

学位論文審査報告

<https://hdl.handle.net/2324/1654363>

出版情報：九州大学大学院システム情報科学紀要. 4 (1), pp.103-111, 1999-03-01. 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) 梶山 義夫(山口県)
学位記番号 シ情 博甲第39号(工学)
学位授与の日附 平成10年9月30日
学位論文題名 ATMアクセス網におけるQoSを考慮したマルチメディア信号転送技術の研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 立居場 光生
(副査) // // 赤岩 芳彦
// // // 荒木 啓二郎
// // 助教授 谷口 秀夫

論文内容の要旨

本研究は、音声、映像、データ等の各種通信サービスを提供する広帯域通信網実現に向けた、一連の伝送技術に関するものである。広帯域通信網を実現する伝送方式として非同期伝送方式(ATM)が有力である。ATMは、情報を固定長セルにより転送するためハード処理が容易であり、高速化が可能である。また、必要情報のみセル化することから、発生量の異なる各通信サービストラヒックを効率的に転送できる。更に、バーチャルパスの概念を導入することで、容量を伴わないパスが設定可能となり通信網を簡易にかつ柔軟に運用できる。現在、公衆網のATM化を前提に網装置が開発されており、それに並行して、加入者線終端装置、ATMアダプタカード等の端末周辺装置の開発も行われている。

ATM網上のトラヒックは、通信端末としてコンピュータが普及することから、今後急速に、高速化、多様化していくことが予想される。通信網は、これら高速化、多様化したユーザトラヒックを効率的に収容する必要がある。特にアクセス網は、ユーザトラヒックを直接収容するため柔軟なパス運用が要求される。一方、アクセス網を共有するユーザ数は中継網と比較して少ないため、経済性が重要視される。そのためトラヒック収容効率を高めた網運用も必要となってくる。他方、各種通信サービスはトラヒック発生形態や転送要求品質(QoS)が異なるため、効率的かつQoSを考慮した多重化技術の確立が必要となってくる。更に、網がトラヒックの集中により輻輳状態となり、QoSの低下を伴うことが考えられるため、その状態を回避する輻輳制御技術の確立する必要がある。本論文は、上記の必要性を考慮してアクセス網における柔軟で信頼性の高いパス運用、高効率、高品質なトラヒック制御を達成するため、ATMアクセス網構成法とQoSを考慮したマルチメディア信号転送法について研究し、その成果をまとめたものであ

る。アクセス網への多様な要求条件を満足させるため、アクセス網を中継網側の転送系とユーザ網側の分配系に分けて各構成法の研究を行っている。

第一章は序論であり、本研究の背景をまとめ、本研究の目的および本論文の構成を説明している。

第二章では、転送系構成法の研究を行っている。転送系を総伝送路長の低減と経路設定の柔軟性からリング構成とすることを提案している。リング構成の場合、伝送路故障時のユーザトラヒックに与える影響が大きいため高信頼化技術の確立が必須となる。そこで、現用パス設定時に対向伝送路上に予備パスを予め設定し、伝送路故障時に故障端の上流装置で現用パスと予備パスを接続する復旧方法を提案している。提案法は、復旧動作に他装置との通信を必要とせず、簡易に実現できる。また、正常時、復旧時共に、リング内を巡回する多周回セルが発生せず信頼性が高い。更に、切替箇所が一ヶ所であるため、無瞬断切り戻しが容易に実行可能となる。提案法を搭載した伝送装置を試作し、実際のリング網で、その有効性を確認している。

第三章では、分配系構成法について研究を行っている。分配系は、ユーザ網と接続するため経済化が重要であり、複数のユーザで加入者線を共有するパッシブダブルスター(PDS)で構成することが有望視されている。本研究は、ATMセルをPDS上に転送するATM-PDS方式を提案している。提案方式は、ATMセルヘッダの未使用箇所を削除して使用することにより効率的な転送を実現している。セルを分配系の外部に転送する時は、通常のATMセルにヘッダ変換することでATMセルの透過性を維持している。次に、パッシブダブルスターに固有の機能について研究を行っている。パッシブダブルスターは加入者線を複数のユーザで使用するため、下り信号の盗聴や他ユーザへのなりすましに対するセキュリティ強化が必須である。これに関して、簡易で信頼性の高い対策機能の提案を行っている。

第四章では、QoSを考慮した多重化制御法について研究を行っている。多重化制御部にセル待時間を低減させるポーリング制御とバッファ溢れによるセル廃棄を低減する待行列長監視制御を有し、各制御を設定値に応じて適宜自動的に切り替る多重化制御方式を提案している。提案法によれば、QoSを維持するために必要なバッファ量の見積りが可能となり、QoSを満足する多重化特性が得られる。提案法を搭載した映像多重化装置を試作し、有効性を確認している。

第五章では、網輻輳制御法について研究を行っている。音声サービスの様に転送遅延時間に対して要求の高いサービスを提供する場合、網の輻輳発生により転送遅延時間が増加し、QoSが低下することがある。よって、網輻輳後の回復制御を行うより輻輳を発生しない輻輳回避制御が有効である。これを実現するため、トラヒックの単位時間当たりの入力増加量に制限を加える方式を提案している。この方

式を実現するのに必要な網装置及び端末装置の機能を明らかにし、機能を表す各パラメータの値を求めることにより、網内最大転送時間が保証できることを示している。提案法を搭載した伝送装置を試作し、実際の環境下でその有効性を確認している。

第六章は以上の研究をまとめた結論である。

論文調査の要旨

マルチメディア広帯域通信網を構築するための方式として非同期転送方式(ATM)が有望視され、ATMに基づく網および周辺端末装置の研究開発がFiber To The Home (FTTH)の実現に向けて現在行われている。その技術的背景にはギガビット伝送技術の実用化と通信端末としてのコンピュータの普及がある。この通信網の実現には、アクセス網では、高速・多様化したユーザトラフィックを直接取り扱うため柔軟な通信制御が必要であり、かつ経済的観点からトラフィック収容効率の高い網の運用が求められる。他方、音声、映像、データの各メディアに応じてトラフィックの発生形態と要求される通信品質(QoS)が異なるため、QoSを考慮した効率的な多重化方式を確立する必要がある。更に、トラフィックの集中によるスループットとQoSの低下を防ぐため、網の輻輳状態を回避するトラフィック制御技術が必要となる。

著者は、先ず実際の観点からアクセス網を中継網側の転送系とユーザ側の分配系に分け、各系で構成上必要な条件を検討し、その条件を満たすATMアクセス網構成を研究した。次に、QoSを考慮したマルチメディアトラフィック制御を行うため、ポーリング制御と待ち行列長監視制御を併用した多重化法の開発を試みた。更に、監視パラメータとフィードバックループを導入して情報源を予測系として取扱い、網輻輳を実時間で制御する方法を検討した。本論文はこれらの研究結果をまとめたもので、以下の4点で評価できる。

(1) 転送系では、電話の1:1パスや映像、データの1:NおよびN:1のパスに柔軟に対応でき、スター構成より総経路長が短いリング構成が提案されていたが、伝送路の故障による影響が大きいためリング網の高信頼性が課題であった。そこで、2重リング構成にに対向リング上に予備パスを設定し、故障時には故障端の上流装置で現用パスと予備パスを接続する復旧法であるATM-Self-Healing Ring (ATM-SHR)を提案した。これは復旧動作に多岐多重装置(ADM)間の通信を必要としないため自動無瞬断切り戻しが可能で、リング内を巡回する多周回セルが発生しない信頼性の高い方法である。その有効性を試作実験により確認した。本ATM-SHRを来年6月から運用予定の光加入者終端装置(OLT)に実装し、実用での実績を基に世界標準方式とするため国際電気通信連合に提案することを目指している。

(2) 分配系ではユーザ網との接続のため経済性が重視さ

れ、FTTHに向けて複数のユーザで加入者線を共有するパッシブダブルスター(PDS)構成が提案されている。従来のATM-PDS方式はATM層の下位にPDS層を定め、ATMセルにPDS用ヘッダを付与して、PDS層のみで運用するため、PDSセルとATMセルのオーバーヘッドによる転送効率の低下が生じる。これを改善し、より効率的にセル転送を行うため、ATM層とPDS層の両機能を統合したATM-Emulation(ATME)層を定義し、柔軟なパス設定が可能なATM-PDS方式を新たに提案した。この提案方式により転送効率を低下させることなく、QoSを維持した制御が可能であることを試作実験で検証した。この方式はATMフォーラムと国際電気通信連合で承認され、本年10月にG.983として正式に勧告される予定である。

(3) 各メディア毎にセルの遅延と廃棄に対する要求は異なるので、QoSを維持したマルチメディアトラフィック多重化法が必須となる。このため、待ち行列長に閾値を設定し、各入力ポートの待ちセル数がその閾値以下であればポーリング制御を、以上であれば待ち行列長監視制御を行う方法を開発した。ポーリング制御では各メディア毎のポーリング用オフセット値に応じてセルの蓄積を判定してセル遅延を低減化し、待ち行列長監視制御では各メディア毎の待ち行列監視用オフセット値を定め、待ちセル数からそのオフセット値を引いたものを待ちセル数とみなしてポートを選択させ、セル廃棄を低減化する。これらの閾値とオフセット値を各メディア毎に設定する方法と上記制御法を合わせてマルチメディア多重化法として提案した。計算機シミュレーションと試作実験により、本提案方式がマルチメディアトラフィック制御に有効であること、従来のオフセット値を持たない個別の制御に比べ高いスループットが得られることを明らかにした。

(4) インターネットではトランスミッションコントロールプロトコル(TCP)層での網の輻輳を制御しているが、ATM網でIPパケットを転送した場合TCP層だけで輻輳を制御しても高いスループットが得られず、ATM網での輻輳制御が重視されている。他方、網の輻輳により転送遅延が増加し、遅延に厳しいメディアには輻輳の発生を防ぐことが望まれる。そこで、トラフィックの単位時間当たりの入力増加量(情報加速度)とその割合(加速比)を導入し、それらの上限を制御することで輻輳が事前に予測・回避できる方法を提案した。その方法によれば、セル廃棄がないこと、実時間系の固定レート通信と蓄積系の変動レート通信とを統合した網構成が可能なること、QoSを低下させることなく端末間で帯域が公平に使用できること等を計算機シミュレーションと試作実験により明らかにした。

以上要するに、本論文は、QoSを考慮にいれて効率的で信頼性の高いATMアクセス網構成法とマルチメディアトラフィックの多重化法および輻輳制御法を提案し、計算機シミュレーションと試作実験によってそれらの有効性を検証

して、FTTHの実現に向けたATM網における通信技術の基盤を世界の標準化と関連させて与えられたもので、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と認める。

氏名(本籍) James Barry Shackelford (アメリカ合衆国)

学位記番号 シ情 博甲第40号(情報科学)

学位授与の日附 平成10年9月30日

学位論文題名 A Cost/Performance Optimization Methodology for Digital Systems (デジタルシステムのコスト/性能最適化手法)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 安浦 寛人

(副査) // // 山下 雅史

// // // 雨宮 真人

論文内容の要旨

マイクロプロセッサは、デジタルシステムの基本構成要素として広く利用され、デジタルシステムに欠くことのない重要な部品となっている。最近のデジタルシステムでは、マイクロプロセッサがメモリや他の回路とともに1つのシリコンチップ上に集積されるようになってきている。しかし、論理合成技術が常識的に用いられる現在でも、マイクロプロセッサを応用に合わせて最適に合成して利用する技術は確立していない。本論文は、システム設計者にコストと性能の最適化の自由度をどこまで広く与えられるかという問題に取り組んだものである。本論文では、(1)データパスのビット幅やレジスタ数を自由に変更できるプロセッサとその合成環境の構築、(2)対象とする問題に対するアルゴリズムを直接ハードウェアで実現する手法を提案する。

(1)に対しては、プログラミング言語の拡張、リターゲッタブルコンパイラ技術、プロセッサ合成技術を組み合わせ、新しい応用向けに最適化できるマイクロプロセッサとそれを用いたシステムの構成法を提案する。データパス幅を変更することで、システム内のデータRAMのサイズを大きく削減できることを示し、システムのコストを20%以上削減できることを実証する。本研究結果は、システムのコストをプロセッサだけでなくRAMやROMも合わせて総合的に評価し、システム全体の最適化を行う手法の提案であり、今後のシステムLSI時代の重要な設計手法であるといえる。(2)に対しては組合せ最適化などに汎用利用できる遺伝的アルゴリズムを効率よく直接実行できるハードウェアの構成法を示す。これは、書き換え可能な論理(FPGA: Field Programmable Logic Array)の性質

をうまく活用し、NP完全問題に対して通常の計算機上でソフトウェアで計算するのに対し、2000倍以上の高速化が出来ることを示す。

本論文は、7章からなっている。まず、1章では、本研究の背景を述べ、民生用機器、電子情報産業、計算機科学の3つの観点から本研究の目標を議論して、その最終目標を「コストと性能の最適化に対してどれくらい大きな自由度をシステム設計者に与えることが可能か」とする。

2章では、上記(1)の問題に対する基本的な設計手法の概要を述べる。プロセッサのアーキテクチャを設計する論理合成ツールTsutsuji、データパス幅の変更に対応できるプログラミング言語Valen-Cとそのコンパイラ、基本となる構造可変プロセッサアーキテクチャASAPを紹介し、これらを統合したSatsukiと名付けた設計手法およびその設計環境を説明する。この環境を用いて、応用プログラムに対してシステムの設計を最適化することが可能となる。

3章においては、開発した論理合成ツールTsutsujiおよびプログラミング言語Valen-Cとそのコンパイラについて詳細な説明を行い、原理と実現方法を述べる。Tsutsujiはグラフィックインターフェースを備えたユーザーフレンドリーな論理合成システムとして商品化もなされ、現在の商用システムにも影響を与えている。Valen-Cとそのコンパイラは、データパス幅を自由に決定する本設計手法の中で、ソフトウェアとプロセッサの構成の間の独立性を確保するために重要である。Valen-Cでは、プログラマに各変数の有効ビット幅を宣言させ、コンパイラがこの情報を利用して計算精度を保証する。本設計手法では、プロセッサの構成を変更するため、コンパイラはリターゲッタブルである必要がある。Valen-Cに対してリターゲッタブルコンパイラを設計した。

4章においては、構造可変プロセッサASAPのアーキテクチャの詳細を述べる。データパスの構成、データパス幅を任意に指定できるようにするためのプロセッサ合成の工夫、入出力や命令セットなどを説明する。

5章では、SatsukiとASAPを用いたシステム最適化問題を定義し、データパス幅を主な変更パラメータとしてシステムの最適化を行う。データパス幅を変更することで、プログラムの計算精度を変えずに、データRAMの大きさや命令ROMの大きさを大幅に変化させることができることを示す。この性質から、プロセッサ、ROM、RAMを合わせたシステム全体の面積とプログラムの実行サイクル数の間にトレードオフの関係が存在することが示される。この関係を利用して、コストと性能の最適化が図れることを示す。

6章では、論理合成やレイアウト合成でしばしば現れる組合せ最適化問題について、その近似的な最適解を一般的に求めるアルゴリズムとして利用される遺伝的アルゴリズム(GA)に対し、直接ハードウェアで実現する手法を提案

する、実際にFPGAを用いたプロトタイプを作成し、論理合成を例題としてその性能を評価する。規模の小さな問題に対しては、通常のソフトウェアに比べて千倍以上の高速化が期待できることを示す。

7章で本論文全体のまとめを行うとともに、今後の課題を述べる。

論文調査の要旨

1970年代に発明されたマイクロプロセッサは、デジタルシステムの基本構成要素として広く利用され、多くの電子システムの重要な部品となっている。最近の集積回路技術の進歩により、マイクロプロセッサは、メモリや他の回路とともに1つのシリコンチップ上に集積され、システムLSIやシステム・オン・シリコンと呼ばれる大規模な集積システムを構成するようになってきている。しかし、論理合成技術が常識的に用いられる現在でも、マイクロプロセッサを応用に合わせて最適に合成して利用する技術は確立しておらず、汎用のプロセッサが種々の分野に利用されている。本論文は、システム設計者に、それぞれの応用に適したマイクロプロセッサや専用回路を簡単に設計できる手法を与えることで、システム全体のコストと性能の最適化を図る手段を与えたものである。具体的には、(1)データパスのビット幅やレジスタ数を自由に変更出来るプロセッサとその合成環境の構築、および(2)一般的な最適化手法の一つである遺伝的アルゴリズムを直接ハードウェアで実現する手法の提案をしてそれぞれの効果をまとめている。

(1)に対しては、プログラミング言語の拡張、リターゲットブルコンパイラ技術、プロセッサ合成技術を組合せて、新しい応用向けに最適化できるマイクロプロセッサとそれを用いたシステムの構成法を提案している。データパス幅を変更することで、システム内のデータRAMのサイズを大きく削減できることを示し、システムのコストを20%以上削減できることを実証しており、次の点で評価できる。

第一に、データパスのビット幅やレジスタ数を自由に変更出来るプロセッサとその合成環境を構成する基本的なフレームワークを提案している。具体的には、プロセッサのアーキテクチャを設計する論理合成ツールTsutsuji、データパス幅の変更に対応できるプログラミング言語Valen-Cとそのコンパイラ、基本となる構造可変プロセッサアーキテクチャASAPを構築し、これらを統合化したSatsukiと名付けた設計手法およびその設計環境を実現している。この環境を用いて、アプリケーションに対してシステムの設計を最適化することが可能となることを示している。

第二に、論理合成ツールTsutsujiおよびプログラミング言語Valen-Cとそのコンパイラについて実現手法を検討し、その原理と実現方法を提示している。Tsutsujiはグラフィックインターフェースを備えたユーザーフレンドリーな論

理合成システムとして商品化もなされ、現在の商用システムにも影響を与えている。Valen-Cとそのコンパイラは、データパス幅を自由に決定する本設計手法の中で、ソフトウェアとプロセッサの構成の間の独立性を確保するために重要な考え方であり、今後のシステムLSI設計手法に大きな影響をあたえる概念となっている。

第三に、構造可変プロセッサの例として、システム設計者が簡単にカスタム化できるASAPアーキテクチャを提案している。データパスの構成、データパス幅を任意に指定できるようにするためのプロセッサ合成の工夫、入出力や命令セットなどを示している。

第四に、SatsukiとASAPを用いたシステム最適化問題を定義し、データパス幅を主な変更パラメータとしてシステムの最適化を行う手法を提案している。データパス幅を変更することで、プログラムの計算精度を変えずに、データRAMの大きさや命令ROMの大きさを大幅に変化させることができることを示した。さらに、プロセッサ、ROM、RAMを合わせたシステム全体の面積とプログラムの実行サイクル数の間にトレードオフの関係が存在することを示して、コストと性能の最適化を図る手法を提示している。

本研究成果は、システムのコストをプロセッサだけでなくRAMやROMも合わせて総合的に評価し、システム全体の最適化を行う手法の提案であり、今後のシステムLSI時代の重要な設計手法であるといえる。

(2)に対しては、組合せ最適化などに汎用に利用できる遺伝的アルゴリズムを効率良く直接実行できるハードウェアの構成法を示している。これは、書き換え可能な論理(FPGA: Field Programmable Logic Array)の性質をうまく活用し、NP完全問題に対して通常の計算機上でソフトウェアで計算するのに対し、高速に計算出来ることを示している。実際にFPGAを用いたプロトタイプを作成し、論理合成を例題としてその性能を評価している。規模の小さな問題に対しては、通常のソフトウェアに比べて千倍以上の高速化が期待できることを示している。

以上を要約すると、本研究は、システム設計者にコストと性能の最適化の自由度をどこまで広く与えられるかという問題に取り組んだものであり、データパスのビット幅やレジスタ数を自由に変更出来るプロセッサとその合成環境の構築、および、遺伝的アルゴリズムを直接ハードウェアで実現する手法を提案したもので、情報工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(情報科学)の学位論文に値すると認める。

氏名(本籍) 柴山 耕三郎(長崎県)
学位記番号 シ情 博甲第41号(工学)
学位授与の日附 平成10年9月30日

学位論文課題名 三軸直交形CO₂レーザー発振器と三次元
レーザー加工機の実用化に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 前田 三男

(副査) // // 渡辺 征夫

// // // 岡田 龍雄

論文内容の要旨

自動車産業やOA機器業界を中心にコスト削減や生産性向上を目的として、最近では大量に三次元レーザー加工機が導入されている。これは、試作時や準量産時のトリム金型の代わりに三次元レーザー加工機を用いることで、試作費用・時間の節約が図れるばかりでなく、多品種少量化が進んだ本生産に対しても迅速に対応できるからである。

三次元レーザー加工機を実用化するためには、まずそのもっとも重要なコンポーネントである高出力CO₂レーザー発振器の効率向上、長時間安定性、ランニングコストの低減などが求められる。また、加工ヘッドと被加工物（ワーク）との間の位置関係について、より高度のセンシングとリアルタイムの制御技術を必要とする。

本論文は、高出力の横方向励起三軸直交型CO₂レーザー発振器のガス封じ切り運転を実現させるための動作条件の研究を行うとともに、それを用いたセンサー付きの三次元レーザー加工機を開発し、種々の材料に対する最適加工技術の研究を行ったものである。

第1章は序論で、本研究の背景、目的、概要を述べている。

第2章では、レーザー作用の根幹をなす安定な放電を得るための電極構造・材料の最適化について述べたあと、各種のガスが運転中に放電によりどのように変化するかをガスクロマトグラフ分析装置を用いて追跡しながら、三軸直交形CO₂レーザー発振器の封じ切り運転の達成について述べている。電極としては、先端を丸めたモリブデン棒状電極で、かつ放電部分を制限するためにセラミックの円筒を外周にはめこんだものが最適であった。また、吸湿剤を挿入して、発振器の容器内壁などからの微量のH₂Oを吸着させ、H₂O濃度をある限度以下に押え、レーザー出力の減少がとまり、封じ切り運転が可能になることがわかった。さらに、H₂Oは放電により解離したCO₂の再結合を促して、CO₂分子数の減少をくい止める作用をもつが、それ以上にCO₂の励起を妨げるので、レーザー出力を低下させることを明らかにした。

第3章では、横方向励起三軸直交形CO₂レーザー発振器の封じ切り運転時に得られる利得のガス組成・ガス種類依存性および温度依存性について述べている。CO₂とN₂およびHeまたはArを適当な組成比に設定してレーザー媒質として用いる場合、COをCO₂と同程度添加しても、利得はあまり変わらないことがわかった。また、HeをArで置換する

ことにより、Heを用いる場合よりも高い利得が得られるので、高価なHeを多量用いなくても、Arを一部使用することにより、横方向励起三軸直交形CO₂レーザー発振器を運転できることを明らかにした。

第4章では、横方向励起三軸直交形CO₂レーザー発振器の封じ切り運転時の出力について述べている。この章では、レーザー出力の観点から、横方向励起三軸直交形CO₂レーザー発振器において、CO₂、CO、N₂、He、Arなどのガスの種類やガス組成を変化させ、ガス組成やガスの種類と出力効率との関係を実験的に明らかにするとともに、その出力に与える影響について考案を加えた。そして、このタイプのCO₂レーザー発振器はCO₂、CO、N₂、He、Arの混合ガスを用いて、CO₂:CO:N₂:He:Ar=1:0.5:9:5:5の混合比のときに一番発振効率が高く、封じ切りで19%の高効率を達成することを示した。

第5章では、三次元レーザー加工機の機械構造とセンサーを用いた系の制御について述べている。機械構造としては、ガントリー形機械構造の最適設計のために、実加工において最大10m/minの速度で正方形を切断すると仮定して、加減速時の加工ヘッド先端部の振動のシミュレーションを行ない、急激な加減速がある正方形のコーナー部に最大0.3mmの片振幅の過渡振動が現れる程度の剛性を持つように設計した。その際、切断時の加工ヘッドの姿勢をワークに対してほぼ垂直にし、加工ヘッドとワーク間のギャップを最適値に設定・制御する必要があり、これらを容易にするための非接触センサーを開発した。センサーの課題としては、鋼板、樹脂、プラスチックなどほとんどの材料に対して適用できること、距離測定のパラツキが少ないこと、切断加工中に発生する火花に邪魔されることなく距離の測定が可能で、設定値からはずれた場合にはリアルタイムで補正制御ができること、軽量で加工ヘッドに取り付けやすく、旋回や斜め姿勢時に邪魔にならない構造であることなどがあり、これらを実現することが出来た。

第6章では、実用化した三次元レーザー加工機を用いて実際に加工を行ない、良好な加工品質を保ための加工条件および生産性を向上させるための高速加工技術について述べている。三次元レーザー加工機では、加工ヘッドがワークに対して直角の姿勢を保持できない場合や加工ヘッドとワーク間の距離が最適値を外れた場合でも、パーニングなどによる切断不良が起きないように、斜め切断の裕度、距離可裕度などを把握する必要があり、また、生産性を向上させるために、高速加工技術の開発も重要である。そのため、斜め切断裕度と加工ワークの板厚との関係、斜め切断裕度と加工速度との関係、斜め切断裕度とレーザービームの連続出力とパルス出力との関係、同じく距離可裕度と面粗度との関係を明らかにするための実験を行ない、これらの裕度を上げる方法について検討を行なった。また、高速切断のために、三次元ヘッドの特長を生かしたヘッドの

前・後方傾斜状態での切断を試み、加工時間の短縮化について検討をした。

第7章では本研究で得られた成果を総括し、今後の課題を明らかにしている。

論文調査の要旨

レーザー光は時間・空間領域のいずれにおいても非常に制御性が高く、集光点では従来にない極めて高いエネルギー密度が得られる。そのためCO₂やNd:YAG等の高出力赤外線レーザーは、産業界でも切断・溶接・表面改質等の物質プロセスに広く利用されている。特に最近では、平板ではなく三次元の立体的部品を自由に加工できる三次元レーザー加工機が、自動車工業を筆頭に多数生産ラインに導入され、生産性の大幅な向上に寄与している。

三次元レーザー加工機を産業レベルで実用化するには、まずもっとも重要なコンポーネントであるkW級のCO₂レーザーの高効率化と、長期にわたる信頼性の確保とランニングコストの低減が重要である。それと同時に、リアルタイムで位置ずれの補正ができるセンサーを用いた制御システムの性能向上と、種々の材料に対する加工条件の最適な設定が実用化の鍵を握っている。

本論文は、三軸直交形CO₂レーザーの放電条件、ガス分圧比等が発振効率やガス寿命に与える影響を実機において詳細に検討し、ガス封じ切り運転を実現するとともに、センサー付きの三次元レーザー加工機を開発し、その最適加工条件を究明したものである。ここで三軸直交形とは光軸、放電電流の流れ、およびガスの流れの三軸がお互いに直交するような構造のレーザーで、もっとも高出力化が可能な方式とされている。

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)三軸直交形CO₂レーザーにおいて、放電ガス中のH₂OはCO₂の以下準位の緩和を促す反面、上位準位の緩和をも促しレーザー出力を下げる。長期の封じ切り運転にあたっては、H₂Oの存在がガス劣化をまねく最大の原因となっていることを明らかにして、その除去により安定な封じ切り運転を実現した。
- (2)通常のCO₂レーザーはHe/N₂/CO₂の三種混合ガスを用いる。その際、穏衝ガスであるHeを安価なArに置き換えると、レーザー利得が上昇することをはじめて見出した。
- (3)CO₂レーザーにおいて混合ガスの組成比が発振出力に与える影響を詳細に調べ、その結果CO₂:CO:N₂:He:Ar=1:0.5:9:5:5の時、もっとも高い効率を得られることを示し、最高19%の発振効率を達成した。
- (4)ガントリー形機械構造を持つ三次元レーザー加工機を試作し、加工ヘッドを対象によってリアルタイムに制御するための非接触位置センサーを開発して、加工精度の向上を達成した。このセンサーは、加工ヘッドとワークの

間のギャップを最適値に保つと同時に、ヘッドをワークに対して常に垂直に保つように制御するために用いられる。

(5)開発した三次元レーザー加工機を用いて種々の材料を実際に加工し、その加工条件の最適化と加工速度の向上について検討した。生産性を高めるためには、ヘッドワーク間のギャップ長が最適値をはずれたり、その垂直性が失われた場合に対して、距離や角度に対する裕度をどの程度にとるかが重要で、実際の材料について検討を行ない、良好で高速の加工を行いうる条件を明らかにした。

以上要するに本研究は、三軸直交形CO₂レーザーの高効率化と長期封じ切り運転の実現をはかり、種々の加工制御技術を導入して、生産性の高い三次元レーザー加工機の実用化に成功したもので、レーザー工学上価値ある業績である。よって博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 山田 富久(京都府)
 学位記番号 シ情 博乙第31号(工学)
 学位授与の日附 平成10年9月30日
 学位論文題名 IGBTの高耐圧化に関する研究
 論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 黒木 幸令
 (副査) // // 鶴島 稔夫
 // // // 二宮 保

論文内容の要旨

パワー半導体デバイスは電気エネルギーの変換性能や効率を左右するキーデバイスであり、その進歩がパワーエレクトロニクスの発展を支えてきた。また、パワー半導体デバイスを用いたインバータ制御技術の進歩は、空調での省エネルギー化に貢献し、電気自動車を実現させ、更には風力や太陽光等のクリーンなエネルギー源の実用化を可能として、環境問題の改善に大きく寄与してきた。しかし、このような社会的な要請は21世紀に向けて益々強くなり、これに応えるためのパワー半導体デバイスの開発課題は山積している。

パワー半導体デバイスに対する市場要求の一つに、駆動エネルギーの低減とスイッチング性能改善のための電圧駆動方式化(MOSゲート化)がある。既に低耐圧領域ではパワーMOSFETが、中耐圧領域ではIGBTがそれぞれBJTにとって代わりつつあるが、3.3~4.5kVの電鉄用途などの高耐圧領域では依然として電流駆動方式のGTOが使用されている。GTOはラッチアップ素子のため、高耐圧化には適しているがスイッチング性能が劣り、大きな保護回路が必要となる。この保護回路による電力損失が全損失の70%を占めるなど、GTOは応用上の多くの問題を抱えており、高耐圧領域でもGTOに代わるMOSゲート素子の開発要求が非常に強くなってきた。

本研究の目的は、このような市場要求に応え、総合電力損失をGTOの1/2に低減した、耐圧4.5kVの高耐圧IGBTモジュールを実現することにある。このため、IGBTの構造と電気特性との関係を原理的に解明し、高耐圧に最適なIGBTの新しい構造を開発した。また、IGBTや、これと対で用いられる還流ダイオードの、高耐圧での応用に伴う破壊現象を解明し、応用可能な耐量を実現するための改善対策を提案することも目的とした。

本論文は、このような高耐圧IGBTモジュールの開発のために行った、チップの構造に関する研究と、IGBTの制御法に関する研究をまとめたもので、6章から構成されている。

第1章は序論で、本研究の背景、目的、研究手順および、本論文の各章の構成を述べた。

第2章では、本研究の目標と課題について論じる。まずGTOの電力損失に関する考察より、本研究開発の目標は「GTOの1/2の総合損失を有する、耐圧4.5kV系IGBTモジュールの開発」であることを示した。次に、IGBTの構造パラメータと特性との関係を論じ、高耐圧化のための研究開発の指針を提示した。更に、中耐圧IGBTの開発の過程で達成された成果と残された問題を明らかにし、高耐圧化のために新たに発生する課題は、①高電圧阻止能力の実現、②損失の低減、および③高耐圧化に伴う破壊の改善、であり、このために、「チップの内部構造の研究」と、「IGBTの制御方法の研究」が必要であることを示した。

第3章では、IGBTの内部構造の要素の1つである、 n^+ バッファ層の機能について論じる。ここで、同層を有するPT（パンチスルー）形IGBTと、同層のないNPT（ノンパンチスルー）形IGBTの比較研究を行い、後者の場合、電圧阻止能力（漏れ電流特性）が劣り、これを改善すると電力損失が大幅に増大することを示した。また、NPT-IGBTのターンオン時の特異現象についても研究を行い、この現象は正孔のドリフト速度の低下によることを解明した。これは高耐圧化に伴って顕著になる問題で、この面でもNPT-IGBTは高耐圧用途には不適であることを示した。

第4章では、IGBTの内部構造として重要なコレクタ層の機能について論じ、最適な構造の提案と実証を行う。コレクタ層の諸構造と特性の関係をシミュレーションと実験で検証し、電圧阻止能力の面ではSC（コレクタショート）構造が優れているが、同構造には内臓ダイオードの逆回復破壊の問題があること、およびSC構造の代案として新規に提案した p^+/p^- 構造が、電力損失を含め総合的に最善であることを示した。ここで、SC構造の破壊に関して詳細な研究を行い、メカニズムを解明し安全動作領域を提示した。最後に p^+/p^- 構造で4.5kVのIGBTモジュールを試作し、本研究の目標とするGTOの1/2の総合損失を有する素子を実現した。また、 p^+/p^- IGBTの作成方法についても述べた。

第5章では、高耐圧応用に伴うIGBTとダイオードの破

壊現象の研究を行い、チップの改善とIGBTの駆動制御法の両面より改善策の提案を行う。まず、還流ダイオードの逆回復破壊は、電流集中による衝突電離キャリアの発生に起因し、チップ周辺部のライフタイムを中心部より短くすることで改善されることを示した。次に、IGBTチップの自己保護のための電流センスセルの改善について論じ、センスセルの V_{th} を主セルに比べて高くすることにより、ターンオン時の電流ピーク発生の問題が改善されることを示した。最後に、ターンオフ di/dt によるサージ電圧破壊対策として、ターンオン期間中にゲート抵抗を切り替えて di/dt が抑制できる新規のドライブ方式を提案し、シミュレーションと実測により効果の確認を行った。これらの対策により、IGBTモジュールを高耐圧領域へ応用する上での障害が解消され3.3~4.5kVの領域でGTOをIGBTで置き換えることが可能となった。

第6章では、本研究の総括を行うとともに、今後の課題について述べた。

論文調査の要旨

地球温暖化防止対策の一つとして、エネルギーを無駄なく活用することが求められ、多くの電力・電気機器で、パワー半導体デバイスを用いた高効率のインバータ制御方式が用いられるようになってきている。

パワー半導体デバイスには多くの種類があるが、大電流・高電圧領域にはGTO、中電流・中電圧領域にはIGBT、大電流・低電圧領域にはMOSFETが主に用いられている。GTOは消費電力の大きい駆動回路を必要とし、MOSFETは耐圧を高くしようとするとオン抵抗が高くなるという問題がある。そこで、MOSゲート入力駆動で制御回路の消費電力を少なくし、しかも基板内BJT構造によりオン抵抗を低くできるという特徴を持つIGBTがパワーデバイスとして有望であり、その高耐圧化が期待されている。しかし、従来のIGBTは、オン抵抗を下げるためBJTによる伝導度変調効果を大きくしようとすると、少数キャリアの蓄積が進みスイッチング時間が長くなったり、高電圧が印加されるオフ時の高温漏れ電流が増えて熱暴走を起こし易くなるという問題を抱えていた。

本論文は、IGBTおよびそれと対で使用される還流ダイオードのデバイス構造と駆動方式について詳細な検討を行って、上記問題点を克服できる新しい提案を行ない、GTOに勝る4.5kV級高耐圧IGBTパワーモジュールを実現した成果をまとめたものである。

本研究により得られた成果は以下の点で評価できる。

- (1)IGBTの内部構造要素の一つである n^+ バッファ層の機能についてシミュレーションと実験により詳細に解析して、逆耐圧を高め、電力損失を低減し、ターンオフ特性を改善するには、 n^+ バッファ層の使用が有効であることを明らかにした。

- (2) オフ時のコレクタからの正孔注入効率を低減でき、また漏れ電流による熱暴走を抑制できるSC(コレクタショート)構造IGBTの電気特性を解析して、逆耐圧は優れているものの、誘導負荷インバータ回路でのリカバリー動作時にベース・ドリフト層間寄生ダイオードに過電流が流れ、デバイスが破壊する問題があることを見いだした。
- (3) 上記リカバリー時の破壊を伴わない高耐圧IGBTとして、正孔の注入効率を制御し易い p^+/p^- コレクタ構造を提案して、シミュレーションと試作を行い、ターンオフ時の正孔電流減衰時間を短くできるとともにオフ時の消費電力とオン時の飽和エミッタ・コレクタ間電圧も低減できることを確認し、その結果をもとに4.5kV耐圧のデバイスを実現した。
- (4) 還流ダイオードのリカバリー時の破壊は、電流が集中する部位での衝突電離によるキャリア発生に起因していることを明らかにし、アノード周辺部のライフタイムを中心部より短くして電流集中部位を無くし高電圧での di/dt 耐性について従来比4倍の改善を実現した。
- (5) チップ破壊防止のための過電流検知に用いるIGBTセルのしきい電圧を主セルに比べて高くすることにより、両セル間のゲート配線抵抗差により検知セルに現れることがある過渡ピーク電流発生を防止し、セル配置法によらない安定した過電流破壊防止制御を可能とした。

以上要するに、本研究は、IGBTと還流ダイオードの動作を詳細に解析して、高耐圧化に適した新しいデバイス構造と、それらが破壊しないゲート駆動回路方式を提案し、4.5kV級高耐圧IGBTモジュールの実用化に成功したもので、電子デバイス工学上価値ある業績である。よって本論文は博士(工学)の学位に値するものと認める。

氏名(本籍) 佐藤 秀樹(愛知県)
 学位記番号 シ情 博乙第32号(工学)
 学位授与の日付 平成10年11月10日
 学位論文題名 オブジェクト指向データモデルの拡張に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 牧之内 顕文
 (副査) " " 日高 達
 " " " 牛島 和夫

論文内容の要旨

本研究では、オブジェクト指向データベースの基礎となるオブジェクト指向データモデルに含まれる種々の直観的概念に関する形式化の研究を行う。また、データベースが取り扱う情報の種類の多様化や応用分野の拡大が進みつつあり、それに対応するためにデータベースにおいても情報構造や操作に関するより豊かな表現能力が求められてくる。

この点より、本研究では、多面性を有し、その生存期間中に進化するオブジェクトを可能とする多面的データベースの実現に向けたオブジェクト指向データモデルの拡張に関する研究を行う。

第1章では、研究の目的、背景、本研究で扱った問題点及び課題、関連研究、本論文の構成と概要を述べる。

第2章では、形式文法を基礎とするオブジェクト指向データモデルGROOMを提案する。GROOMは、先端的なデータベース応用のために、強力で統一的な記述の枠組みを提供する。GROOMでは、オブジェクトの構造は生成規則を使ったクラススキーマとして定義され、オブジェクトの情報はクラススキーマ上の導出木として表現される。複合オブジェクトと複合値は、排他構成子、組構成子、集合構成子、を使って構成される。上位/下位クラススキーマ関係を通じた属性定義の継承と再定義は、生成規則間の関係に基づき定義される。さらに、属性の再定義は、排他特殊化、組特殊化、要素数特殊化、オブジェクトドメイン特殊化、値特殊化に分類される。また、オブジェクトを操作するために、個別のオブジェクトを対象とする関数の集まりから成るGROOM/PLが提供される。GROOMは値指向のデータモデルの特徴を備えるとともに、オブジェクト指向データモデルの構造的条件(複合オブジェクト、オブジェクト識別性、クラス、継承・再定義など)を満足する。

第3章では、オブジェクト指向データモデルGROOMを拡張し、メソッドの概念を取り入れたGROOM-IIを提案する。GROOM-IIでは、オブジェクトの情報構造を定義するクラススキーマにメソッドドメインを導入する。メソッドドメインはメソッドの実行結果の戻り値の集合であり、メソッドは属性文法により定義される。このもとで、メッセージは属性文法による解析対象となる文であり、メソッドはメッセージである文の解析を行うことにより実行される。上位/下位クラススキーマ関係を通じたメソッド定義の継承と再定義は、上位クラススキーマにおいてメソッドを定義する属性文法をAG1、下位クラススキーマにおいてメソッドを定義する属性文法をAG2とすると、AG1とAG2の文の生成能力と変換能力を使って定義される。同様に、メソッドの多相性も各メソッドを定義する属性文法が持つ文の生成能力と変換能力を使って定義される。GROOMにオブジェクトの振舞いを取り入れたGROOMIIは、より強力なデータモデルとなる。

第4章では、オブジェクトの多面的な性質の表現とその動的な獲得・喪失を可能とする多面的オブジェクト指向データモデルMAORIを提案する。MAORIでは、実世界の实体は複数のアスペクトを持つオブジェクトとしてモデル化される。オブジェクトの各アスペクトはクラスのインスタンスとして表現され、オブジェクトはこれらの各クラスに所属する。オブジェクトが持つアスペクトの集合には、同一のクラスが定義するアスペクトが複数存在してもよい。

このため、オブジェクト内では、各アスペクトはそれを定義するクラスの名前とこのクラスのインスタンスである複数のアスペクトの個々を特定する添字により識別される。MAORIでは、オブジェクトのアスペクトの集合に関する制約はオブジェクトスキーマにより記述される。また、アスペクトの構造の再編成、データの機密保護、論理的データ独立性の確保のため、オブジェクトのアスペクトの集合上に定義される一種のビューである仮想アスペクトの概念を提案する。

第5章では、多目的オブジェクト指向データモデルMAORIに基づくデータベースにおけるオブジェクトマイグレーションの枠組みを提案する。本枠組みでは、オブジェクトマイグレーションはオブジェクトが持つアスペクトの集合の更新として定義され、実世界における実体の意味を反映したオブジェクトマイグレーションを実現するため、アスペクトの集合に対する多面性制約（静的制約、遷移制約など）を管理する。静的制約は、オブジェクトスキーマを使って記述される。また、遷移規則を導入して、遷移制約を記述することを提案する。これらの記述はともに宣言的であり、それにより記述のモジュール性を高めている。さらに、記述能力も十分高い。一方、遷移規則の集合によりオブジェクトのアスペクトの集合から導出可能であり、かつオブジェクトスキーマを満たすアスペクト集合形式を基に、制御機構は実世界において意味のない、あるいは誤ったオブジェクトマイグレーションの生起を回避する。

第6章では、結論として本研究の成果をまとめ、今後の課題について言及する。

論文調査の要旨

関係データベースは、関係代数に基礎付けられた関係データモデルに基づくものとして提唱された。一方、プログラミングの実践的方法論として様々な人達の種々の提案を統合して出来上がったオブジェクト指向プログラミング方法論とそれを具体化したプログラミング言語を基に発展したオブジェクト指向データベースは、その基礎となるデータモデルの形式化についての研究が遅れていた。

近年、関係データモデルにならった代数的モデル論の研究が行なわれ、それに基づくオブジェクト指向データベースの標準化作業も開始され始めた。本研究は、この代数的モデル論のアプローチとは異なり、オブジェクト指向データベースのデータモデルを型式文法で基礎付けようとするものである。さらに、本研究では、オブジェクト指向データモデルでモデル化するオブジェクトの世界を、その形が時間的に変化するオブジェクトの世界に拡張するため、多目的オブジェクト指向データモデルを提案している。

まず、著者は、オブジェクト指向データベースのオブジ

ェクトの型（クラススキーマ）を文脈自由方法を使って表現することを試みている。ここでは、属性を文脈自由方法の非終端記号に、属性値とオブジェクト識別子を文脈自由文法の終端記号に対応付け、インスタンス・オブジェクトはこの文脈自由文法上の導出木として表現する。この考えに基づき、オブジェクト指向データモデルの構造的要件である複合オブジェクト概念と継承・再定義概念の形式化を行なっている。これは、オブジェクト指向データモデルの形式化の1つの方向を示している。さらに、導出木を更新・検索するためのオブジェクト操作言語の設計を行なっており、新しいデータベース操作系を提案している。

次に、著者は、メソッドの形式文法による形式化を行なっている。この形式化では、メソッドを属性文法で記述し、それを起動するメッセージは、その属性文法で生成される文として定義する。メッセージはメソッドに対応する属性文法で解析されることにより実行される。この形式化により、オブジェクトのメソッドとして、自然言語に近い表現を許す属性文法を与えれば、自然言語に近い文でオブジェクトのメッセージを書くことが可能となる。このようなメソッドの属性文法による形式化は、従来のオブジェクト指向データモデルでは考えられなかったユニークなものでオブジェクト指向データモデルの形式化に新しい視点をもたらしたものと評価できる。

さらに、著者は、オブジェクトの型の時間的変化の表現を可能とするため、多目的オブジェクト指向データモデルを提案している。従来のデータモデルでは、オブジェクトの属性値の時間的な変化を許すが、型の変化は許していなかった。提案されたデータモデルでは、オブジェクトの型をアスペクト呼び、1つのオブジェクトが、異なる、または同一のアスペクトを複数持つこと、さらにこのアスペクトを動的に獲得・廃棄することが可能である。オブジェクトが同一のアスペクトを複数持つ機能は、従来のデータモデルでは出来なかったことである。一方、オブジェクトが持つアスペクト集合の変更に意味的制約を与えるための枠組みを示している。この枠組みでは、オブジェクトが持つことを許される可能なアスペクトを限定する静的制約とアスペクトの変化を限定する遷移制約とに分類し、それぞれを表現する規則形式を提案している。さらに、これら制約を制御する機構を提示している。

以上を要約すると、本研究は、形式文法を基礎として、オブジェクト指向データモデルの形式化を行なうとともに、オブジェクト指向データモデルを拡張し、オブジェクトの多目的な性質の表現とその動的な獲得・廃棄を可能とする多目的オブジェクト指向データモデルを提案したもので、データ工学上価値ある業績といえる。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。