常に狭い間隔で多数の視点画像を表示することが可能になる。この技術により1台のラックに全ての機器が収納されたコンパクトなシステムで、0.5度刻みで45種類の視点画像から構成される約9インチの立体画像の表示を実現した。さらに従来のテレビジョン45チャンネル分に相当する映像信号を入力してNTSC規格のテレビジョンと同じ毎秒30フレームにて更新される立体動画像を表示し、自由で自然な立体テレビジョンを実現する可能性を示した。

第4章では、超多眼領域を実現する上で、将来性が期待できる立体表示技術として、二次元変調器と一次元走査による立体表示技術を提案した。二次元変調器と一次元走査による立体表示技術とは、液晶パネルのような二次元の空間光変調器で水平・垂直・水平視差の3つのパラメーターのうちの2種類を表現し、残る1つのパラメーターを一次元走査により時分割で表現する技術であり、この技術を用いるとレーザー光による照明や機械的な二次元の高速走査が不要になる。この技術を用いて0.15度刻みで256種類の視点画像から構成される超多眼領域の立体動画像を表示可

能な立体ディスプレイなどを初めて実現した。

第5章では、超多眼領域の立体像に対して人間の立体視覚がどのように反応するかについて計算機シミュレーションや実験により検討を行い、自然な立体映像となるための条件を検討した。超多眼領域の立体像の自然さを表すパラメーターとして、「単眼視差数」というパラメーターを定義した。ここで、単眼視差数とは超多眼領域の立体表示において、単眼の瞳孔に入射する視点画像の数で、単眼視差数が2.5程度で調節刺激や運動視差をほぼ自然に再現できることを明らかにした。

第6章では、以上の研究を総括し、今後の展望について示した。

## 論文調査の要旨

自然のままの立体映像が再現できる立体テレビジョンの実用化は、マルチメディアが追求する究極の夢の一つであろう。従来開発されてきた立体画像表示法の大部分は、基本的には両眼の視差を利用した2眼式ステレオグラムの原理に基づくものである。また、多くは立体メガネの装着が必要で、眼球の回転角やピント合わせの位置などに関し、生理的な不自然さがあり、長時間の観賞には耐えられないものである。それに対して、レーザー光のコヒーレンスを最大限に利用したホログラフィー技術を用いれば、実空間と同一の波面が再生されるため、非常に自然な立体視が可能であるが、情報処理量が極めて膨大なものとなり、現在の技術レベルでは高速の動画処理を行うのは困難である。

本研究では、メガネ等を装着することなく、多人数が自然な状態で同時に見ることのできる「超多眼領域」による立体表示法を提案し、高速の動画表示装置を試作して、その原理に基づく立体テレビジョンの実現可能性を実証したものである。「超多眼領域」とは、著者が新たに考案した概念で、ステレオグラムにおいて視差の標本間隔が観察者の眼球の瞳孔径よりも十分狭い場合を意味し、それによって複数の角度情報を持った画像が網膜上に同時に到達する。

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) これまでの立体画像表示法とは異なる「超多眼領域」による立体画像表示法を提案し、これを用いると従来の方式に比べ生理的に自然な立体像が得られることを示した。
- (2) 上述の新しい画像表示法を実現するには、入射角が少しずつ異なる多数の光束を一点に集めた「集束化光源列」が必要であるが、この光源を半導体レーザーアレイにより実現し、0.5度刻みで45種類の視差像を持つサイズ約9インチ、毎秒30フレームの立体動画表示ができるディスプレイ装置を、大型計算機を使うことなく実現させた。
- (3) さらに、上述の「集束化光源列」より実用化が容易な方式として、2次元空間変調器と1次元走査を組合わせて、水平・垂直・水平視差の3パラメータを制御する新たな方

法を提案し、高速応答の液晶型空間変調器を用いて動画表示可能なディスプレイを試作することに成功した。

(4) 「超多眼領域」の立体像に対する人間の目の反応を、実験と計算機シミュレーションにより検討し、立体像の自然さを表わすパラメーターとして、単眼の瞳孔に入射する視差像の数(単眼視差数)を導入し、単眼視差数が2.5程度でほぼ自然な立体像が再現できることを明らかにした。

以上要するに本研究は、大勢の人が立体メガネの装着なしに、生理的に自然な立体視が可能な新しい立体画像表示方式を提案し、毎秒30フレームの立体動画像を表示できるディスプレイ装置を試作することに成功したもので、電子工学上価値ある業績である。よって博士(工学)の学位に値するものと認める。

氏名(本籍) 美濃谷 直志(大分県)  
 学位記番号 シ情 博甲第113号(工学)  
 学位授与の日付 平成12年3月27日  
 学位論文題名 高温超伝導 SQUID 及び極微弱磁界測定システムの開発

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 黒木 幸令  
 (副査)        "        "        吉田 啓二  
               "        "        船木 和夫  
               "        "        助教授 円 福 敬二

## 論文内容の要旨

超伝導量子干渉素子(Superconducting Quantum Interference Device; SQUID)は超高感度な磁気センサとして知られ、生体機能計測や材料評価等への応用が期待されている。これまで液体ヘリウム温度( $T=4.2\text{K}$ )で動作する金属系のSQUIDセンサが開発されており、同センサの高い磁界感度が実証されている。しかしながら、冷却材である液体ヘリウムの取り扱いの困難さやコストの高さが重い負担となり同センサの応用分野は限られていた。従って、液体窒素を冷却材として使用できる高温超伝導SQUIDセンサを開発すれば、センサ冷却に関する負担を大幅に軽減して同センサの応用範囲を拡大することができる。また、液体窒素を用いる場合には冷却系の断熱層を薄くして室温の試料にセンサを接近させることができるため、室温の試料から発生する信号磁界を高感度に測定することが可能となる。このため高温超伝導SQUIDの開発が行われてきたが、高性能センサを実現する上で必要となるセンサの最適設計と再現性の良い製作プロセスが確立されておらず、その高性能化は容易ではなかった。

本研究の目的は高温超伝導SQUID磁気センサの設計指針を明らかにして高性能化を達成するとともに、同センサの応用として磁気微粒子をマーカーとして用いた高感度な

免疫診断システムを開発して、その有効性を実証することである。本論文はこの目的を達成するために行った研究についてまとめており、5章で構成されている。

第1章では、次章以降の議論に必要な SQUID の基礎特性、センサの構成法、及び同センサの駆動回路について述べている。

第2章では、高温超伝導 SQUID センサを高性能化するために必要な設計指針を明確にしている。はじめに、センサ性能に及ぼす熱雑音の影響を数値シミュレーションにより定量的に調べ、センサ高性能化のために要求されるジョセフソン接合の接合特性（臨界電流、抵抗）とインダクタンスの最適値を明らかにした。次に、SrTiO<sub>3</sub> 基板の高い誘電率のため、交流ジョセフソン効果によって SQUID のインダクタ内に共振現象が生じることを示し、共振現象が SQUID の性能に与える影響を明らかにした。この結果からインダクタの長さが重要であることを示すとともに、その形状の最適化を行った。これらの設計の最適化により液体窒素温度において高性能 SQUID センサの開発が可能であることを示した。

第3章では、前章で明らかにした設計を基に高性能 SQUID を再現性良く製作するための方法について論じている。はじめに、高性能センサ開発のために要求される接合特性を満たすバイクリスタル型ジョセフソン接合（バイクリスタル接合）を開発した。すなわち、バイクリスタル基板の結晶方位の傾き角（傾角）とバイクリスタル接合の液体窒素における接合特性の関係を実験によって明らかにし、傾角 30° の接合が高性能センサの実現に適した特性を持つことを示した。また、バイクリスタル接合の電流輸送機構から接合特性の傾角依存性を考察し、理論的にも傾角 30° の接合が適していることを示した。この接合の有効性を確かめるために傾角の異なる接合を用いて製作した SQUID センサの性能比較を行い、傾角 30° の接合を用いた場合にセンサの性能が最も高いことを実証した。傾角 30° の接合を使用した SQUID センサの性能の再現性・安定性は高く、またセンサ性能の測定結果と設計値は良く一致していることにより、本研究で示した設計指針の妥当性と傾角 30° の接合の有効性を示すことができた。

第4章では、同センサを用いた微弱磁界測定装置の免疫診断への応用について論じている。本応用では免疫反応を磁氣的に検出するためナノメートルサイズの磁気微粒子を測定用のマーカーとして用いている。はじめに、磁気微粒子からの微弱磁界を測定するセンサシステムを開発した。すなわち、SQUID と 1 回巻き磁界検出コイルを直接結合した、いわゆる直接結合型 SQUID センサの設計を行い、本目的のためにシステムを最適化した。また、検出コイルを構成する超伝導薄膜にトラップされた磁束の影響によりセンサの低周波雑音が増加することを示し、磁束トラップの防止に有効な検出コイルの形状を実験により明らかにし

た。次に、同センサシステムを免疫診断に応用し実験を行った結果、本装置を用いることで高感度な免疫反応の検出が可能であることを示した。最後に現状のシステムの問題点を明らかにし、この解決方法を提案した。

第5章では、本研究の成果をまとめ、総括を行った。

## 論文調査の要旨

超伝導状態で出現する磁束の量子化現象を利用した SQUID (superconducting quantum interference device) は高感度な磁気センサとして知られており、液体ヘリウム温度で動作する同センサシステムは生体・生理機能検査や材料評価等に用いられている。高温超伝導体を用いれば液体窒素温度での SQUID センサの使用が可能となり、これまで同センサを応用する際の障害となっていたセンサ冷却の問題を大幅に緩和できる。このため高温超伝導 SQUID センサの開発研究がこれまで行われてきたが、同センサの性能を阻害する要因が十分には解明されておらず、生体・生理機能の検査に使用できるほどの極微弱磁界測定システムは実現されていなかった。

本研究は、高温超伝導 SQUID センサの高性能化に必要な課題を明らかにし、その解決に有効なセンサの最適設計法と作製手法を提案し高性能センサを実現するとともに、同センサの応用として、磁気微粒子を磁気マーカーとして用いた高感度な免疫反応測定システムを開発したものである。本研究により得られた成果は以下の点で評価できる。

- (1) 著者は、これまで充分には解明されていなかった SQUID 磁気センサの性能に及ぼす諸要因の影響を定量的に調べ、センサを高性能化するための設計指針を初めて明らかにしている。すなわち、数値シミュレーションを用いてセンサ性能に及ぼす熱雑音や高誘電率基板の影響を示すとともに、センサ性能の SQUID パラメータ（臨界電流、抵抗及びインダクタンス）依存性を明らかにし、パラメータの最適化法を示している。
- (2) センサの高性能化に要求される高品質なジョセフソン接合の作製に初めて成功している。本研究ではバイクリスタル基板上に作製した接合を用いており、この接合の特性と基板の結晶方位のずれ角（傾角）との関係を実験により定量的に明らかにしている。その結果、傾角が 30 度の基板上に作製した接合がセンサの高性能化に有効であることを初めて示している。また、同接合における電流輸送の機構を検討し、傾角 30 度が理論的にも妥当であることを示している。
- (3) 液体窒素温度において、傾角 30 度の接合を用いて作製した SQUID センサの性能評価を行い、同センサが世界最高レベルの性能を持つことを示している。センサ性能の測定結果は設計値とほぼ一致しており、本研究で開発した設計法の妥当性と傾角 30 度接合使用の有効性が実証された。またセンサ性能の再現性・安定性も高く、本

研究により高性能センサの開発が可能となった。

(4) SQUID センサを地磁気等の環境下で使用する場合に重要となる、いわゆる磁束トラップの問題を解決している。地磁気等によりセンサの検出コイルに磁束がトラップされ、この磁束によりセンサの低周波雑音が増加していることを示すとともに、磁束トラップの防止に有効な検出コイルを開発している。すなわち、多数の並列ループにより検出コイルを構成し、それぞれのループにいわゆるフラックス・ダム構造を持たせることにより、センサの低周波雑音を従来形に比べて一桁以上改善することに成功している。

(5) 最後に、SQUID センサを用いた極微弱磁界測定システムを開発し、ナノメータサイズの磁気微粒子からの磁界測定に應用している。この磁気微粒子を生理学等で行われている免疫反応検出のための磁気マーカーとして用い、従来の光学的な蛍光マーカー法に比べて一桁以上高感度に免疫反応を検出可能であることを示している。

以上要するに、本研究は、高温超伝導 SQUID 磁気センサの性能を阻害してきた要因を明らかにし、これらの問題を解決するために必要なセンサの最適設計法と作製手法を開発して、高性能センサを実現するとともに、同センサの応用として磁気微粒子をマーカーとする高感度免疫反応検出システムを開発したものであり、高温超伝導 SQUID センサを用いた極微弱磁界測定システムの高性能化について重要な知見を得たものとして電子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) 生田 光輝(福岡県)  
 学位記番号 シ情 博甲第114号(工学)  
 学位授与の日付 平成12年3月27日  
 学位論文題名 差分吸収ライダーによる大気中の漏洩メタン検知システムに関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 前田 三男  
 (副査) // // 都 甲 潔  
 // // // 岡 田 龍 雄

## 論文内容の要旨

メタンガス(CH<sub>4</sub>)は都市ガスの主成分であり、その漏洩検知は防災上極めて重要である。一般家庭においてもガス漏れ検知器は広く普及しているが、これらは比較的狭い屋内という局所的な検知を目的としている。一方工場やガスパイプラインにおいては、定常的・広範囲な漏洩検知が必要である。こういったガス漏れ検知には通常化学的なセンサーが用いられているが、広大な敷地を持つ施設においてはセンサーが多数必要になり、また施設が屋外におよんでいる場合にはセンサーの維持管理の問題も生じるであろう。

地震などの被災地においても広範囲・迅速な漏洩検知が要求され、従来の検知方式では対応が困難である。

ライダー(Light Detection and Ranging: Lidar)は大気中に送信したレーザーパルス光の後方散乱を受信して散乱物質の分布を観測する装置で、大気中の特定の分子の吸収線に一致した波長の光を送信した場合、その分子の空間分布を地上の一点よりリモートセンシングできる。この方式のライダーは差分吸収ライダー(Differential Absorption Lidar: DIAL)と呼ばれ、オゾン層の観測など大気環境のモニタリングに役立っている。しかしながら、大気中のメタンをDIALによって測定するには、2.32 $\mu$ mや3.38 $\mu$ m付近の長波長の光を使わねばならず、光源および検知器の性能が不十分であるため実用には至っていない。

本論文では、これまでに多くの研究が行われてきた3.38 $\mu$ m帯より吸収は弱いものの、近年良好な可変波長レーザー光源と高速・高効率・低ノイズな検知器が得られるようになった1.67 $\mu$ m帯でのDIALによる大気中メタンの計測について研究し、システムの開発を行った。開発したメタン検知用DIALは漏洩メタンの濃度分布を数百mの距離域において、高い距離分解能で観測できる点が特徴である。

第1章は序論で、研究の背景・目的について述べた。

第2章では、波長1.67 $\mu$ mでの短距離・高分解能メタン計測用DIALの特性解析について述べる。ここではまずライダー方程式に基づいたシミュレーションコードを開発し、複数の吸収線の重なりや光源の帯域幅が吸収断面積の計算に与える影響等を考察した。さらにレイトレースを用いた新しい解析方法を提案した。また、吸収断面積の計算結果から最適吸収波長の選定を行い、波長や望遠鏡の受光径が異なるいくつかのライダーシステムについて比較的近距离域の特性解析の結果を比較検討した。以上の解析から漏洩メタン検知用DIALの送信系・受信系システムに要求される仕様を明らかにした。解析の結果、この方式で距離1800m以内に存在する濃度330ppmのメタンを距離分解能30m、誤差50%以内で計測できるライダーが比較的コンパクトな装置で実現できることが分かった。

第3章では、波長1.67 $\mu$ m付近で連続波長掃引が可能な2種類のレーザー光源の開発を行った。一方はパルスNd:YAGレーザー第2高調波励起Ti:Sapphireレーザーの波長を重水素ラマンシフターによって1.67 $\mu$ mにシフトして同調する光源、他方はパルスNd:YAGレーザー第2高調波で励起する光パラメトリック発振・増幅システムである。後者はシグナル波長を半導体レーザーでシーディングし、アイドラー側で1.67 $\mu$ m光を発生させるもので、小型のNd:YAGレーザーが使用できるため可搬型のコンパクトな光源が構成できる点に特徴がある。これらの光源はいずれも第2章の解析から要求される出力エネルギー、スペクトル幅、ビーム発散角等の仕様を満たし得ることを示した。

第4章では、受信系の詳細設計を行い、150m以下の近距離域での受信効率を改善する方法を提案した。第2章において開発したレイトレースによる新しいライダーの解析法を用いて、本章では送信光のビーム発散角や光軸、赤外線検知器の径といった要素が受信効率に与える影響を評価した。また、補正レンズを用いた能動的な受信効率の改善方法を新しく提案し、理論解析によってその効果を確認した。補正レンズの効果については実験による検証もを行い、計算結果との良好な一致が得られることを示した。さらに、これらの検討を通じて目的とする漏洩検知用 DIAL システムに適した受信系の条件を述べる。

第5章では、実際に試作開発した漏洩検知用 DIAL システムと、そのフィールドテストの結果を述べる。レーザー光源には Ti:Sapphire レーザーとラマンシフターを組み合わせる方式を用いた。ここではまず作製したシステムの送信系・受信系の特性を評価し、検知感度に大きく影響するノイズの低減方式について述べた。また、130m付近に設置した高濃度メタンガスターゲットを用いて屋外実験を行い、距離分解能 30m で 6000ppm-m の感度が得られることを確認した。現状では検知器の電気ノイズが検知感度を制限しているが、この点が改善されれば第2章で予定した性能が達成できることを理論計算との対応から確認した。

第6章は本研究の成果をまとめた結論である。

## 論文調査の要旨

レーザーを光源とするレーザーはライダーと名付けられ、すでに長い研究の歴史を持っている。ライダーは大気中の微粒子に高い検知感度を示すことから、気象や環境計測の分野で、従来のマイクロ波レーザーと相補的に使われている。特に差分吸収ライダー (DIAL: Differential Absorption Lidar) は、特定波長に同調されたレーザーパルスを送信して、大気中の微量分子の空間分布が地上の一点からリモートセンシングできることで、紫外及び可視域でオゾン、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>などの計測に利用されている。それに対して、赤外域には多くの分子の吸収線が存在するにもかかわらず、可変波長レーザーと受光器の性能が十分でないため、水蒸気の検知を除いてまだ実用的な DIAL は開発されていない。

大気中のメタン計測に関しては、従来から波長 3.38 $\mu$ m にある強い吸収帯を利用した DIAL が種々試みられてきた。それに対し本論文では、最近高出力のレーザーと高速応答の受光器が開発されつつある波長 1.67 $\mu$ m の吸収帯に着目し、大気中の漏洩メタンを検知する DIAL システムを開発している。この波長域でのメタン吸収は弱いので、開発されたシステムは自然大気中に約 1.5ppm 存在するメタンの検知には適さないが、高い距離分解能を持っているために、事故や災害時などに放出されるメタンを、数百 m の範囲にわたってモニタリングできる点に特長を持っている。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) 1.67 $\mu$ m 帯のメタン計測用 DIAL システムの特性を解析するシミュレーションコードを、レーザーレーザー方程式に基づき作成し、スペクトル線の重なり等を考慮して最適な送信波長を算出した。その波長で出力 5mJ、スペクトル幅 0.5cm<sup>-1</sup> のレーザーを用いれば、口径 300mm の受光望遠鏡と InGaAs PIN フォトダイオードを使って、距離 1 km の範囲に存在する 300ppm 以上のメタンを距離分解能 30m、計測時間 1 分以内で検知可能なことを示した。

(2) 150m 以下の近距離域で起こる受信効率の低下を、光線追跡法による新しい解析コードを開発して解析し、受信望遠鏡の副鏡や検知器の受光面積、送信用レーザーのビーム発散角等の影響を評価した。また、効率改善のために補正レンズを導入することを提案し、その効果を解析と実験により確認した。

(3) 波長 1.67 $\mu$ m 付近で連続波長可変な新しいタイプのレーザーを、i) Ti:Sapphire レーザーと重水素ラマンシフターの組合せ、および ii) 半導体レーザーでシーディングする光パラメトリック発振・増幅システムの二つの方法により試作開発し、いずれも光源として十分な性能を持つことを示した。特に後者ではコンパクトなシステムが構築可能である。

(4) 上記 i) の光源を用いた DIAL システムを試作し、それを用いて 130m ほど離れたところに配置したメタンガスのターゲットによるフィールドテストを行い、所要の性能が得られることを確認し、ノイズ等の問題について解析結果との比較検討を行った。

以上要するに本研究は、1.67 $\mu$ m 帯でのメタン検出用差分吸収ライダーの特性解析と試作実験を行い、遠隔的な漏洩メタン検知システムとして有用なことを示したもので、電子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) 金 洪 杰 (中国)  
 学位記番号 シ情 博甲第 115 号 (工学)  
 学位授与の日付 平成 12 年 3 月 27 日  
 学位論文題名 プラズマ CVD 法による高品質 Cu 薄膜形成に関する基礎的研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 渡 辺 征 夫  
 (副 査) // // 黒 木 幸 令  
 // // // 宮 尾 正 信

## 論文内容の要旨

集積回路 (LSI) は現代社会のあらゆる分野において使用され、高度情報化社会の基盤を支えている。しかし、近年の LSI の高集積化に伴う配線断面積の減少は、配線抵抗増

加に起因した RC 信号伝搬遅延, ジュール損失の増大, 及び電流密度増加によるエレクトロマイグレーションに起因した断線故障などの深刻な問題をもたらす。これらの問題を解決するために, 配線容量を減らす低誘電率絶縁膜の採用とともに, 従来のアルミニウムとその合金に比べて, 低抵抗で高マイグレーション耐性である銅が配線材料として使用され始めている。配線材料としての銅の優れた特長を生かすには, 高純度の銅を大きな結晶粒径, 高い配向性, 下地である拡散防止膜への高い付着力を実現したまま微細ホールやトレンチに高速に隙間なく埋め込む技術が必要とされている。現時点で上述の全ての必要条件を満足する銅薄膜形成法はなく, この様な技術を緊急に確立することが切望されている。プラズマ CVD 法は, 気相反応と表面反応を独立に制御できる可能性があるため銅配線形成技術として有望視されているものの, その成膜技術が確立されていないのが現状である。

本論文では, プラズマ CVD 法による LSI 内配線技術の確立を目指して行った研究成果をまとめたもので, Cu 薄膜の高純度化に H 原子が極めて有効であることを示すとともに, この知見にもとづいて H 原子密度と Cu 含有ラジカル密度を独立に制御可能な H 原子源付プラズマ CVD 装置を開発し, この装置が高純度 Cu 薄膜を微細トレンチへの埋め込む際に特に有効であること実証したものである。本論文は 5 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 章では, Cu 配線導入の背景及び Cu 薄膜形成技術の現状と課題について述べた後, 本論文の意義と要約を述べた。

第 2 章では, 成膜材料として Cu(hfac)<sub>2</sub> を選択する理由と材料の安定供給法について述べた後, Cu 薄膜中不純物除去における H 原子の役割を明らかにするため, 低純度銅薄膜への H<sub>2</sub>, He 及び Ar プラズマ照射実験で得られた結果について述べた。H<sub>2</sub>, He 及び Ar プラズマ照射下での Cu 薄膜中の不純物量の経時変化を FT-IR 法によるその場測定を用いて調べ, 1) H 原子が Cu 薄膜中の不純物除去作用に寄与する主要な粒子種であること, 2) H 原子照射による膜中の不純物の除去には 70°C 以上の基板温度が必要であること, 3) H 原子が膜表面のみならず膜中の不純物除去にも有効であることを明らかにした。

第 3 章では, 第 2 章で明らかにした H 原子の Cu 膜中不純物除去効果に注目して, 通常プラズマ CVD 装置よりも基板表面への H 原子供給量を増加させることが可能な H 原子源付プラズマ CVD 装置の開発を行った。先ず, 分光測定により, H 原子源から主放電領域に H 原子が供給されていることを示した。次に, H 原子の供給量が Cu 薄膜の高純度化に効果がある量であることを, FT-IR 法による Cu 薄膜中の不純物量のその場測定により示した。さらに, この装置を用いて, 従来にない低 H<sub>2</sub>(67%) 希釈率でも高純

度(約 100%)の Cu 薄膜の形成可能なことを示した。加えて, H 原子照射が Cu 結晶粒径に与える影響についても指摘した。

第 4 章では, 第 3 章で開発した, H 原子密度と Cu 含有ラジカル密度を独立に制御可能な H 原子源付プラズマ CVD 装置を用いると, 一定基板温度のもとで, 成膜表面への H 原子入射束を高く保ったまま材料の解離度を減少させることで, Cu 含有ラジカルの表面反応確率を減少し, 高純度の銅を微細トレンチへの埋め込み特性を大幅に改善可能なことを示した。また, モンテ・カルロ法によりトレンチ内の成膜形状シミュレーションを行い, Cu 含有ラジカルの表面反応確率  $\beta$  を求めた。最後に, H 原子源付プラズマ CVD 装置を用いることにより, 幅 0.3  $\mu\text{m}$ , 深さ 0.9  $\mu\text{m}$  のトレンチに高純度 Cu 薄膜をほぼ完全に埋め込めることを実証した。

第 5 章では, 以上の研究を総括し, 今後の展望について示した。

## 論文調査の要旨

大規模集積回路 (LSI) はデザインルール 0.2  $\mu\text{m}$  程度にまで集積化が進み, その特性に金属配線が影響する段階に達している。LSI の高集積化に伴う配線断面積の減少と配線長の増加は, 配線断線や RC 信号遅延などの深刻な問題をもたらす。これらの問題を解決するために, 層間絶縁膜として低誘電率材料が模索されるとともに, 配線材料として, アルミニウムに比べて低抵抗でエレクトロマイグレーション耐性が高い銅 (Cu) が採用され始めている。しかし, この Cu の優れた性質を具現するには, 微細なトレンチやホールなどのパターンに, 高純度の Cu を均一に埋め込む技術が要求される。Cu 配線形成法として, 既に一部利用されている電気メッキ法を初め, 幾つかの方法が提案されているが, 今後の LSI 高集積化に対応できるまでには至っていない。これら形成法の中で, プラズマ CVD (Chemical Vapor Deposition) 法は, Cu 膜形成粒子種 (成膜前駆体) の気相生成反応と膜表面反応とが独立に制御できることから, 微細パターンへの良好な埋め込みが期待されるが, そのためのプラズマ生成技術が確立されていないのが現状である。

本研究は, Cu 配線形成のためのプラズマ CVD 法に注目し, 高純度 Cu 薄膜の形成に果たす水素原子の役割を明らかにするとともに, 実際に水素原子供給用プラズマ装置 (以下, 水素原子源) を付加したプラズマ CVD 装置を試作して, LSI 配線形成技術として要求される膜の高純度化と微細トレンチへの Cu 埋め込みについて多くの知見を得ている。本論文は, それらの成果をまとめたもので, 次の点で評価できる。

1) Cu 配線形成プラズマ CVD 法においては, 材料として通常金属錯体化合物が用いられるが, プラズマ CVD 装置への材料ガス供給が不安定となる問題を生じていた。

著者は、エタノールで溶解した金属錯体化合物 Cu(hfac)<sub>2</sub> (CuC<sub>12</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>F<sub>12</sub>; 分子量 477.67; hfac は hexafluoroacetylacetonato の略) を昇華する方式の新しい安定な材料ガス供給システムを開発している。

- 2) プラズマ CVD 法で Cu 膜を形成する際の水素原子の不純物除去効果を明らかにしている。すなわち、予めプラズマ CVD 法で形成した低い純度の Cu 薄膜に水素プラズマを照射する実験を行い、水素原子は膜中の Cu 以外の C, O, F などの全ての不純物を、基板温度 70°C 程度以上、膜厚 120nm 程度以下において効果的に除去することを明らかにしている。
- 3) 材料ガスを解離する主放電部と水素原子を発生する放電部とを分離した水素原子源付プラズマ CVD 装置を試作し、二つの放電部の供給電力によって水素原子と成膜前駆体の供給量を独立に制御できることを明らかにしている。
- 4) 開発した水素原子源付プラズマ CVD 装置の場合、純度 100% の Cu 膜が得られる水素ガス希釈率が、従来の単一放電方式の場合の 90% に比べて大幅に低い 67% となることを示し、水素原子と成膜前駆体の供給分離方式が、高速膜形成の視点から従来方式に比べて優れていることを指摘している。
- 5) プラズマ CVD 法における Cu 膜形成機構について検討するとともに、形成した膜の結晶配向と結晶粒径成長への水素原子照射の効果について評価している。フーリエ変換赤外吸収分光とオージェ分光測定により、プラズマ中で生成される成膜前駆体は主に Cu(hfac) であり、水素原子は膜形成時に高純度膜を形成する上で不可欠な Cu-O 結合を初め、Cu(hfac) 中の様々な結合を切断していることを明らかにするとともに、X 線回折と透過型電子顕微鏡観察により膜の結晶配向はランダムであるものの、水素原子照射により結晶粒径は膜厚程度まで増大することを示している。
- 6) 水素原子源付プラズマ CVD 装置を用いて、幅 0.3μm、深さ 0.9μm の微細トレンチへの Cu 均一埋め込みを実証するとともに、その埋め込み条件を明らかにするために、トレンチへの成膜形状について、実験結果と成膜前駆体の基板表面反応確率  $\beta$  をパラメータとしたモンテカルロシミュレーションの結果との比較を行っている。その結果、大きな水素原子入射束の材料ガス解離度を低くすることによって、トレンチ生み込みが改善され、 $\beta < 0.01$  の条件下で均一埋め込みが達成できることを示している。以上要するに本研究は、プラズマ CVD 法を用いた大規模集積回路用 Cu 配線形成技術の確立を目指して、高純度 Cu 薄膜形成における水素原子の役割を明らかにするとともに、水素原子源付プラズマ CVD 装置を試作して、高純度の Cu 薄膜を形成し、微細トレンチへの埋め込みを実証したもので、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) 永守知見(熊本県)  
 学位記番号 シ情博甲第116号(工学)  
 学位授与の日付 平成12年3月27日  
 学位論文題名 マルチチャネル味覚センサを用いたアミノ酸の味に関する研究

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

食品の味を計測することは、食品生産における品質管理、食品の開発などの分野において必要不可欠なことである。しかしながら、食品メーカーにおける食品の味の評価は、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いる。

アミノ酸はその種類により様々な味を呈する。タンパク質を構成するアミノ酸は 20 種類あり、物理的、化学的に多様な特徴を示す。この呈味性のあるアミノ酸を利用することは重要であり、種々の食品の味の形成や特徴付けに寄与している。またアミノ酸は単独で 5 基本味からなる混合味(複合味)を呈することが官能検査によって示されており、これまでアミノ酸の味の種類、強度について数多くの研究がなされている。そこで味を客観的に再現性よく測れる装置を用いてアミノ酸の味質、強度などを定量的に表すことができれば、食品製造ラインの自動化、食品の品質保証など、その影響力は計り知れないものがある。

本論文は、味覚センサを用いたアミノ酸の味の定量化、複合味の定量化、アミノ酸による抑制効果の定量化、さらにアミノ酸がペプチド結合してできるペプチドの味質を調べた研究をまとめたもので、以下に述べる 6 章より構成されている。

第 1 章では、まず生物における味受容について概観し、本研究の目的と方針について述べている。

第 2 章では、まず 5 基本味に属する、NaCl や HCl などさまざまな典型的味物質を測定した。5 基本味に対して、それぞれ特徴的な応答電位が得られ、味覚センサが味そのものに応答していることを示した。次に苦味を呈するアミノ酸であるトリプトファン、フェニルアラニン、イソロイシンの応答パターンと 5 基本味を比較した。その結果、苦味物質キニーネ塩酸塩(以下、キニーネと略す)と極めて高い相関を示すことが、相関係数により確かめられた。さらに、トリプトファンの応答電位に主成分分析及び重回帰分析を施し、キニーネの等価的苦味強度を求める方法を提案した。その結果は、官能検査とよく合致し、人の官能検

査によらず味覚センサを用いることにより、苦味度を表すことができることを示している。生理学的には、アミノ酸の受容体とキニーネのような植物系アルカロイドの苦味の受容体は異なると信じられている。しかしながら、この実験において、味覚センサでは脂質膜を使用することにより、キニーネの苦味の応答と同様な応答が得られた。このことは、苦味を呈するアミノ酸とアルカロイドが二分子膜の同じ部分で受容されている可能性があることを示唆しており、味覚受容メカニズムに一石を投じる結果と考えられる。

第3章においては、味覚センサによく応答する甘味のアミノ酸アラニンと前章で用いた苦味のトリプトファンを混合液を用意し、単独で甘味と苦味の複合味を呈するアミノ酸であるメチオニンとの比較を行い、味覚センサの応答電位から混合比を推定し、官能検査との比較を行った。メチオニンは甘味と苦味の両方を持ち、アラニンとトリプトファンの混合液と同じパターンを示した。このことは、官能検査によっても確認することができた。以上のように、味覚センサを用いることにより、混合液の混合比の推定が行えることを示した。

第4章においては、アミノ酸系のうま味物質であるグルタミン酸ナトリウム(MSG)により塩味度が抑制される“塩慣れ効果”を調べた。受容膜の改良と選択を行うことで、これまで人の官能検査により確かめられてきた抑制効果を、味覚センサを用いることにより、定量化できることを示した。また塩分の濃い領域で、過去に行われた官能検査との比較から、人間では識別できない濃い味の領域でも、味覚センサであれば明瞭に識別できることを示唆している。

さらに第5章では、アミノ酸がペプチド結合してできる呈味が弱いペプチドを、味覚センサを用いて調べ、アミノ酸と同様に応答電位から味質の分類ができることを示した。アミノ酸とペプチドに対する応答を調べ、相関係数を調べることで、官能検査の結果に極めて近い相関を示すことが確かめられた。主成分分析した結果、アミノ酸、ペプチドにかかわらず、基本味に明瞭にグルーピング化できた。ペプチドも、味質、強度など定量的に表せることを示しており、今後の展開が期待される。

最後に第6章において、本研究により得られた結果について総括を行った。

## 論文調査の要旨

食品の味を計測することは、食品生産における品質管理、食品の開発などの分野において必要不可欠なことである。しかしながら、食品メーカーにおける食品の味の評価は、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、味覚センサの開発が強く望まれていた。

タンパク質を構成するアミノ酸は20種類あり、その種類

により様々な味を呈する。またアミノ酸は単独で5基本味(酸味、苦味、甘味、塩味、うま味)からなる混合味(複合味)を呈することが官能検査によって示されており、これまでその味の種類、強度について数多くの研究がなされている。そこで味を客観的に再現性よく測れる装置を用いてアミノ酸の味質、強度などを定量的に表すことができれば、食品製造ラインの自動化、食品の品質保証など、その影響は計り知れないものがある。

本論文は、味覚センサを用いたアミノ酸の味の定量化、複合味の定量化、アミノ酸による抑制効果の定量化、さらにアミノ酸がペプチド結合してできるペプチドの味質を調べた研究をまとめたものである。

本研究では、まず5基本味を呈する塩化ナトリウム(塩味)や塩酸(酸味)などさまざまな典型的味物質を測定した。5基本味に対して、それぞれ特徴的な応答電位が得られ、味覚センサが味そのものに反応していることを示した。次に苦味を呈するアミノ酸であるトリプトファン、フェニルアラニン、イソロイシンの応答パターンと5基本味を比較した。その結果、これらの応答パターンが代表的苦味物質であるキニーネ塩酸塩(以下、キニーネと略す)と極めて高い相関を示すことを見出した。さらに、トリプトファンの応答電位に主成分分析及び重回帰分析なる多変量解析を施し、キニーネを用いた等価的苦味強度を求める方法を提案した。その結果は官能検査とよく合致し、味覚センサを用いることで、苦味強度が定量的に表せることが示された。

次に甘味のアミノ酸アラニンと苦味のトリプトファンの混合液を用意し、単独で甘味と苦味の複合味を呈するアミノ酸であるメチオニンとの比較を行い、味覚センサの応答パターンから混合液の混合比を推定し、官能検査との比較を行った。その結果、味覚センサによる混合液の混合比の推定に成功している。

さらに、アミノ酸系のうま味物質であるグルタミン酸ナトリウムにより塩味が抑制される“塩慣れ効果”を調べた。受容膜の改良と選択を行うことで、これまで人の官能検査により確かめられてきた抑制効果を、味覚センサを用いることにより、定量化できることを示した。

最後に、アミノ酸がペプチド結合してできるペプチドの味を味覚センサを用いて調べた。その結果、アミノ酸、ペプチドにかかわらず、各基本味毎に明瞭にグルーピング化でき、ペプチドの味質、強度などを定量的に表せることが判明した。

以上要するに、本研究は、従来全く不可能であったアミノ酸ならびにペプチドの味の計測を可能とし、食品製造過程における味覚認識システムの実用化に向けて有用な指針となるものであり、電子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) 浦本直彦(熊本県)
学位記番号 シ情博乙第38号(工学)
学位授与の日付 平成12年1月27日
学位論文題名 用例に基づく文の曖昧性解消に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 日高 達
(副査) // // 牛島 和夫
// // 松尾 文碩

論文内容の要旨

自然言語文における曖昧性(ambiguity)の存在は、機械処理の際の重大な問題となっており、従来から曖昧性を解消するための様々な研究が行われている。曖昧性は、形態素(単語区切り)、単語の係り受け、語義、文脈といった様々なレベルで出現し、曖昧性の解消には、それぞれに異なる種類の知識が必要となる。

初期の研究では、曖昧性を解消するために、人手で記述した意味的あるいは文法的規則が用いられた。例えば、語義の曖昧性解消には、選択制限(selectional restriction)とよばれる手法が知られている。これは動詞と格関係を持って共起しえる名詞に対して、各語義ごとに意味素性(意味マーカ)と呼ばれる意味的な概念(例えば、「人間」「物」)を付与し、動詞の各語義ごとに記述された格パターン(例えば、ある語義は主格として「人間」という意味素性を持つ名詞と共起する)を用いることで、曖昧性の解消を行うものである。

しかし、この手法には、必要な意味素性をいくつ用意すればいいのか、その体系はどのようにあるべきかという問題がある。例えば、電子化されている英英辞典として知られるLongman Dictionary of Contemporary English(LDOCE)では、10数個の意味素性が階層状に定義されている。しかし、自然言語文では、限られた単語を伴う表現や慣用的な言い回しが存在するため、このような粗い意味体系では語義の曖昧性を完全に解消することができない。一方、細かな意味素性の体系を構築すれば精密な格パターンの記述が可能であるが、動詞の個々の格パターンに応じて意味素性の体系を構築するのは非常に困難である。

これらの問題点に対し、京都大学の長尾は用例に基づくアプローチを提案した。これは、過去の解析例を大量に集めた用例ベースとシソーラスを用いて、規則に基づくシステムの問題点を解決するための手法である。用例に基づく曖昧性解消では、入力文に対してあらかじめ解析された用例の集合から最も類似する用例を求め、それを用いて曖昧性を解消する。最も類似する用例を用いて曖昧性が解消されるので、格パターンを精密に記述する必要がある場合には用例を追加すればよいし、特定の単語と共起するような場合にも対応できる。

長尾らの研究では、用例と入力文の類似性を比較するのに文の構文構造全体あるいは部分木を用いている。しかし、現実的な処理を考えると、入力文と全く同じ文が用例として存在することは希であるし、格フレームレベル(例えば、主語、動詞、目的語)の部分木でも、正確に一致することは少ない。これは、データ量の不足(データスパースネス)に起因するものであり、大量に電子化された文書データ(コーパス)が利用可能になった今日においても避けられない問題である。よって、現実的な処理においては少ないデータ量でも比較的信頼性の高い結果が得られるような手法が必要である。

もちろん、データ量が十分にあれば構造木同士を比較するようなアルゴリズムを利用することで高い曖昧性解消の精度が得られるが、そのような手法は多大な計算時間や記憶容量を消費する。また、木構造同士の比較はアドホックな経験則によって行われ明確な指針が提案されていない。

本研究では、大規模なテキスト集合(コーパス)から半自動的に構築した用例ベースを用いて曖昧性解消を行う手法について述べる。用例は単語間の係り受け関係(2項関係)の集合である。用例ベースは係り受け関係の集合である用例の和集合である。入力文に対して複数の可能な語義や格関係の組み合わせが存在し、1つの組み合わせ(解釈)は係り受け関係の列として定義される。1つの解釈と用例ベースの間の整合性を計算し、最も整合度が高い解釈を選択することで、曖昧性解消が行われる。係り受け単位で類似性を計算するため用例を効果的に使用することができ、効率の点でも従来手法より優れている。また、用例だけを用いるのではなく、比較的緩い意味素性の体系を用いる選択制約と、文と用例間の類似計算を組み合わせることで、曖昧性を柔軟かつ効率的に解消することができる。本研究で提案する手法を用いて、“take”、“get”といった数十個の語義を持つ動詞の曖昧性解消を行い、有効性を確認した。

用例に基づく曖昧性解消においては、その精度はシソーラスの規模に大きく依存する。なぜなら、ある単語が用例中にもシソーラス上にも存在しないならば、類似度計算を行うことができないからである。例えば、計算機マニュアルにおいては、新しい単語(未知語)が頻繁に出現するので、その都度未知語をシソーラスに追加する必要がある。

この問題を解決するために、本研究では、既存のシソーラスに対して未知語を自動的に配置する手法について述べる。入力となる未知語に対して、その単語がシソーラスのどの場所に配置される可能性が高いかを、コーパスから抽出した単語間の係り受け関係を用いて決定する。係り受け関係を用いて、シソーラス上の単語と未知語の間の類似度が計算される。すべての係り受け関係を用いるのではなく、シソーラス上の単語を他の兄弟単語と弁別する(視点と呼ぶ)度合いの高い係り受け関係のみを用いて類似度計算を行うことで、精度の向上を図っている。提案手法を用いて、

シソーラス上にない単語（未知語）に対するシソーラス上の位置を決定する実験を行った結果、74.2%の単語が正しい位置に配置され、正しい位置の親ノードおよび兄弟ノードの子供の位置に戻ったものを含むと80.1%の単語がシソーラス上の適切な位置に配置された。

論文調査の要旨

本論文は、自然言語の構文解析で発生する曖昧性を用例ベースとシソーラスを用いて解消する技法に関する研究をまとめたもので、用例ベースによる曖昧性解消技法と未知語をシソーラス上に自動的に配置する技法の2部から構成される。

自然言語の機械処理において、構文解析は最も重要な基盤技術であり、構文解析の精度が自然言語処理全体の質を左右すると言っても過言ではない。構文解析の精度に拘わる最大の問題は、入力文に対応する複数の構文構造の存在—構文構造の曖昧性—をいかにして解消するかということにある。従来、曖昧性を解消する方法として語彙の共起制約や確率文法を用いる方法が試みられてきたが、共起制約が複雑で精密な規則化が困難であることや、過度の単純化による精度の劣化等のため十分な成果が得られていない。

これに対し、1990年頃から、用例ベースを用いた曖昧性解消法が一部で試みられている。過去の解析例(用例)を大量に集めて用例ベースを作成し、用例に最も類似する構文構造を優先する方法である。用例ベースを用いた曖昧性解消法では、入力文の構文構造にぴったり合う用例をすべて収集することは不可能だから、小規模用例ベースに対しても類似の度合いを柔軟に計算できる類似測度の導入、および用例数の増加に伴って曖昧性解消の処理時間が線形に増大しないことが重要であるが、これらの点で不備な研究が多い。入力文の構文構造と用例の類似度計算には、一般にシソーラスが用いられる。シソーラスは語の間の意味的上下位関係であるが、生起頻度の低い単語に対しては未定義のシソーラスが多く、用例ベースを用いた曖昧性解消にとって大きな障害となっていた。

著者は、各用例に含まれる語彙の共起制約の和集合として用例ベースを構成している。したがって、用例の増加に伴って用例ベースの大きさは一定量に収束することになり、用例数が増大しても、用例ベースと入力文の構文構造の類似度計算時間は一定時間以下に抑えられる。入力文の構文構造に含まれる語彙の共起制約の集合と用例ベースの類似度を、シソーラスを用いて柔軟かつ高速に計算する方法を与え、本方式による曖昧性解消法が有効であることを実験により実証している。

次に著者は、未知語をシソーラスに自動的に配置する方法を提案している。シソーラスを語彙の共起制約に基づく語の弁別機構とみることにより、シソーラスの各ノードにおける弁別機能を語彙の共起制約に置き換える。シソーラ

ス上の語を、語彙の共起制約による弁別機構を用いてシソーラス上に再配置した場合に、高い確度で本来の位置に配置されることを実験により確認している。また、未知語に対しても、その語に関する語彙共起制約が十分に収集されていれば、シソーラス上の適切な位置に配置されることを示し、本自動配置法の有効性を実証している。

以上を要約すると、本論文は用例ベースを用いた新しい構文的曖昧性解消法と未知語のシソーラス上への自動配置法を提案し、その有効性を実験的に示したもので、言語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) Ilyin Yuri A. (ロシア共和国)
 学位記番号 シ情 博乙第39号(学術)
 学位授与の日付 平成12年2月24日
 学位論文題名 Quench Development in High Temperature Superconducting Devices (高温超伝導デバイスのクエンチ特性に関する研究)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 竹尾 正勝
 (副査) " " 原 雅 則
 " " " 船木 和夫
 " " " 吉田 啓二

論文内容の要旨

高温超伝導材料はその線材の長尺化・均質化が可能になってきており、電力用、核融合炉用の超伝導電磁石の実用化を目指した研究開発が進展してきている。液体窒素温度領域での運転可能な超伝導機器の実現ができれば従来の機器に比べて飛躍的に小型・軽量さらに大容量化、高機能な超伝導機器は現用機器の性能をはるかに越えた革新的な機器として新世紀の電力・エネルギーの需要を満たすことが可能となる。

高温超伝導機器を実用化する際でその信頼性を満足できる設計を行うための最重要課題は超伝導機器の安定性・安全性の確保である。特に超伝導電磁石の内部でクエンチが起これば抵抗成長に伴うジュール熱により巻線内部の異常電圧の発生や機器の損傷の事故が起こる等重大な事態が懸念される。従来の液体ヘリウム温度領域で使用されている金属系超伝導機器においてその電磁石設計に不可避である安全性理論やクエンチ現象の評価法については実験的・理論的裏付けは確保されている。しかし一方で高温超伝導電磁石に対してそれらの理論・評価法を適用することは困難であることも指摘されている。高温超伝導体における常伝導伝播やクエンチを理解するため、実験的研究は余り系統的行われておらず、またその実験結果を説明するための

シミュレーション解析も一部行われているが、これまででは高温超伝導体における常電導伝播の物理的理解が十分でなく、簡単な解析的アプローチの構築が待たれている。

本論文では常電導転移を記述する新しいアプローチを展開するというこの課題のために、まず高温超伝導体の常電導伝播に関して種々の伝熱・電磁気的條件を模擬した系統的な実験を行い、さらに実験結果に基づく理論的展開を試み高温超伝導デバイスにおける常電導伝播の振舞を記述するための新しい方法の提案を行っている。

著者はまず4.2~4.0Kのヘリウムガス冷却中にあるBi系高温超伝導コイルにおける常電導伝播の振舞を検証し、その振舞を検出する方法としては従来の電圧測定法よりは温度検出法がより有効であることを示している。また実測した結果から、高温超伝導コイルにおける安定性並びにクエンチについては、従来から言われている常電導伝播の記述法ではなく、熱伝導、熱伝達の影響下における温度並びに輸送電流の関数としての低電気抵抗物体として見なすべきであることを指摘している。

さらにBi系高温超伝導において上述に新しく得られているクエンチ特性を評価するために、熱平衡方程式を計算しシミュレーションを行った結果クエンチに関連した電圧及び温度上昇は良い一致が得られている。数値解析は良い精度であるけれども実際の解析作業としては多大の労力を要するため高温超伝導体におけるクエンチ現象を記述するための一般解析法の定式化を試みている。その結果超伝導体の電流電圧特性をパラメータとして熱暴走温度およびクエンチ電流の値を決定する一般式を提案している。この評価法による解析式と前述の実験結果との比較を行った結果、この提案されている評価法が非常に有効であることを示している。

このことを調査するためにコイルボビンとして熱膨張率がほとんど同じ値でその他の熱定数の異なる銅並びにGFRDを用いた同一寸法のものに同一材料・形状の高温超伝導単層コイルについて常電導領域の生成に関する実験を行っている。その結果①熱暴走の条件はその時の温度と加熱パワーに依存するがボビン材料や輸送電流には依存しないこと、②熱暴走に至るまでの所要時間は銅製ボビンに巻いたコイルおよそ一桁早いことを示している。これらのことから前述の評価法が正しいことが検証されている。

これらの知見に基づいて高温超伝導材を用いたコイルとして工業的に実現が容易であるパンケーキコイルを試作し、その安定性試験を行ったが4K~80Kの広範囲な温度領域で十分なる安定性が得られている。

論文調査の要旨

高温超伝導材料はその線材の長尺化・均質化が工業的に可能になりつつあり、電力用、高磁界用の超伝導電磁石の実用化を目指した研究開発が進展してきている。比較的

磁界で利用される電力機器については液体窒素温度領域で運転可能な性能が得られる。したがって高温超伝導機器の実現によって従来の機器に比べて飛躍的に小型・軽量さらに大容量化が実現し、高機能な超伝導機器は、現用機器の性能をはるかに越えた革新的な機器として新世紀の電力・エネルギーの需要に応える基盤となることが可能となる。

高温超伝導機器を実用化する際に満足できる信頼性の高い設計を行うための最重要課題は超伝導機器としての安定性・安全性の確保である。特に超伝導電磁石の内部でクエンチが起これば、抵抗増加に伴うジュール熱により、巻線内部の異常電圧の発生や機器の損傷の事故が起こる等重大な事態が懸念される。従来の液体ヘリウム温度領域で使用されている金属系超伝導機器用の電磁石設計に必須である安全性理論やクエンチ現象の評価法については、実験的・理論的裏付けが確保されている。しかるに高温超伝導電磁石に対してはそれらの理論や評価法を適用することが困難であることも指摘されている。高温超伝導体における常電導伝播やクエンチを解明する目的のため、実験的研究は必ずしも系統的に行われておらず、また、その実験結果を説明するためのシミュレーション解析も一部行われているが、現状では高温超伝導体における常電導伝播の物理的理解が十分でなく、簡単な解析的アプローチの構築が待たれている。

本論文は、常電導転移を記述する新しいアプローチを展開するという課題のために、まず高温超伝導体の常電導伝播に関して、種々の伝熱・電磁気的條件を模擬した系統的な実験を行い、さらに実験結果に基づく理論的展開を試み、高温超伝導線材における常電導伝播の振舞を記述するための新しい方法の提案を行っている。

著者はまず、4.2Kのヘリウムガス冷却中にあるBi系高温超伝導コイルにおける常電導伝播の振舞を検証し、その振舞を検出する方法としては従来の電圧測定法よりは温度検出法がより有効であることを示している。また、実測した結果から、高温超伝導コイルにおける安定性ならびにクエンチについては、従来から言われている常電導伝播の記述法ではなく、熱伝導、熱伝達の影響下における温度ならびに輸送電流の関数としての抵抗体として見なした記述をすべきであることを指摘している。

さらに、Bi系高温超伝導体のクエンチ特性を定量的に評価するために、熱平衡方程式を計算してシミュレーションを行った結果、クエンチに関連した電圧および温度上昇は実測値と良い一致が得られていることを示している。実施した数値解析結果は良い精度であることが判明しているが実際の解析作業としては多大の労力を要するため、解析的に高温超伝導体におけるクエンチ現象を記述するための一般解析法の定式化を試み、超伝導体の電流電圧特性をパラメータとして熱暴走温度およびクエンチ電流の値を決定する一般式を提案している。この評価法による解析式と前述

の実験結果との比較を行った結果、この提案されている評価法が極めて有効であることを示している。

このことを再検証するためにコイルボビンとして熱膨張率がほとんど同じ値でその他の熱定数の異なる銅ならびにG-FRPを用い、同一寸法のボビンを用いて同一材料・形状の高温超伝導単層コイルを試作し、これらについて常電導領域の成長に関する実験を行っている。これによって、熱暴走の成立条件はその時の温度と加熱パワーに依存するがボビン材料には依存しないこと、ただし、熱暴走に至るまでの所要時間は銅製ボビンに巻いたコイルにおいておよそ一桁程度早いことを示している。これらのことから提案した評価法が正しいことが検証されている。

これらの知見に基づいて高温超伝導材を用いたコイルとして工業的に実現が容易であるパンケーキコイルを試作して、その安定性実験を行い、上述の評価法が有効であることが実証でき、4K~80Kの広範囲な温度領域で十分な安定性があることを示している。

以上要するに、高温超伝導体における常電導伝播を実験的に検証し、従来にないその振舞を新たに見出し、超伝導体の電流電圧特性を取り込んだ熱暴走およびクエンチ電流の値を決定する一般解析式を提案している。さらに、この指針が実験的にも妥当であることをも示している。本論文はそれらの結果をまとめたもので、超伝導理工学上価値ある業績であり、よって博士(学術)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 相知政司(長崎県)
 学位記番号 シ情博乙第40号(工学)
 学位授与の日付 平成12年2月24日
 学位論文題名 補助電極付長間隔コンデンサによる誘電率分布測定法に関する研究
 論文調査委員
 (主査) 九州大学 教授 吉田欣二郎
 (副査) " " 安元清俊
 " " " 吉田啓二

論文内容の要旨

誘電率の分布が測定できれば、誘電体の品質検査、誘電率の温度依存性を利用する温度分布測定、誘電率CTなどへの利用の可能性がある。周囲から非破壊的に物体や生体の内部の誘電率分布を測定する方法のひとつとして、微小電極を持つ長間隔コンデンサで低周波の静電容量計測を通して行う方法が考えられる。しかし、長間隔コンデンサは、電極の端部効果や浮遊容量低減用シールドの影響が強く、測定電極間内だけの静電容量計測は大変困難である。この問題に対し、測定電極を取り囲むように測定電極と同電位となる補助電極を設けて等価的に測定電極面積を広げ、測

定電極間内では平等電界を作り低電位側測定電極に流れる変位電流を基に測定電極間内だけの静電容量を計測しようとする手法が提案されている。しかしながら、この静電容量計測法は補助電極が変位電流分布に及ぼす重要な影響が理論的に解明されておらず、測定電極間内だけの静電容量が真に計測されているのか極めて疑問であり、これによる誘電率分布測定は全く未解明のままであった。

本論文は、補助電極付長間隔コンデンサの従来未解明であった変位電流分布を独自の電気力線描画法で可視化して厳密に解明し、これに基づく誘電率分布測定の可能性を数値シミュレーション実験により検証したものであり、以下の7章から構成されている。

第1章は、序論であり、本研究の背景と目的を明らかにし、本論文の概要を述べた。

第2章では、まず、補助電極付長間隔コンデンサを用いた測定電極間内だけの静電容量が計測可能であることを確認する目的で、補助電極の幅を変化させ、シールドの位置を変更した実験を行った。その結果、補助電極端から測定電極端までの補助電極長を測定電極間と同じにすることで、再現性のよい静電容量測定値が得られた。しかし、実験結果だけからでは、測定電極間に平等電界が得られており測定電極間内だけの静電容量を計測しているのかを確認できなかった。

第3章では、補助電極付長間隔コンデンサの変位電流を可視化し、静電容量の測定原理を検証する基礎技術として、特異な電極配置である実験モデルに即した要素データを作成し数値電界解析を行うための支援システムを開発した。本システムは、解析結果に悪影響を与える好ましくない要素データを隣り合う要素データの辺と付け替えることで要素データの形状を修正することを可能にした。また、この機能を利用し予め電界の分布を予想して望む形の要素データを作成することができ、より正確な電気力線描画が可能となった。

第4章では、数値解析から得られる離散的な電気スカラーポテンシャルから等電位線を求め順次これに垂直線分を引くことで電気力線を計算する手法を開発した。本電気力線描画手法は、逐次計算手法のEuler法を用いた電気力線描画と比較しても高精度であり、電界計算が不要で計算時間が約1/5に短縮できた。

第5章では、補助電極付長間隔コンデンサの測定電極間内に微小電極と同幅の誘電体が存在する場合について、電気力線描画法を用い可視化して従来未解明であった変位電流の分布を明らかにした。その結果に基づいて、低電位側測定電極の両端から高電位側電極に向かって引かれた2本の電気力線で囲まれる領域を決定でき、その電界エネルギーから静電容量を計算する新しい方法を開発した。異なる誘電体が低電位側測定電極付近に存在する場合には、高電位側補助電極から発生した変位電流が低電位側測定電極に引

き込まれるため、測定電極に流れ込む電流が増加し、静電容量が大きくなることが理論的に明らかになった。一方、高電位側測定電極付近に誘電体が存在する場合には、高電位側測定電極の端部から発生した変位電流が低電位側の補助電極に終端するため測定電極に流れ込む電流が減少し、静電容量が小さくなることが確認できた。長間隔コンデンサであっても補助電極を用いることで、静電容量計測による誘電率分布が推定できると考えていたが、数値計算結果から、測定電極間の平等電界が崩れ、誘電体の位置によって静電容量は大きく変化し、理想的な平行平板コンデンサの静電容量理論式から誘電体の分布を計測することは困難であることが明らかになった。しかし、誘電体の位置と誘電率により補助電極から流れ出る変位電流が加算されて測定電極に流れ込む現象が明らかになり、この現象を利用した誘電率分布測定の新しい可能性が出てきた。

第6章では、誘電体が測定電極間の任意の垂直位置にあり、これを水平方向にずらした場合の静電容量計算を行った。その結果から、静電容量の値は水平方向のずれとともに最大値から徐々に小さくなることが明らかになった。また、誘電体が低電位側測定電極付近に存在する方が高電位側測定電極付近に存在する場合より、静電容量の変化が激しいことも明らかになった。これらの現象を利用して、まず、計測装置を水平方向に移動し静電容量が最大となる位置から誘電体の水平位置を決定する。次に、その水平位置で高電位側と低電位側の電極の電位を切り替えて2回静電容量を計測し、2つの静電容量の差と大きい方の静電容量から予め数値解析で得られたデータと照合することによって、誘電体の垂直位置と誘電率の推定が可能であることが明らかになった。

第7章は、以上の結果を総括した結論である。

論文調査の要旨

誘電率分布の測定は一般に極めて難しい問題であるが、これが実現できれば、誘電体の品質検査、誘電率の温度依存性を利用する温度分布測定、誘電率CTなどへの利用の可能性もある。特に、誘電率CTは、マイクロ波CTなどと比較して、小形・低コストで、簡便に非浸襲生体内部温度計測ができるものと期待される。被測定物の周囲から非破壊的に物体や生体の内部の誘電率分布を測定する方法のひとつとして、微小電極を持つ長間隔コンデンサで低周波の静電容量計測を通して行う比較的簡便な方法が考えられる。これは、周囲から静電容量を測定し、内部の誘電率分布を推定しようとするもので、測定電極間隔に比べて十分短い微小な測定電極で静電容量を精度よく計測する必要がある。微小電極長間隔コンデンサの電極端部効果や浮遊容量低減用シールドの影響を補償するため、測定電極と同電位となる補助電極を設けて測定電極を水平に取り囲み測定電極内に平等電界を作ることによって、低電位側測定電極

に流れる変位電流を基に測定電極間内だけの静電容量を計測しようとする手法が提案されている。しかし、補助電極が変位電流分布に及ぼす重要な影響は実験的にも理論的にも詳細には解明されておらず、測定電極間内だけの静電容量が真に計測されているのかさえ極めて疑問であり、この誘電率分布測定法は全く未解明であった。最も重要な問題である変位電流分布の解明には、電気力線描画法の開発が不可欠であった。

本論文は、補助電極付長間隔コンデンサの従来未解明であった変位電流分布を独自の電気力線描画法で可視化して厳密に解明し、これに基づく誘電率分布測定の可能性を数値シミュレーション実験により検証したものである。その主な研究成果は次の通りである。

(1)補助電極の位置とシールドの大きさが静電容量に与える影響を実験により明らかにするとともに、これらが浮遊容量や外乱を防止して計測精度を向上させることを実験により明らかにした。

(2)補助電極付長間隔コンデンサの異なる電極配置における要素データ作成と変位電流可視化の基礎技術として、二次元有限要素法による電界の数値解析を行うためのメッシュデータ作成支援システムとメッシュデータ編集ツールを開発した。

(3)数値解析から得られる等電位線に順次垂直線分を引くという簡単な原理に基づく電気力線の描画と複雑な電界の可視化のための新しい手法を提案し、従来のEuler法に比べて解析の高精度化と描画の高速化を行った。

(4)開発した電気力線描画法を用いて従来未解明であった測定電極間のみの変位電流分布を明らかにし、その電界エネルギーから静電容量を計算する新しい方法を開発した。微小電極と同幅の誘電体が、低電位側測定電極付近に存在すると測定電極に流れ込む変位電流が増加し静電容量が大きくなり、一方、高電位側測定電極付近に存在すると変位電流が減少し静電容量も小さくなること、を理論的に明らかにした。

(5)測定電極間における誘電体の垂直位置によって静電容量は大きく変化し、一方、水平方向のずれとともに静電容量は最大値から単調に減少することを解明し、この現象を利用した誘電率分布測定の新しい可能性を見出した。これらの現象を利用して、静電容量が最大となる位置から誘電体の水平位置を決定し、高電位側と低電位側の電極の電位を切り替えて計測した2つの静電容量の差と大きい方の静電容量から予め得た数値解析のデータと照合して、誘電体の垂直位置と誘電率の推定が可能であることを明らかにした。

以上要するに、本論文は、補助電極付長間隔コンデンサの従来未解明であった変位電流分布を独自の電気力線描画法で可視化して厳密に解明し、これに基づく誘電率分布測定の可能性を数値シミュレーション実験により検証したも

ので、電気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) 原田 隆(広島県)
 学位記番号 シ情 博乙第41号(工学)
 学位授与の日付 平成12年3月27日
 学位論文題名 A Study on Nondominated k -Coteries
 for Distributed k -Mutual Exclusion (分散
 k -相互排除のための k -コータリの研
 究)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 山下 雅史
 (副査) // // 荒木 啓二郎
 // // // 牧之内 顕文

論文内容の要旨

互いに競合する複数のプロセスが、自律的に利害を調整し協調する仕組みを提案することは、分散システムの基礎理論分野である分散計算論の主要な話題の一つである。様々な分散問題はその部分問題として競合解消問題を含み、含まれる競合解消問題の困難さによって分散問題の複雑さが決定されることも多い。 k -相互排除問題は同時に共有資源を使用するプロセス数が高々 k であるように分散システムを制御する代表的な競合解消問題である。1-相互排除問題がいわゆる相互排除問題である。

分散システムは通信形態によって共有メモリ型とメッセージ交換型の二つに大別される。本研究の目的は、メッセージ交換型分散システム上の k -相互排除問題を「望ましい」具合に解決するアルゴリズムを設計するための手法を確立することである。ただし、本研究では「望ましき」の尺度として、共有資源にアクセスするために必要となるメッセージ数で定義されるメッセージ複雑度と、プロセスや通信リンク故障に対する耐性を表す可用性を用いる。メッセージ交換型分散システムの k -相互排除アルゴリズムの研究では、従来、通信リンクが定義するトポロジーとして、完全グラフといった特殊なものだけが考慮されてきた。本研究では初めて一般のグラフ構造を検討しており、この点に本研究の独自性がある。一方、一般の k -相互排除アルゴリズムの研究はいまだに初期段階にあり、本研究でも最も単純な完全グラフの場合を扱う。

本論文は2部8章から構成されている。第1章は序章である。メッセージ交換型分散システムや k -相互排除問題といった概念を定義し、過去の関連研究を概観する。

第2-4章から構成される第1部では、(1-)相互排除問題を検討する。第2章では、1-コータリとその性質である G -NDと呼ばれる概念を定義する。望ましい相互排除問題を構成する問題は望ましい G -ND 1-コータリを生成する

問題に帰着する。第3章では、1-コータリが G -NDであるための必要十分条件を求め、第4章では、与えられた1-コータリの可用性をこの条件を用いて改善するアルゴリズムを提案する。

第5-7章から構成される第2部では、一般の k -相互排除問題を検討する。第5章では、より高い可用性を持つ k -コータリを生成するjoin演算を定義し、第6章では、join演算を用いて木状の論理構造に基づく k -コータリを順次生成するアルゴリズムを提案する。第7章では、木状 k -コータリを利用し、低いメッセージ複雑度で k -相互排除問題を解決するアルゴリズムを提案する。

第8章では本稿のまとめと未解決の問題を示す。

論文調査の要旨

ある与えられた分散システムにおいて、互いに競合する複数のプロセスが自律的に利害を調整し、協調する仕組みを提案する問題が競合解消問題である。分散システムに生ずる様々な問題にはその部分問題として競合解消問題が現れ、元の問題を解決する分散アルゴリズムの存在可能性や計算量がそれに含まれる競合解消の困難さによって決定されることがしばしば起こる事から、競合解消問題は分散計算の主要な話題の一つに数えられている。(分散) k -相互排除問題は、メッセージ交換を通信手段とする分散システムにおいて、共有資源に同時にアクセスできるプロセス数の上限が k となるようにシステムを制御する手段を求める代表的な競合解消問題であり、1-相互排除問題は相互排除問題として知られている。

k -相互排除問題を解決するために、共有資源へのアクセスを希望するプロセスは、あるプロセス集合に属するすべてのプロセスの了解を得てアクセスを開始するというアルゴリズムを考える。この了解を与えるプロセス集合をコーラムと呼ぶ。適切にコーラム集合を定めると、このアルゴリズムによって k -相互排除問題を解決できることが既に知られている。この目的を達成するコーラム集合を k -コータリと呼ぶ。一般に、多くの異なる k -コータリが存在し、アルゴリズムが費やすメッセージ数やアルゴリズムのシステム故障に対する強度など、アルゴリズムの主要な性能は採用された k -コータリによって決まる。本論文は、アルゴリズムの性能を最適化する k -コータリを研究しており、1-コータリに関する研究と任意の1-コータリに関する研究という二部構成である。

第一部で検討されている1-コータリはよく知られた概念である。通信リンクが作るトポロジーが完全グラフである、すなわち、どの二つのプロセスも直接メッセージ交換可能であるという仮定の下で研究はよく進んでいるが、この仮定は実システムでは保証しづらいものである。完全グラフ以外のトポロジーを仮定する研究もあるが、いずれも木やリングといった、特殊なグラフに止まっている。著者は、

任意のグラフをトポロジーとして持つ分散システムを対象として最適な1-コートリを検討しており、研究の独自性という観点のみならず、実システムへの適用可能性の拡大という観点からもこの研究は意義が深い。

グラフ非支配 (graph nondominated - G-NDと略記する) と呼ばれる k-コートリに関する性質が本論文では重要な役割を果たす。完全グラフに対するG-ND性をND性と呼ぶ。k-コートリのG-ND性判定問題の時間計算量の評価は、1-コートリのND性判定に限定した場合がよく知られた未解決問題であり、NP-完全であると予想されている。しかし一方、ND性を持つ1-コートリを順次生成するアルゴリズムが知られており、本論文ではこのアルゴリズムを効果的に利用する。

具体的には、著者はまず、最適な1-コートリを求める問題を1-コートリのG-ND性判定問題に帰着した上で、1-コートリがG-NDであるための必要十分条件を導いている。しかし、この条件の判定には指数時間かかり、この条件を用いた最適1-コートリ構成アルゴリズムは実用性の点で問題が残る。そこで、著者はつぎに、NDである1-コートリがG-NDであるための必要十分条件を導き、この条件判定が多項式時間で可能であることを示した。そしてNDである1-コートリ生成アルゴリズムを用いて、準最適1-コートリを構成するアルゴリズムを提案し、その実用性をシミュレーション実験を用いて確認した。

第二部ではk-コートリを検討している。第一部と異なり、第二部では完全グラフをトポロジーとして仮定している。第一部に比べて後退した印象を与えるが、前例のない、k-コートリの最適性の研究を開始する上で妥当な選択であったと考える。著者はまず、k-コートリと1-コートリの対を入力として新しいk-コートリを生成するjoinと呼ばれる既存の演算に着目し、join演算によって生成されるk-コートリがNDであるために入力対が満たすべき必要十分条件を求め、生成されるk-コートリが入力されるk-コートリの改良であるための十分条件についても明らかにした。つぎに、この十分条件を満たすようにしながら、join演算を繰り返し適用することによって、十分に最適に近いk-コートリを生成するアルゴリズムを示し、その事実をシミュレーション実験を用いて確認した。さらに、このようにして生成されたk-コートリを効率良く利用してk-相互排除問題を解決するアルゴリズムを提案している。

以上を要約すると、本研究は、メッセージ交換型分散システムにおいて高性能なk-相互排除アルゴリズムを構成する問題を、そのアルゴリズムで採用する適切なk-コートリを生成する問題と考え、最適あるいは準最適なk-コートリを生成するアルゴリズムを提案し、シミュレーション実験を用いてその有用性を実証したものであり、情報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) 笹倉 万里子(兵庫県)
学位記番号 シ情 博乙第42号(工学)
学位授与の日付 平成12年3月27日
学位論文題名 Studies on Program Visualization Systems for Parallelization (並列化のためのプログラム視覚化システムに関する研究)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 荒木 啓二郎
(副査) // // 安浦 寛人
// // // 雨宮 真人

論文内容の要旨

自動並列化コンパイラは、逐次実行を前提として書かれたプログラムを並列プログラムに自動的に変換することを目的としている。しかし、現在の自動並列化コンパイラは、逐次プログラムの並列化を完全に自動的に行えるわけではない。自動並列化コンパイラによって並列化が行われなかった場合には、ユーザが、プログラムのどの部分をどのような手法を用いて並列化するかを自動並列化コンパイラに指示して並列化しているのが現状である。このようにユーザがコンパイラに指示を与えながら並列化を行う環境を対話型コンパイル環境という。

ユーザが自動並列化コンパイラに対して的確な指示を与えるためには、なぜ自動並列化コンパイラがプログラムを並列化できなかったのかをユーザが知る必要がある。そのためには、これまでユーザに知らされることのなかった、自動並列化コンパイラによるプログラムの解析の情報がユーザに提示される必要がある。しかし、一般にコンパイラによる解析の情報は複雑であるため、テキスト形式による提示ではユーザが理解するのが困難であり、これまでの対話型コンパイル環境の問題点の一つとなっていた。

本論文では自動並列化コンパイラがプログラムを解析して得た情報を視覚化してユーザに示すシステムNaraViewについて述べる。NaraViewは対話型コンパイル環境において、コンパイラからユーザに対する情報提供の部分を担当するシステムである。NaraViewの特徴は、これまでユーザに提示されることが少なかったコンパイラの内部表現、具体的にはコンパイラによって解析されたプログラムの構造、制御フロー、データ依存関係をユーザに視覚化して提示する点である。視覚化とは、複雑な情報の中から重要と思われる情報を抽出しその情報間の関係に重点をおいて図として表現することである。視覚化することで、ユーザは重要な情報とその情報間の関係を直観的に理解することができる。NaraViewではユーザが並列化の指示を行うために必要な情報を選び4つのビューとして実現した。

特にそのうちのプログラム構造ビューとデータ依存関係ビューは情報を3次元空間に視覚化し人間の視覚的認知能力を使うことで並列化に必要な情報を直観的に理解できるように提示しているという点で新しい。プログラムの並列化において、対話的コンパイル環境の重要性はこれまでも主張されていることであるが、その中でNaraViewはコンパイラからユーザへの情報提供の新しい方法を示したという点で意義がある。

第2章では、NaraViewの背景として、自動並列化コンパイラが一般的によく用いるループ変換手法の概観を行った後、これまでに提案されている対話的コンパイラ環境およびプログラム視覚化システムに関してまとめている。これによってNaraViewが並列化という具体的な目標のための初めての本格的なプログラム視覚化システムであることを示す。

第3章ではNaraViewに対する要件を明確にした後、NaraViewを構成するプログラム構造ビュー、階層制御フロービュー、データ依存関係ビュー、ソースコードビューの4つのビューについて簡単な紹介を行う。

第4章ではNaraViewが提供するビューのうち、プログラム構造ビューについてその詳細を議論する。プログラム構造ビューはプログラムをプログラムのながれ、ループネスト、並列度の三つの尺度で表現するもので、それぞれの尺度を3次元空間の一つの座標軸に割り当て、原則としてプログラムのソースコードの一文に対して一つの立方体を表示することでプログラムを視覚化する。このビューはプログラムの構造の全体を直観的に概観できるように視覚化していることが特徴である。

第5章ではデータ依存関係ビューについての詳細を議論する。まずデータ依存関係ビューの基礎となる変数の観点から定義したデータ依存関係モデルについて議論し、従来の文の観点から定義したデータ依存関係モデルと比較する。そして、変数オリエンティッドなデータ依存関係モデルの視覚化法を示す。

第6章では、例を用いてNaraViewの有用性を示す。NaraViewのプログラム構造ビューでプログラムを概観し、そこからデータ依存関係ビューを起動することによって、並列化すべきループの選択とそのループ内のデータ依存関係の詳細な検討が容易に行える。また、プログラム構造ビューが規模の大きなプログラムをも扱えることを例によって示す。さらにデータ依存関係ビューによって、並列化できるかどうか、またどのループ変換手法を適用すればいいのかを判断できる場合があることを示している。

論文調査の要旨

物理現象の解析やシミュレーション、コンピュータグラフィックス、経済予測などにおいて計算機を用いた大規模計算の需要はますます大きくなってきている。これらの大

規模計算を効率良く実行するための有効な方法として並列処理の研究が行われている。そこでは、新規に並列処理プログラムを開発することと並んで逐次処理プログラムを並列化する方法についても研究されている。

逐次処理プログラムを並列化する利点は、並列処理プログラム作成のための新たな知識を必要とせず従来からの逐次処理プログラミングの知識や経験だけで済むこと、ならびに、長年利用されて来た信頼性の高い膨大なソフトウェア資産を活用できることにある。このためには、逐次処理プログラム中に存在する並列性を抽出する自動並列化コンパイラが必要とされる。これまで並列化のためのプログラム変換規則が多数提案されて、自動並列化コンパイラの中で利用されてきた。しかしながら、それらの並列化規則を適切に適用して自動的に並列化を行う技術は十分には確立されておらず、もともとの逐次処理プログラム中に潜在的に存在する並列性を十分に抽出しきれないことが多い。そのために、人間が並列化コンパイラからの出力情報を見て、特定の並列化技法の適用を並列化コンパイラに指定したり、並列化コンパイラが並列化を実施できるようプログラムの書換えを行ったりする必要がある。

並列化コンパイラが提供する情報は、コンパイラが対象プログラムを解析した結果得られた内部情報を主として文字で表現したものであるため、人間にとっては理解しづらいものであった。したがって、並列化コンパイラとのやりとりをしながら人手を介してプログラムの並列化を行うことは容易なことではなかった。

本研究は、上述の並列化コンパイラが提供する情報を人間が直観的に理解しやすいように視覚的に表示することにより、既存の逐次処理プログラムの並列化を支援するツールの開発を行ったものである。

まず、逐次処理プログラムの並列化という問題の特質に応じた視覚化の方法について考察し、プログラム構造、階層制御フロー、データ依存関係、ソースコードの四種類の観点から視覚化表示する機能を実現した。これによって、利用者は、並列化のためにコンパイラに指示を与える際に必要となる情報を直観的に認識することができる。このうち、プログラム構造とデータ依存関係との二種類の観点からの視覚化に関しては、並列化の際に重要な役割を果たす情報を的確に把握することができることを特に配慮した視覚化表示方法を提供している。

プログラム構造については、プログラム実行に伴う時間経過、ループの入れ子、プログラムの並列度の三種類の情報を三次元的に表示して、プログラムの全体構造を直観的に概観できるようにした。これによって、プログラム中で並列化操作の対象の候補となる箇所や並列化の達成状況などの認識が容易になる。

データ依存関係に関しては、従来のプログラムの実行文に基づく依存関係ではなく、変数に基づくデータ依存関係

を定義して、その視覚化表示方法を新たに考察した。個々の変数に対して、その値が保持されるべき期間および保持される必要がない期間に着目して、変数へのアクセス種別で区別したデータ依存関係を定義して、理解しやすい表示方法を実現した。これにより、プログラム中の詳細な依存関係を観察できて、並列化に有用な情報や見通しを得ることができる。

また、具体例に対して本ツールを適用することによって、本視覚化ツールを用いて並列化を行う方法を提示し、併せて、本ツールの有用性に関する見通しを与えた。

以上、本研究は、既存の逐次処理プログラムの並列化のために必要な情報を、直観的に理解しやすく提供するための新たな視覚化表示方法を提示し、それをツールとして実現して並列化支援における有用性を示したものであり、計算機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)に値するものと認める。

氏名(本籍) 阿久根 忠 博(宮崎県)
 学位記番号 シ情 博乙第43号(工学)
 学位授与の日付 平成12年4月27日
 学位論文題名 超伝導 NbTi 極細多芯線における近接効果に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 船 木 和 夫
 (副査) " " 竹 尾 正 勝
 " " " 吉 田 啓 二

論文内容の要旨

高電流密度性と低損失性の優れた特性を持つ超伝導体は各種の電気電子分野での応用が期待されている。細線化による損失の低減と良好な熱拡散による安定度の向上を図るため現用超伝導線材は、多数の超伝導フィラメントが高熱伝導率の常伝導マトリックス中に埋め込まれた構造の極細多芯線である。超伝導フィラメントの線径 d_f を細くすれば高電流密度が得られ、同時に線材の安定化を図れる。しかし、 d_f の極小化を進めフィラメント間隔 d_N が減少してマトリックスのコヒーレンス長 ξ_N と同等かそれ以下になると、超伝導フィラメントからの超伝導電子のしみ出しのためにマトリックス全体が弱超伝導性を示すようになる。このような近接効果のために細線化の効果を損なう。即ち、マトリックス部分の弱超伝導性による過剰磁化が現れ、損失が顕著に増加する。従って、実用超伝導線材では細線化を図ると同時に近接効果を避ける必要がある。

従来、極細多芯線の近接効果超伝導物性はほとんど経験的で定性的な評価に留まり、定量的に十分に明らかにされておらず、各種の極細多芯線の近接効果に関する系統的な実験及び検討がなされていないのが現状である。そこで、極細多芯線の各種の応用に応じた最適な設計を行うために、

極細多芯線の近接効果による弱超伝導物性の定量的評価を系統的に研究する意義は大きく重要である。

本論文は、超伝導極細多芯線におけるマトリックスの弱超伝導化すなわち近接効果について、それを定量的に評価することを目的として行った研究結果をまとめたもので、5章から成る。

第1章では、多芯線の近接効果に関するこれまでの研究について概説し、その問題点の指摘を行っている。

第2章では、Cuマトリックス NbTi 極細多芯線とCuに磁性元素の Mn を微量添加した Cu-0.5wt%Mn マトリックス NbTi 極細多芯線の磁化を広い温度範囲で測定し、そのツイストピッチ依存性からマトリックスに流れる近接効果電流の臨界電流密度 J_{cp} と NbTi フィラメントの臨界電流密度 J_{cf} を評価している。その結果、 J_{cp} の磁界依存性はピン止め効果に関するスケール則で説明できることを示し、この評価によってマトリックスの上部臨界磁界 B_{c2p} を見積もっている。また、 B_{c2p} の温度依存性からマトリックスのコヒーレンス長を定量的に評価している。 J_{cp} の磁界、温度依存性を比較・検討した結果、Cu-0.5wt%Mn マトリックス多芯線の J_{cp} は Cu マトリックス多芯線のその 1~2 桁以上小さい事を示し、Mn 添加による近接効果抑制効果を定量的に明らかにしている。また、 ξ_N にはフィラメント径依存性があり、 $d_N > 2\xi_N$ の時近接効果が消失する事を明らかにしている。さらに、Cu-0.5wt%Mn マトリックス多芯線は、低温では B_{c2p} の温度依存性が高温領域より緩やかになり、その温度境界からスピン凍結温度を評価している。このことから低濃度 Mn における近接効果制御についての新しい知見を得ている。

第3章では、近接効果の的確な評価法を確立するために、短い極細多芯線の磁束侵入の異方性について論じている。短い極細多芯線の磁化を試料長を変えて測定し、磁化が線径の約 50 倍まで長さ依存性を示すことがあることを実験的に指摘している。次に、近接効果超伝導電流を考慮した臨界状態モデルを用いて有限断面積の無限長平板の場合に、2次元の磁束分布を解析してその磁化特性を求め、短尺試料特性の試料長依存性を検討し長尺とみなせる試料長の評価を行っている。しかしながら、臨界状態モデルによる検討では長尺とみなせる試料長の下限が実測結果より短い結果が得られている。この結果は線端での多芯構造に起因する磁束の侵入の容易さによると推定されるが、今後さらに検討する必要があることを示している。

第4章では、第2章で用いた多芯線試料の磁化緩和の測定から大きい磁化緩和は近接効果による過剰磁化成分による事を示し、近接効果に伴う磁化緩和特性を超伝導体特有の磁束ピンニング現象の観点から考察している。まず、多芯線の磁化及び磁化緩和率のツイストピッチ依存性を測定し、その特性から Anderson-Kim の熱揺動による磁束クリープ理論を用いてマトリックスのピンポテンシャル U_{cp}

を評価している。Cuマトリックスの U_{cp} はCu-0.5 wt% Mnマトリックスのそれより大きく、その J_{cp} 依存性は $U_{cp} \propto J_{cp}^{1/2}$ となり集合的ピンニングに基づく磁束クリープ理論と類似することを示している。また、 J_{cp} と U_{cp} のデータからマトリックスの相互作用距離を評価し、冷間加工されたNbTi線で示されているようなピン密度が低い場合に相当する事を明らかにしている。さらに、Cu-0.5 wt% Mnマトリックスの U_{cp} の J_{cp} 依存性は $U_{cp} \propto J_{cp}$ となり、Y-Ba-Cu-O酸化物超伝導体のそれと類似していることを示している。これらの結果は、超伝導体内の磁束ピンニング現象を介して、それぞれの近接効果に対して機構解明への指針を与えるものである。

第5章では、本研究の総括を行い、本研究で得られた結果と使用目的に応じた多芯線設計の指針との繋がりを例示すると共に、今後の課題について述べている。

論文調査の要旨

非理想第二種超伝導体は、高電流密度で無損失の直流電流を担うことができるために、コンパクトな高磁界コイルや高効率の電力機器用線材などとして期待され、医療用断層撮影装置や高エネルギー物理実験用コイルなどで実用化されている。初期の段階で開発された金属系超伝導線材は1本の超伝導芯の周りを銅などの常伝導金属外層で被った単芯線構造であったために、これを巻線とした超伝導コイルを励磁すると超伝導線材への磁束侵入のなだれ現象による常伝導転移(フラックスジャンプ)が発生し、期待するほどの高磁界が得られなかった。その後、多数の細い超伝導フィラメントが高導電率の常伝導マトリックス中に埋め込まれた構造の多芯線が開発されて磁束侵入時の発熱が抑えられ、超伝導材料特有の不安定性が回避されている。さらに、フィラメント径を小さくすることにより変動磁界の印加による交流損失を低減できるために、金属系超伝導多芯線ではこれをサブミクロンにまで細くした極細多芯線が加工技術の進歩によって開発され、商用周波数の交流電力機器への利用も検討されている。

しかしながら、超伝導極細多芯線では、超伝導線材に期待される高電流密度性と低損失性を共に満たすために超伝導フィラメントの細芯化と同時にフィラメント間の接近も避けられない。その結果、超伝導フィラメントからの超伝導電子のしみ出しのためにマトリックスを介して超伝導フィラメント束全体が弱超伝導性を示す(近接効果)ようになり、多芯線に期待された本来の特性が損なわれることになる。本研究は、超伝導極細多芯線にみられる近接効果に着目し、これを回避するための指針を得るために行われた一連の研究をまとめたものであり、次の諸点で評価できる。

第一に、実用線材として有力なCuマトリックスおよびCu-MnマトリックスのNbTi極細多芯線の磁化をSQUID

磁束計で広い温度範囲で測定し、そのツイストピッチ依存性からマトリックスに流れる近接効果電流の臨界電流密度とNbTiフィラメントの臨界電流密度との関係をはじめて定量的に評価している。その結果、マトリックスの臨界電流密度もその磁界依存性が超伝導フィラメント同様にピン止め効果に関する従来のスケール則で説明できることを示している。さらに、この評価法に基づいて、マトリックスを介した弱超伝導特性の上部臨界磁界や超伝導電子のコヒーレンス長などの超伝導特性を定量的に評価している。また、磁性添加物Mnによるマトリックス弱超伝導性の抑制効果についても明らかにしている。

第二に、前項にあげた典型的な2種類のマトリックスの多芯線材に加えて、従来の研究で使用されているフィラメント径やフィラメント間隔が異なる種々の多芯線材について、マトリックスでのコヒーレンス長と線材パラメータの関係性を定量的に評価している。その結果、近接効果が現れる条件を、コヒーレンス長とフィラメント間隔との間の簡単な関係式で表されることを示している。

第三に、直流磁化の精密測定が可能なSQUID磁束計を用いた近接効果の的確な評価法を確立するために、短尺試料を用いる磁化測定における線材半径方向および線軸方向の磁束の侵入を、臨界電流密度の異方性を考慮した2次元の臨界状態モデルを用いて考察している。その結果、半径方向および線軸方向に試料中心まで磁束が侵入する表面磁界の間の簡単な関係式により、十分長尺と見なせる試料長の条件を与えている。さらに、短尺試料の磁化の試料長依存性を測定して、解析手法の妥当性を示している。

第四に、永久電流モード運転の超伝導コイルや高い磁界均一度が要求される加速器用コイルにおいて問題となる磁界の時間的空間的変動を評価する指針を得るために、近接効果に基づく磁化の緩和現象を磁束クリープ機構と関連付けて論じている。まず、NbTi多芯線の磁化緩和率のツイストピッチ依存性を広い温度領域で測定し、その結果からAnderson-Kimの熱揺動による磁束クリープ理論を用いて、磁化緩和率を決めるマトリックス部のピンポテンシャルの臨界電流密度依存性を求めている。その結果、CuマトリックスおよびCu-MnマトリックスのNbTi多芯線の磁化緩和は、それぞれ、超伝導体の集合的ピンニング理論で説明できる磁束クリープ現象と同様に理解できることを示している。

以上要するに、本論文は、金属系超伝導極細多芯線における近接効果を種々の線材について広い温度領域で高精度に評価することによって、近接効果を抑制する条件を提示すると共に、それによる微弱な磁化緩和現象を定量化して線材設計への指針を与えたもので、超伝導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。