九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

学位論文審査報告

于，海波

趙，一權

上田，清志

Saleh, Kamal Haridy Aly

他

https://hdl.handle.net/2324/1563895

出版情報：九州大学大学院システム情報科学紀要. 15 (2), pp.105-171, 2010-09-24. 九州大学大学院システム情報科学研究院
バージョン：
権利関係：

学 位 論 文 審 査 報 告

氏　　名　　于　　海　波
学 位 記 番 号　　シ情　博甲第 377 号（工学）
学位授与の日付　　平成 21 年 12 月 22 日
学位論文題名　　SEMANTIC MYPORTAL BASED INFORMATION SHARING SYSTEM ARCHITECTURE
（セマンテックマイポータルに基づく情報共有システムアーキテクチャー）

論文調査委員
（主　査）　九州大学　准教授　峯　　恒　憲
（副　査）　〃　　教　授　長谷川　隆　三
　　〃　　〃　　谷　口　倫一郎

論 文 内 容 の 要 旨

In the modern information age, personal computers have become popular and more and more important in our daily life. At the same time, Internet technology has been accepted widely and the Web has made our daily life more and more convenient, while transforming itself into a huge universal repository of data and information on a world scale. On the other hand, in tandem with the convenience which has been introduced by the Web and the PC, users are suffering from the problem of information overload, not only for Web information, but also for their personal computer information. The old problem of lacking information has been transformed into the new problem of the difficulty of finding relevant information in the jungle of information. Although search engines have used many methods trying to provide accurate search results to users, they still provide a lot of irrelevant information and fail to discover some relevant information at the same time. The main reason is that the current Web mainly targets human consumption for browsing, selecting, retrieving and merging, and the contents are not understandable by machines. Recently, new technologies for enabling precise and automatic machine processing such as semantic Web and Web services have been emerging and there are a lot of researches trying to apply these new technologies to PC information retrieval systems. However they address only problems concerning certain phases or certain aspects of the whole life cycle of PC information sharing. In ordernot to lose the semantics attached by them, we need to consider about the interfaces concerning the whole life cycle of PC information sharing from the architecture point of view.

In this thesis, we first examine the information relevant to a PC user and identify the problems and requirements of current PC users' information retrieval system, and then propose a semantic MyPortal based information sharing system architecture which targets at helping people to manage and share their PC information efficiently and conveniently. It incorporates semantic Web, Web service, P2P and multi-agent technologies to enable not only precise location of Web resources to be identified but also the automatic or semi-automatic integration of Web resources delivered through different methods from different sources.

The architecture consists of three main components: a ``consumer'' which searches for Web resources, a ``provider'' which holds certain resources, and a ``mediator'' which enables the communication between the consumers and providers. All providers and consumers are constructed as semantic MyPortals. A semantic MyPortal is an individual PC that is enhanced with semantic Web technologies. The semantic MyPortals form the basic information nodes of the information sharing system. All providers and consumers are constructed as semantic MyPortal which are individual PCs managed with semantic Web technologies and formed the basic information node of the information sharing system. Each provider publishes its information through a RDF server and describes its capability through a unified interface which is called a WSCD (Web site capability description) . The WSCDwhich functions like a semantic sitemap, and will be mached with each consumer submits relevant search requests each consumer submits based on user requirements. The mediator is comprised of information retrieval agents assigned to the consumers and providers and fulfils information sharing tasks among MyPortals based on a the Semantic Agent-Community-based P2P (SACP2P for short) information retrieval method.

Some preliminary experiments on information sharing among MyPortals are performed in order to show the effectiveness of our approach. The experimental results have shown that the basic functionalities of our system architecture can be realized and the SACP2P method is effective for reducing information load while maintaining a reasonablely high recall rate in a P2P network structure.

The main contributions of this thesis are the concept of semantic MyPortal, the unified information publishing interface WSCD and the conceptual architecture for information sharing based on semantic MyPortal which

enables automatic processing of different types of information delivered through different methods from different sources.

The thesis is organized as follows: In chapter 1, we give a brief introduction for motivation and approach of this research. The introduction to new technologies for semantic Web and Web services is given in chapter 2. In chapter 3, an overview of our proposed conceptual architecture for information sharing is presented. The MyPortal is described in chapter 4. In chapter 5, the unified information publishing interface WSCD is described. We explain the SACP2P information sharing method among semantic MyPortals in chapter 6. The evaluation experiments for proposed architecture and SACP2P methodare given in chapter 7. Related work is discussed in chapter 8 and the concluding remarks are summarized in chapter 9.

論 文 調 査 の 要 旨

インターネットの普及と PC の高性能化により，ユーザにとって有益な情報やサービスが Web 上に多数提供されるようになってきた．一方，膨大になった Web の中に，ユーザにとって必要な情報が埋没するという新たな問題が出てきた．これは検索エンジンが，ユーザが求める情報の曖昧さを完全に解消することができず，ユーザが求めるものとは異なる膨大な情報をユーザに返してしまう問題とも捉えることができるが，その主な要因は，Web が機械処理（例えば，検索エンジン）のための意味構造情報（以下，意味情報）が提供してこなかったことによる．そこで，この問題を解決するため，機械処理のための意味構造を提供するセマンティック Web や，Web 上でアプリケーションを自動処理するためのインタフェースを提供する Web サービスという新たな技術が提案された．

しかしこれまでの研究では，情報検索のライフサイクル（検索要求，検索，検索結果提示，記録，記録内容の再利用）の中の，ある一部の局面にしか焦点を当てておらず，全ライフサイクルで意味情報を扱うアーキテクチャに関する研究はなかった．その結果，セマンティック Web 技術が導入されたシステムで利用されていた意味情報が途中で欠落するという現象が生じ，それ以降の処理で意味情報を利用することができず，情報検索等の処理の精度や効率が下がるという問題が生じている．

もし情報検索の全ライフサイクルで意味情報の欠落を起こさない仕組みが提供されれば，ユーザは，必要とする情報を，これまで以上に，簡単かつ容易に求めることができるようになる．さらに，セマンティック Web 技術の適用範囲は Web 上の情報に限らないため，興味や目的等が等しい特定の相手と特定の情報を共有する仕組みが提供されれば，Web 上で一般に提供される情報に加えて一般には提供され難い情報までも簡単に求めることができるようになり，これからのユビキタス情報化社会を実現する上での大きな一助となる．

以上を背景として，本論文は，セマンティック Web，Web サービス，ならびにマルチエージェントシステムの技術を統合することで，意味情報を情報検索の全ライフサイクルで取り扱うとともに特定の相手と特定の情報の共有を可能とする情報共有システムのアーキテクチャ，ユーザの要求を組み合わせて同時に実行できる記述形式，ならびにこの情報共有システム間での効率的な情報検索手法に関してまとめたものであり，以下の点で評価できる．

第一に著者は，セマンティック Web とマルチエージェント技術に基づき，ユーザの PC 上にある全情報に対して意味を考慮した検索・記録・提示などの操作を可能とする情報システム Semantic MyPortal（以下，MyPortal）の概念を明らかにするとともに，その概念に基づいた，特定の相手と特定の情報の共有を可能とする情報共有システムのアーキテクチャを提案した．

第二に著者は，セマンティック Web 技術に基づき，Web サイトの一般的な情報(GID)と詳細情報(WCD)ならびにサービス利用情報(WSD)を同時に記述可能とする記述形式 WSCD（Web Site Capability Description）を提案し，ユーザの次の 3 つの要求（Web サイト検索，Web サイト内詳細検索，Web サイト内サービス利用）を同時に組み合わせて実行可能とした．従来，これらの要求は個別に出す必要があったが，この WSCD により，ユーザは一度の要求で複数の処理結果をまとめて得ることができるようになった．

第三に著者は，MyPortal の概念に基づき構成される情報共有システム間で，ユーザの必要とする情報を検索する手法として，WSCD とマルチエージェント技術を利用した情報検索手法 SACP2P（Semantic Agent-Community-based Peer-to-Peer information retrieval)を提案した．この SACP2P では，ユーザの検索要求の送信から，検索結果の返信とその記録まで，意味情報を保持することが可能であり，情報検索の全ライフサイクルで意味情報を取り扱う仕組みを有する．

以上要するに，本論文は，ユーザの要求に合わせた情報検索・管理と，他のユーザとの情報共有とを同時に可能とする情報システム MyPortal の概念を明らかにし，情報探索と Web サービスをユーザの意図に合わせて組み合わせて記述できる記述形式 WSCD を考案するとともに，MyPortal の概念に基づく情報共有システム間での効率的な情報検索手法 SACP2P を提案したものであり，知能システム学上寄与するところが大きい．

よって，本論文は博士（工学）の学位論文に値すると認める．

氏　　名　趙　　一　權
学位記番号　シ情　博甲第 378 号（工学）
学位授与の日付　平成 22 年 1 月 25 日
学位論文題名　A Study on the Transport Network Architecture of Next Generation Network (NGN) for Real Time Communications (IP Telephony Services)
(次世代ネットワーク(NGN)の実時間伝送方式に関する考察)

論文調査委員
（主　査）　九州大学　准教授　岡　村　耕　二
（副　査）　〃　教　授　荒　木　啓二郎
〃　〃　〃　谷　口　倫一郎

論 文 内 容 の 要 旨

As the convergence phenomenon of telecommunication area and Internet communication area is being accelerated according to the rapid spread and expansion of Internet, telecommunication service providers are faced a new paradigm that the existing clearly boundary of wired telecommunication networks, wireless mobile networks, data communication networks and broadcasting networks are in the process of being dismantled. Recently, the telecommunication service providers need to develop new business models and network architecture to cope with the new paradigm. The term of Next Generation Network (NGN) is used for representing the new network in International Telecommunication Union's Telecommunication Standardization Sector (ITU-T). Recently, some leading telecommunication service providers have plans or are conducting strategies of migration their existing networks to NGN.

In this thesis, an NGN transport network architecture which supports end-to-end QoS of primary IP telephony services and accommodates new converged real time communication services such as IPTV, is suggested and the feasibility of the proposed network architecture is presented. The proposed network architecture has the following features. The architecture enforces end-to-end QoS assurance through a suggestion of adoption and expansion of DiffServ mechanism to broadband access networks. The architecture suggests new NGN core network separated from the existing Internet core network in order to classify and process valuable real time communication traffics of predefined NGN services and elastic traffics of best effort services respectively among the aggregated incoming flows in core networks. Therefore the architecture enforces differentiations of NGN services against elastic traffics through the excluding of the Internet access traffics which affects network utilization. The architecture enforces differentiation services to the NGN service traffics through a suggestion of adoption of the DiffServ over IP/Multi Protocol Label Switch (IP/MPLS) mechanism in the NGN core network. The architecture provides a consistency of end-to-end QoS through a suggestion of class mapping between core and access networks. The LSP topology of NGN core maintains a tree topology according to the pre-existing PSTN routes, and thus the transport network of NGN core is able to sustain physical transport lines and is expected to enforce qualities of real time communication services with restriction of delay bounds. The architecture provides Strict Priority Queue (SPQ) combined with Class Based Queue (CBQ) over DiffServ mechanism. The SPQ scheduling to the IP telephony traffics assures qualities of primary IP telephony services.

In addition, this thesis suggests end-to-end service performance objectives of NGN services and presents the end-to-end service performances of IP telephony services over the proposed architecture. It is presented the feasibility that the proposed transport network architecture of NGN is possible to provide an IP telephony service with quality of PSTN grade through the example of nationwide NGN deployment. It has been performed the following strategy for NGN deployment applied with the proposed transport network architecture. The first step is to define services to be provided over NGN. The second step is to define service performance objectives, network performance objectives, and QoS policy of transport stratum of NGN. The third step is to provide services to the real subscribers and to measure performance metrics of the services over the implemented network applied with the proposed transport network architecture. The last step is to verify degree of end-to-end QoS through the analysis of measured metrics with comparison of the defined service performance objectives and to validate user experienced quality satisfaction through the survey of response of the subscribers who have used the services provided over the NGN.

The proposed transport network architecture of NGN makes a great contribution towards nationwide NGN deployment of the telecommunication provider who is introduced in the thesis. And the research estimates and presents that the nationwide NGN applied with the proposed transport network architecture is possible to provide IP telephony service with quality of PSTN grade. It is expected that the proposed transport network architecture and the

strategy of nationwide NGN deployment applied with the architecture could give proper guidelines for those who begin to evolve their networks to NGN.

論 文 調 査 の 要 旨

近年、従来の電話技術とインターネットの通信技術を融合した新しいネットワークアーキテクチャの研究開発は重要な課題になっている。この新しいネットワークの研究は次世代ネットワーク（Next Generation Network, NGN）の研究と呼ばれ、世界規模で標準化が行なわれるとともに、各国においても、主要な通信サービス事業者が既存の通信ネットワークから NGN への移行戦略に関する取り組みを行っている。しかし、その実現のために QoS （Quality of Service）の保証や具体的な移行方法の検討といった解決すべき課題は多い。

本論文は、このような背景で、 NGN への移行や普及のために、IP 電話や IP テレビを用いて通話あるいはテレビの視聴を行なう時に必要になる音声、画像通信の実時間通信方式について取り組んだものであり、以下の点で評価できる。

第一に、NGN 上で利用者が従来の通信サービスと相違なく IP 電話や IP テレビを使用できるようにするために、利用者間での QoS を保証する新しいトランスポートネットワークおよび実時間通信のために新しいネットワークアーキテクチャを提案している。本論文で提案されたトランスポーネットワークでは、インターネットにおいて通信クラスの識別ができる既存の DiffServ（Differentiated Services）技術に QoS を保証するための技術を新たに拡張している。さらに基幹ネットワークへのアクセスネットワークとして、現在の地域ブロードバンドにおける利用可能な潤沢な帯域を考慮して、基幹ネットワークとは制御方式を分離することで、QoS の保証のための制御を容易にしている。つまり、本論文で提案するアーキテクチャでは、基幹ネットワークはアクセスネットワークとは独立にトラフィックの分類、QoS の保証の処理を行なうことができるので、規模適応性に優れている。この新しいトランスポートネットワークとネットワークアーキテクチャによって、利用者間の実時間通信において QoS が保証できることを示した。

第二に、トランスポートネットワークでの QoS の保証のメカニズムと、基幹ネットワークとアクセスネットワークの対応方法を示し、提案したネットワークアーキテクチャの実現方法を提案している。NGN の基幹ネットワークの経路制御で用いられている MPLS（Multi-Protocol Label Switching)で構成される LSP（Label Switched Path)トポロジの性質上、パケット通信に起因する遅延を厳密に考慮する必要がある。本論文で提案するトランスポートネットワークでは、本論文で提案する新しい厳密な優先度キュー（Strict Priority Queue, SPQ）とクラスキュー（Class-Based-Queuing, CBQ）を DiffServ のキュー管理機能と組み合わせて提供する。さらにこれらのキューとアクセスネットワークで提供される通信クラスとの対応方式も示している。本論文では、これらによって、NGN における QoS の保証が実現できることを示した。

第三に、本論文で提案したネットワークアーキテクチャについて、NGN の試験サービスを行なった通信サービス事業者の実データを用いて評価を行なうとともに、NGN の具体的な移行戦略について展望している。評価では、加入者間の音声通話品質の評価として、トラフィックデータを用いた客観的なものと、アンケートによる主観的なものを用いた。この結果、本論文で提案するネットワークアーキテクチャでは、従来の公衆電話網と同等のサービス品質が全国規模で得られることがわかった。最後に、本論文のまとめとして、NGN の移行戦略のための具体的な手順を示した。

以上要するに、本論文は、QoS の保証ができる NGN のための新しいネットワークアーキテクチャを設計し、また、実証実験によって全国規模での実用的な音声通話を支援できることを示し、今後世界各国で NGN の移行、展開が行われる際に有益なものであるので、情報通信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と認める。

氏　　名	上 田 清 志
学 位 記 番 号	シ情　博甲第 379 号（工学）
学位授与の日付	平成 22 年 1 月 25 日
学 位 論 文 題 名	P2P ネットワークサービス基盤ソフトウェアの構成と処理方式に関する研究

論文調査委員

（主　査）	九州大学	教　授	福 田　　晃
（副　査）	〃	〃	荒 木 啓二郎
〃	〃	〃	谷 口 倫一郎

論 文 内 容 の 要 旨

近年のデバイスや通信方式の発展に伴い，日常生活が様々な通信メディアの連携により支えられるユビキタスコミュニケーション社会の実現に向かっている．Web2.0 に代表されるように，個人レベルでの情報交換の拡大が予想され，そのような情報交換を行う様々なコミュニティが発生，増加していくと考えられる．個人レベルの情報発信が活発に行われる環境には，端末の高性能化とあいまって，各端末の自由で自律的な参加・離脱により組織化される Peer-to-Peer (P2P)ネットワークが有用である．しかし，P2P ネットワークには，まだ解決しなければならない課題があ

る．

ひとつめの重要な課題の観点として，まず P2P ネットワークサービスを実現するソフトウェア開発の困難さが挙げられる．特に一般公衆の端末による P2P ネットワークの場合，ソフトウェア開発の難易度が高い．本論文では，端末の能力を活用する P2P サービスモデルの代表例として PC(Personal Computer)グリッドに着目し，P2P アプリケーション開発と多機種で多量な端末の運用管理を支援する基盤技術を提案した．

具体的には，計算グリッドとデータグリッドを P2P ネットワークにより融合させる機能構成と処理方式を提案した．提案方式は，データグリッドで参照データが各 PC に分散配置されている上で，各 PC の参照データ取得状態を計算ジョブの依頼先判定論理に利用する方式と余力のある PC にジョブを依頼し P2P ネットワークによって参照データを取得する方式である．データ取得要求がデータベースサーバに集中せず，大量のデータを参照しつつ大量の計算処理を効率的に実行でき，計算依頼から完了までの応答時間短縮化に効果がある．

提案方式の有用な展開先の一つとして，新たに得られた遺伝子を既知の参照 DNA データと比較計算して遺伝子の特性を発見する遺伝子相同性検索がある．サービスの完了性と処理要求から完了までの応答時間の短さの観点から，ブロードバンド IP 公衆ネットワークユーザが参加したフィールド実験，及び LAN(Local Area Network)環境実験により，提案方式の有効性を評価・検証した．

もうひとつの重要な課題の観点として，物理ネットワークへの負荷が挙げられる．現在ではインターネットトラヒックの 3 割から 6 割が一般公衆ユーザ間の P2P トラヒックであると言われており，物理ネットワークに多大なインパクトを与えている．P2P サービスを発展させつつ，一般公衆間の P2P 通信による物理トラヒックを効率化させる(無駄を省く)P2P ネットワークトポロジを効率化する構成制御が重要である．また，近年のアドホックネットワーク技術の進展に伴い，アドホックネットワークへ拡がる P2P ネットワークシステムの研究開発の重要性は高まってきている．固定ネットワークに加えて無線アドホックモード上にもオーバレイする P2P ネットワークはアドホックネットワーク構成の変化に従うトポロジ再構成が必要である．そこで，本論文では，P2P ネットワークの分断回避と制御処理負荷の小ささの観点から効果的に P2P ネットワークトポロジを構築するアルゴリズムを提案した．提案アルゴリズムを，コンピュータシミュレーションと実システムにおけるフィールド実験にて，比較評価し適用領域を明らかにした．

物理ネットワークの接続制御を用いることにより，ユーザ端末アプリケーションの負担が少なく P2P ネットワークを効率のよい構成へと変えられる．本論文では，物理ネットワークの代表例として次世代ネットワークを対象とした．次世代ネットワークはセッション確立プロトコルを用いてピア間を接続制御するセッション制御インタフェース (例えば，Parlay-X の"makeCallSession")を提供する．セッション制御方式は 3 種類(REFER 方式，3rd Party Call Control (3PCC)方式，メディアブリッジ方式)あり，端末の能力によってリソース消費量と接続遅延時間の観点から効率のよい方式が異なる．本論文ではセッション制御方式の遷移アルゴリズムを提案し，その効果・有用性を検証した．これにより，多くの端末による広範囲の P2P ネットワークを制御でき，実用性が高まる．

以上，要約すると，本論文では様々なネットワーク環境や端末能力に適応し多種多様な P2P ネットワークサービスに共通な基盤となる機能構成と処理方式を提案し，それを実現する P2P ネットワークサービスプラットフォームの構成を明らかにし，有効性を評価・確認し特性を明らかにした．本成果である処理方式とソフトウェアが，様々な端末とネットワークの自律的な連携によるユビキタス通信の基盤となり，様々なアプリケーションが展開されると期待される．

論 文 調 査 の 要 旨

近年のデバイスや通信方式の発展に伴い，日常生活が様々な通信メディアの連携により支えられるユビキタスコミュニケーション社会の実現に向かっている．Web2.0 に代表されるように，個人レベルでの情報交換の拡大が予想され，そのような情報交換を行う様々なコミュニティが発生，増加していくと考えられる．個人レベルの情報発信が活発に行われる環境には，端末の高性能化とあいまって，各端末の自由で自律的な参加・離脱により組織化される P2P (Peer-to-Peer) ネットワークが有用である．P2P ネットワークの適用分野を拡大するためには，P2P アプリケーションの適用範囲の拡大，P2P ネットワークの適用基盤の拡大 (アドホックネットワークへの展開)，多様な端末 (ノード) 能力の違いの吸収，などの課題を解決する必要がある．

本論文は，以上の課題を解決する P2P ネットワークサービスに共通な基盤となる機能構成方法と処理方式を提案し，提案方式の実装と評価を行ったものであり，以下の点で評価できる．

第一に，P2P サービスモデルの代表例として PC(Personal Computer)グリッドに着目し，多様な P2P アプリケーションを効率よく実行できる基盤技術を提案している．具体的には，計算グリッドとデータグリッドを P2P ネットワークにより融合させる機能構成方式と処理方式を提案している．機能構成方式は，計算グリッドを構成するノード上に，データグリッド上のデータを格納し，P2P ネットワークを介して両グリッドを融合させる構成方式である．さらに，

処理方式としては，ジョブを依頼するノードを選択する際に，１）ジョブを実行するのに必要なデータを保有しているノードを選択して当該ノードにジョブを依頼する方式（データ指向選択方式），２）計算能力に余裕のあるノードにジョブを依頼し，ジョブ実行に必要なデータは当該データを保有しているノードから P2P ネットワークを介して取得する方式（P2P ファイル共有方式）の２つの方式を提案している．本提案方式を，ブロードバンド IP 公衆ネットワークユーザが参加したフィールド環境，及び LAN(Local Area Network)環境上で，遺伝子の特性を発見する遺伝子相同性検索に適用した．その結果，提案方式は，計算グリッドとデータグリッドを併設した方式に比べて，処理要求から完了までの応答時間がデータ指向選択方式では約 20%に，P2P ファイル共有方式では約 66%に短縮されることを示し，本提案方式の有効性を検証している．これにより，P2P アプリケーション分野の拡大の可能性を示した．

第二に，固定ネットワークだけではなく，無線アドホックネットワーク上でも P2P ネットワークを形成できるようにするために，アドホックネットワーク構成の変化に伴うトポロジ再構成方式を提案している．提案方式は，ノードが移動した際，ノードの接続先として，ある決められたホップ数までパケットの届くノードの数が多いノードを選択して再構成する方式である．また，提案方式において問題となるノードの制御処理時間，および制御パケット数を導出した．さらに，提案方式を計算機シミュレーションおよびフィールド実験により評価した．その結果，ノードの密度が少ない場合（シミュレーションでは，領域 500m×500m にノード数が 100）には，接続失敗率（送受信ノード間で接続できない割合）が，１ホップで接続できるノードの数が多いノードと接続する方式が 8%であったのに比べて，提案方式は 3%と軽減でき，ネットワークトポロジの分断が少なくなることを示した．提案方式は，ノードの密度に比例してノードの制御負荷が増えるものの，ノードの制御負荷よりもネットワークトポロジの分断の軽減が重要な場合においては，アドホックネットワーク上でも効率よく P2P ネットワークが形成できる可能性を示唆し，P2P ネットワークの形成範囲の拡大について知見を与えた．

第三に，次世代ネットワーク（Next Generation Network: NGN）を対象として，物理ネットワークの効率のよいセッション制御方式を提案している．現在，セッション制御方式として，1) REFER 方式，2) 3PCC (3rd Party Call Control) 方式，3) メディアブリッジ方式の３つの方式が有望であるが，これらは，ノードのセッション制御に関する処理受付能力，ノードのリソース消費量，ノード間接続遅延時間の観点から，各々一長一短あり，単一方式では，多様なノード処理受付能力，動的なネットワーク負荷状況には対応できない．そこで，上記３方式の長所を生かし，ノードの処理受付能力，およびリソース消費量を考慮して，上記の３方式を適応的に選択させる新しいセッション制御選択方式を提案している．本提案方式におけるリソース消費量，ノード間接続遅延時間などの特性を解析し，その有効範囲を明らかにした．これにより，セッション制御処理受付能力が異なるノードが混在した広範囲の P2P ネットワークを制御でき，実用性への知見を得た．

以上，本論文は，様々なネットワーク環境やノード能力に適応し，多種多様な P2P ネットワークサービスに共通な基盤となる機能構成と処理方式を提案し，その有効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）の学位に値すると認める．

氏　　名	Saleh Kamal Haridy Aly
学位記番号	シ情　博甲第 380 号（学術）
学位授与の日付	平成 22 年 1 月 26 日
学位論文題名	Pose and Illumination Invariant Face Recognition Using Self-Organized Feature Maps （自己組織化写像を用いた姿勢と照明変動に頑健な顔画像認識）

論文調査委員

（主　査）	九州大学	教　授	谷　口　倫一郎
（副　査）	〃	〃	内　田　誠　一
〃	〃	准教授	冨　浦　洋　一
〃	福岡大学	教　授	鶴　田　直　之

論 文 内 容 の 要 旨

Appearance-based face recognition has attained wide applications during the last three decades. Applications ranged from identity authentication, access control, to law enforcement such as mug-shoot database matching. Existing face recognition techniques such as eigenfaces, fisherfaces, and elastic bunch graph matching, however, do not perform well when the imaging condition of the test images is different from the stored gallery images. Among these difficult conditions, pose and illumination variations are considered as the most challenges. The appearance of the person is strongly affected by the lighting direction and his/her relative position from the camera (pose). The objective of this research is to develop robust face recognition techniques against these two difficult conditions.

Due to the nonlinear structure of the face patterns appeared in the high dimensional image space, nonlinear projection methods are most appropriate to model face data. In this thesis, self-organizing map (SOM) is adopted to

replace the classical linear projection methods such as principal component analysis (PCA) and linear discriminant analysis (LDA) algorithms. Self-organizing map (SOM) is a famous neural network model, which is able to learn the nonlinear principal components of training data. However, exploiting SOM for feature extraction of complex and high dimensional data like face images has several difficulties: (1) the recognition accuracy is highly dropped when the viewpoint/lighting conditions of the test face images are different from training data. (2) The traditional Euclidean distance metric used to measure the similarity between input pattern and neuron weight vector is not appropriate for face matching. (3) The nonlinearity and the nonconvexity of face manifold is further increased with sever pose and illumination conditions, which requires several SOMs to model it.

In the first part, the problem of lighting condition variations is tackled. Two different approaches are proposed to handle variations in the lighting conditions between training and test images. First, a simple but efficient method is proposed by applying and analyzing different image preprocessing techniques such as histogram equalization and gamma intensity correction to enhance local facial features. The proposed algorithms are based on the observation that frontal face has different local statistics. In order to increase the discrimination between classes, local facial features are enhanced using region-based version of these preprocessing techniques. However, employing image preprocessing techniques does not seem sufficient to overcome sever changes in the lighting conditions.

To further enhance the performance of face recognition system across illumination, a new modified SOM's learning algorithm is proposed. Euclidean and Mahalanobis distance metrics are first compared to select the appropriate one. The appropriate metric should give small value between two images in the same class despite changes in the illumination. This metric used to measure the similarity between input image and the codebook images learned from training database. Since Mahalanobis distance takes into account the covariance among the variables in calculating distances, the correlation between pixels is taken into account. Therefore, replacing Euclidean distance with Mahalanobis distance in the original SOM learning algorithm is more robust to illumination variations.

Since SOM model is used as a global feature extractor, its ability to handle misalignment and pose variations is limited. Therefore, utilizing local feature extraction methods seems to be more promising. The second part of the thesis is focusing on the design of a face recognition system which can handle shift and pose variations. A hierarchical set of self-organizing maps called hypercolumn model (HCM); which emulate the structure and the function of the visual cortex; is adopted. Since HCM is basically proposed to solve shift invariant image recognition problems, we employed and tested it to solve shift variations in the face recognition problem. The performance of HCM is enhanced by employing two modifications in its original structure. First, a variable map size (2D, 3D, ..) in the feature extraction layer is proposed to replace the fixed ones. Furthermore, the number of neurons in each side of the map is automatically estimated from the eigenvalue decomposition of the data covariance matrix. Second, a shared feature map is constructed to replace a set of neighboring maps in the feature extraction layer. This map serves to absorb all distorted and shifted patterns and hence increases the robustness of the system.

Finally, the problem of recognizing pose variant faces from single frontal training image per person is addressed. We introduce a novel feature extraction method called self-organized Gabor features (SOGF) which is based on the combination of Gabor filter response and self-organizing map. In the proposed method, a generic feature map is constructed from Gabor filter response of a generic training face database, and this map is employed to represent any new face image as a set of points (component-map). For each pixel in the face region, a subset of Gabor features are extracted and projected on a learned self-organized map. The subset of Gabor features carrying high energy are selected where features at low energy are discarded. In order to tolerate for out-of-plane rotation, face image is divided into three horizontal regions and features from each region are matched respectively. A modular Hausdorff distance measure, which can effectively exploit the output of the SOM topological space, is also proposed to identify unlabeled subjects.

論 文 調 査 の 要 旨

顔画像認識技術は，生体認証を指向した技術として，近年，盛んに研究開発が行われている．直感的にはどのような人物の顔画像であっても似たような画像特徴を持っているので，人物を正確に認証するために顔画像からどのような画像特徴を抽出するか，そしてその類似性をどのように評価するかというパターン認識の基本的な問題は，顔画像認識では難しい問題となっている．最近では，対象人物にシステムを意識させずに顔画像認識を行うことも必要とされてきているので，様々な照明条件下あるいは様々な位置からの撮影に対しても安定に顔を認識する技術を確立することが求められている．しかし，同一人物の顔でも撮影条件が変化すると大きく画像特徴が変化するため，そ

の認識は容易ではない．本論文はこのような観点から，顔画像認識の頑健化，特に照明条件の変化や撮影された顔の向きの変化に対して頑健な顔画像認識を自己組織化写像を用いて実現しようとしたもので，以下の点で評価できる．

第一に，照明条件の変化に頑健な認識を実現するために，照明変化の影響を低減し画像特徴を抽出しやすくする顔画像の前処理手法を開発した点である．ここでは，自己組織化写像を用いた顔画像認識システムにおいて，画像の領域ごとに濃度ヒストグラムを均一化することで認識率が向上することを示している．また，認識率向上のため，画像特徴を自己組織化する際に用いる距離についても併せて考察しており，マハラノビス距離に基づいた距離尺度を自己組織化写像に導入することで，認識率が向上できることを実験的に示している．

第二は，位置ずれや回転，拡大縮小に頑健な顔画像認識を実現するために，階層的自己組織化写像の一つであるハイパーコラムモデルを用いた顔画像認識システムを開発した点である．ハイパーコラムモデルは，自己組織化写像による局所的な特徴抽出層と特徴統合層を繰り返し積み重ねた階層構造による画像認識モデルであり，位置ずれや回転，拡大縮小に依存しない頑健な対象認識を実現できる．ここでは，特に，ハイパーコラムモデルをより少ない記憶容量で実現するための特徴抽出機構の共有化，認識率を向上させるための自己組織化写像の次元数最適化について研究を行い，従来法と比較して有効性を示している．

第三は，撮影された顔の向きによらず，安定した顔の認識を行う手法を開発した点である．一般には，認識用辞書に全ての顔の向きの画像を用意することは現実的ではないので，特定の方向から撮影された顔画像のみを認識用辞書とした顔画像認識システムが望ましい．そこでここでは，認識用辞書には正面顔画像しかないと想定したシステムを構築している．まず限られた人数について，複数の向きから撮影した画像にガボールフィルタを適用して画像特徴のサンプルを収集する．そして，得られた画像特徴の自己組織化写像を生成する．その上で，識別対象の正面顔から得られた画像特徴を前述の自己組織化写像に投影し，辞書となる画像特徴のマップ（各画像特徴が自己組織化写像のどのニューロンに投影されたかを示したもの）を生成する．認識過程では，撮影した画像から同様の画像特徴マップを計算し，辞書の中から最も類似している画像特徴マップを有する顔画像を求める．実験により，正面とは異なる姿勢で撮影された顔画像に対する認識率が，Eigenface 法や Fisherface 法等の従来法より高くなることを確認している．

以上要するに，本研究は照明条件や撮影された顔の向きが変化する場合の顔画像認識の頑健化を実現するために，自己組織化写像を基にした顔画像認識システムの構築法を明らかにし，実験を通してその有効性を示したものであり，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（学術）の学位論文に値するものと認める．

氏　　名　　北 村 泰 一
学位記番号　　シ情　博甲第 381 号（工学）
学位授与の日付　　平成 22 年 1 月 26 日
学位論文題名　　A study on deployment of research and education networks for developing advanced Internet technologies
(先端インターネット技術開発を目指した学術ネットワークの運用に関しての考察)

論文調査委員
（主　査）　九州大学　准教授　岡 村 耕 二
（副　査）　〃　教 授　荒 木 啓二郎
〃　〃　〃　福 田　晃

論 文 内 容 の 要 旨

インターネットの利用制限撤廃による商用利用の開始や、NCSA Mosaic の登場等により、1990 年代初頭、インターネットは急速に普及しはじめた。インターネットが普及するにつれて、インターネットを情報通信基盤として利用するためには、インターネット技術のより高度な研究•開発が必要である事が明らかになってきた。これを契機にして、次世代インターネット・ネットワークが政府レベルで構築された。これは、それまでのテストベッドプロジェクトと異なり他国、他地域の次世代インターネット・ネットワークとも相互接続をした。次世代インターネットは商用インターネットとは別の独自の世界規模の通信基盤を構築し、reserach and education (R&E) network と呼ばれるようになった。R&E network は「次世代」の名の下に基幹ネットワークに広帯域伝送路を提供していた。しかし、基幹ネットワークが広帯域であっても、利用者あるいは研究者が広帯域通信を行うことができる訳ではなかった。それには、ネットワーク運用者が設定パラメータを調整する事と、利用者あるいは研究者が伝送プロトコルを調整する必要があった。これは、インターネットが研究室あるいは構内を想定して設計されたため、例えば太平洋を越えるような長距離通信を想定していなかった事にある。また、初期の R&E network においては、その回線帯域は、すべての利用者の研究活動のためには十分ではなかった。このため、通信の選別が必要であり、本研究においては、帯域的に最も厳しい通信の発信元と送信先の両方の IP アドレスによる選別を、伝送効率に影響を及ぼさずにおこなった。その後、通信回線伝送技術が、飛躍的に向上し、R&E network の利用帯域は、利用組織を判別する Autonomous

System(AS)番号によって選別されるようになった。

このようなネットワークの広帯域化により、R&E network は次世代インターネット技術の研究•開発•実証の場から、研究者のインターネット通信路として、商用インターネットの他に存在する情報通信基盤となった。R&E network では、インターネット技術の研究開発だけではなく、高速データ伝送により可能になる情報伝達サービスの研究開発も行われるようになってきた。医療動画伝送は、伝送動画が高解像度でなければならないことから、広帯域ネットワークが必要とされていた。そして、R&E network の進展ともに安価に高解像度動画が伝送できるシステムが開発され、医療動画伝送は一般的におこなうことが可能となった。しかし、この動画伝送利用の主役が医療専門家であり、国際的な実証実験も行われる事から、医療動画伝送システムの仕様の明確化の必要性が認識され、システムの標準化活動が行われた。R&E network がこのように研究者の間で一般的な情報通信基盤となったときに、2006 年 12 月に台湾沖での地震に伴い、多くの海底ケーブルが断絶し、商用インターネットサービスと R&E network は、アジア周辺で同時に疎通性を失った。従来から行ってきたインターネット計測技術により、通信の断絶および一時的な回復などを監視する事ができた。R&E network においては、疎通性の回復には、通信運用方針の変更により、回復する事ができた。従来、ネットワーク運用においては、多すぎる通信運用方針はしばしば通信経路の混乱を招いてきた。特に R&E network においては、通信経路の交換が、商用インターネットサービスに比べて、容易に開始できる事も、混乱をひどくしていた。しかし、台湾沖のケーブル切断による大規模な疎通性消失と、その回復の過程より、多すぎる通信運用方針が災害に対して、疎通性を維持するのに役に立つ事が明らかになった。また、通常時の計測によるネットワークおける距離(周回遅延, RTT)などを把握しおく事が、災害時の疎通性回復でよりよい経路選択を行うのに役に立つ事もあきらかとなった。

本研究においては、R&E network の利用開始から行ってきた研究を述べ、R&E network が研究•開発環境として一般的になる過程で行われた手法を示した。また、R&E network が世界中を覆うようになった時期に発生した台湾沖の地震によるケーブル切断により、通信方式を災害などの予想外の出来事に対して疎通性を保つ技術を明らかにした。一方、R&E network が一般的になる事により、社会生活にも役に立つ技術の例として、「宇宙天気予報」と「高解像度手術動画の伝送」を紹介し、ネットワーク技術の専門家ではない研究者の参加による feedback をあきらかにした。R&E network はテストベッドとも呼ばれ、実験環境として開始された物もあったが、世界中の R&E network が相互接続する事により、研究•開発•教育の基盤になった。本研究は、R&E network 利用に関して利用者が留意すべき技術的条件を明らかにするともに、現在の運用における問題点を明らかにした。

論 文 調 査 の 要 旨

インターネットの利用制限撤廃による商用利用の開始や、NCSA Mosaic の登場等により、1990 年代初頭、インターネットは急速に普及し始めた。インターネットが普及するにつれて、インターネットを情報通信基盤として利用するためには、インターネット技術のより高度な研究ならびに開発の必要性が高まってきた。これを契機にして、次世代ネットワークが構築され始めた。次世代ネットワークによって、商用ネットワークとは別の独自の世界規模の通信基盤が構築され、Research and Education Network と呼ばれるようになった(以下、学術ネットワークという。)。学術ネットワークは「次世代」の名の下に商用ネットワークに比べてはるかに潤沢な広帯域伝送路を研究者に提供してきた。しかし、学術ネットワークを利用する上で、その帯域に見合った性能を得るためには更に新しい技術が常に必要であった。

本論文は、このような背景で、学術ネットワークの黎明期である 2000 年の初頭から現在までその運用や高度応用のための研究開発によって得られた長距離通信時における帯域制御技術、アドレス単位の経路制御や経路情報の可視化など高度なネットワーク運用技術をまとめたものであり、以下の点で評価できる。

第一に、広帯域、長距離通信において、高スループットを得るための技術を開発した。インターネットは研究室あるいは構内を想定して設計されたため、複数の国々の間での長距離通信では性能が出ないことが学術ネットワークの利用でわかってきた。広帯域、長距離通信では、ネットワークレベルでの設定パラメータを調整する事と、利用者が応用レベルでのプロトコルを調整する必要があった。本研究では東京とソウルの間での長距離通信において、ATM のシェーピング技術を用いて最適な送信レートを設定し、さらに HTTP と TCP を改良することで、従来の 10 倍以上の速度改善を実現した。

第二に、ルータの経路制御方式を改善して、トラフィックの詳細な分類を実現し、それによってトラフィックの負荷分散を可能にした。黎明期の学術ネットワークでは、すべての研究活動を同時に支援できる回線帯域容量は提供されていなかった。そのため、トラフィックを組織ごとに分類して負荷分散を行う必要があったが、学術ネットワークの黎明期では現在のように利用組織を容易に判別できる AS(Autonomous System)番号が用いられていなかったので、組織ごとにトラフィックを分類するために新しい技術が必要であった。本研究では、ルータに改良を加えて、通信効率に影響を及ぼさずに組織に対応した IP アドレス群をキーにしたトラフィックの分類を行い、トラフィックの

組織単位での負荷分散を実現した。

第三に、ネットワークの運用のために経路情報の可視化を行い、学術ネットワークの独特な経路制御の運用の長所を明らかにした。商用ネットワークの運用において、通信経路の変更は通信品質に影響を与えるため、経路制御の変更が極力行われないような運用が取られている。しかし、逆に学術ネットワークは、柔軟性を重視して通信経路の交換が容易にできる独特な運用が行われてきた。2006 年 12 月に台湾沖での地震に伴い、多くの海底ケーブルが断絶し、アジア周辺でほとんどのネットワークが疎通性を失う事故が発生した。この時、本研究で行ってきたインターネット計測技術により、通信の断絶から回復までの様子を可視化して提示する事ができた。この視覚化によって経路情報の変化の詳細な解析を行った結果、学術ネットワーク独特の経路制御運用では障害から早期に回復できることを示した。

以上要するに、本論文は、学術ネットワークを高度に利用するために必要な新しい帯域制御技術や経路制御技術やその運用のための技術を提案し、学術ネットワークが商用ネットワークとは性質の異なる研究用の情報通信基盤として今後利用されることに貢献したもので、情報通信工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と認める。

氏　　名　大　石　哲　也
学 位 記 番 号　シ情　博甲第 382 号（工学）
学位授与の日付　平成 22 年 2 月 23 日
学 位 論 文 題 名　クエリ拡張とユーザプロファイルを利用した個人化検索に関する研究
論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　長谷川　隆　三
（副　査）　〃　〃　廣　川　佐千男
〃　〃　准教授　峯　恒　憲

論 文 内 容 の 要 旨

知識の宝庫である WWW は，研究や仕事の支援のためだけだけでなく，日々の生活においても広く利用されている．WWW の利用状況は，Web 検索の他，ブログや SNS による情報の発信や収集，オンラインショッピングなど多岐に渡っている．その中でも Google や Yahoo! Japan などに代表される検索エンジンの利用に注目した．

検索エンジンに検索要求（クエリ）を与えることにより，クエリを含む Web ページが取得できる．しかし，クエリによっては適切な Web ページが得られないこともある．一般に，クエリが少数の単語しか含まなければ，多量に Web ページが返される．逆に，クエリが多数の単語を含めば，該当 Web ページがまったく得られないこともある．これは検索エンジンが基本的に AND 検索（クエリに含まれる単語をすべて含むような Web ページの検索）を行うためである．

これらの問題を解決する方法として，クエリ拡張により再検索を行う手法やユーザプロファイルを利用してユーザと関連性の強い情報を優先表示する方法がある．クエリ拡張により再検索を行う手法とは，ユーザが与えたクエリ（「初期クエリ」と呼ぶ）に適切な単語を追加して新たなクエリ（「拡張クエリ」と呼ぶ）を生成し，再度検索を行う手法である．初期クエリに含まれる単語数が少ない場合，その検索結果は膨大になることが多いが，拡張クエリを用いた AND 検索により，検索結果の数を減らすことができる．一方，ユーザプロファイルを利用する方法は，ユーザ個人の特徴を表す語や句等に基づく，ユーザプロファイルと呼ばれる情報を利用して，検索結果をユーザと関連性が強い順に並び変える方法である．

クエリ拡張においては，新たに追加される単語の選定法が問題となる．この単語が適切に選定されなければ，拡張クエリによる検索結果の改善は望めない．そこで，クエリに関連する単語を抽出する関連単語抽出アルゴリズム（RWEA : Related Word Extraction Algorithm）を考案した．従来の TFIDF や RSV(Robertson’s Selection Value:適合文書中の単語を高く、不適合文書中の単語を低く評価する)のように，単に，文書中の単語の出現頻度に基づく方法とは異なり，RWEA は単語やセンテンス間の距離に着目した重みを単語の出現頻度に乗じる方法を採っている．RWEA は「キーワード A の近くに出現する単語ほど A と関連が強い」という考えに基づき、キーワード群に関連する単語をテキスト中から抽出する。関連単語は頻度などに基づく評価値の順に出力される．本方法では，まず，初期クエリをキーワード群，初期クエリによって検索された Web ページをテキストとして RWEA を適用し，関連単語群を取得する．次に，その中で最高評価値を持つ単語を初期クエリに追加して拡張クエリを生成する．RWEA，RSV，RWEA と RSV の組合せの 3 つの手法を用いて，拡張クエリによる検索結果の精度を実験評価した．全般に RSV より RWEA の精度が高く，RWEA と RSV との組合わせの精度が最も高かった。さらに，曖昧な初期クエリ（検索結果上位 10 件の精度が 20%以下）ほど，拡張クエリによる精度改善率が高かった．

RWEA の応用として，スケジュールを用いた Web 検索の研究を行った．ここでスケジュールとは Google カレンダーなどの個々の予定を指す．まず，スケジュールのタイトルに含まれる単語をキーワード群，詳細をテキストとして RWEA を適応し，抽出された関連単語をクエリとして検索する．引き続く検索では，以前のクエリをキーワード群，得られた適切な Web ページの SNIPPET をテキストとして，拡張クエリ生成を繰り返す．評価実験では，バス，飛行機，

JR の各々について目標ページを設定した．ユーザは検索結果の中から適切な Web ページを選択することでシステムに現在の関心事を伝達する．このようにするだけで，ユーザが望む交通手段が検索の度に変化しても目標ページが検索結果の上位に現れることを確認した．

RWEA のもう 1 つの応用として，Web 上で最大の百科事典である Wikipedia を利用したクエリ拡張に関する研究を行った．Wikipedia に含まれる文書は洗練されているため，一般の Web ページの文書数に比べ少量でありながら，効率の良いクエリ拡張を実現できることを確認した．RWEA は，原理は簡単であるが，適切な関連単語を抽出できる有用なアルゴリズムであり，特徴語抽出が必要とされる種々の応用分野に適用することができる．

さらに，Open Directory Project（ODP）に基づくユーザプロファイル(UP:User Profile)を用いた個人化検索の研究を行った．ODP は Web ページを階層的なカテゴリに分類した世界最大の Web ディレクトリである．個人化検索の手順は次の通り：ODP の各最上位カテゴリ C1,...,Cn に出現する単語を抽出する．各カテゴリでの単語の出現の偏りをエントロピーを用いて求め，単語の各カテゴリへの関連度を算出する．次にパーソナルドキュメントに含まれる各単語のカテゴリ Cj への関連度の総和をユーザの Cj に対する興味の度合い Uj とし，これをベクトル表現した UP=[U1,...,Un]を得る．ここでは，パーソナルドキュメントとしてユーザのブックマークを使用した．クエリに対する検索結果の Web ページも UP と同様にベクトル化する．検索結果ベクトルと UP のコサイン類似度を求め，類似度順に検索結果を並び替える．実験の結果，クエリが曖昧なほど，UP を用いた並び替えによる精度向上幅はより大きくなることを確認した．

論 文 調 査 の 要 旨

知識の宝庫である WWW（World Wide Web）は，研究や仕事の支援のためだけでなく，日々の生活においても広く利用されている．WWW の用途は，Web 検索の他，ブログや SNS（Social Networking Service）による情報の発信や収集，オンラインショッピングなど多岐に亙っているが，中でも，Google や Yahoo! Japan などに代表される検索エンジンを利用した情報検索は頻繁に行われる．しかし，WWW には情報洪水と言われるほど大量の情報が存在しているため，必要な情報を簡単に得られないことが多い．いくつかの検索エンジンにおいて，不特定ユーザの検索履歴から多数の人が必要とすると思われる単語を提示する仕組みが提供されているが，これにより必ずしもユーザの嗜好や目的に合致した情報が得られるとは限らず，個人化検索の実現が求められている．

以上を背景として，本論文では，検索エンジンに与えるクエリ（検索要求）に含まれる単語数を増やすことで検索結果数の削減を図ったクエリ拡張手法，クエリ拡張に用いられる単語の選定等に利用できる関連単語抽出アルゴリズム，および，ユーザプロファイルを利用してユーザと関連性の強い情報を優先表示する個人化検索手法についてまとめたものであり，以下の点で評価できる．

第一に，著者は，「キーワード A の近くに出現する単語ほど A と関連が強い」という考えに基づいた関連単語抽出アルゴリズム(RWEA:Related Word Extraction Algorithm)を提案している．文書中の単語の出現頻度のみに基づく従来の手法とは異なり，RWEA は，単語やセンテンス間の距離に着目した重みを単語の出現頻度に乗じる点に特徴がある．キーワードからの距離に着目して関連する単語をテキスト中から抽出するという簡単な仕組みであるが，RWEA は適切な単語を容易に抽出できるアルゴリズムである．

第二に，著者は，RWEA を３つの応用例題に適用してその有用性を示している．１）Web 検索結果から関連単語を抽出してクエリ拡張する応用では，よく利用されている RSV（Robertson's Selection Value）という単語評価法よりも RWEA の精度が高く，これらを組合わせるとさらに精度が向上することを明らかにしている．また，２）スケジュールに基づく Web 検索では，検索の繰返しが要求されるが，検索結果に対して RWEA を繰返し適用することで，ユーザの検索意図が変わっても，それに追随した Web 検索ができることを確認している．さらに，３）オンライン百科事典 Wikipedia を情報源とするクエリ拡張では，少量の文書から効率の良いクエリ拡張が実現できることを確認している．この他，RWEA は，特徴語抽出が必要とされる種々の応用に適用可能である．

第三に，著者は，個人化検索に研究の歩を進め，世界最大の Web ディレクトリである ODP(Open Directory Project)の階層構造をユーザプロファイルとして利用する手法を提案している．ユーザのブックマーク情報を ODP の最上位階層によりベクトル化し，それをユーザプロファイルとする．同様にベクトル化した Web 検索結果とのコサイン類似度を計算し，類似度順に Web 検索結果を並び替える．実験により，並び替え前に比べ後での平均精度が向上すること，曖昧なクエリほど，拡張クエリによって高い精度向上率が得られることを確認している．

以上要するに，本論文は，単語間の距離に基づき関連単語を抽出する新たなアルゴリズムを提案し，クエリ拡張など単語抽出を必要とする種々の応用についてその有効性を明らかにするとともに，ODP をユーザプロファイルの指標として利用する個人化検索方式を提示したものであり，知能システム学上寄与するところが大きい．

よって，本論文は博士（工学）の学位論文に値すると認める．

氏　　名　Ivransa Zuhdi Pane
学位記番号　シ情　博甲第 383 号（工学）
学位授与の日付　平成 22 年 2 月 23 日
学位論文題名　Study on Bistable Prestressed Curved Beam Toward Its Implementation as Memory Device
(メモリーデバイスへの応用を目指した双安定性湾曲梁に関する研究)

論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　浅　野　種　正
（副　査）　〃　〃　宮　尾　正　信
〃　〃　〃　松　山　公　秀

論文内容の要旨

新たな不揮発半導体メモリーの候補には、ＭＥＭＳ（Micro Electro Mechanical System）による双安定性メカニズムが注目されている。このメカニズムは、２つの安定状態を無消費電力で維持でき、その安定状態間を切り替えることができる。双安定性湾曲梁はその中の１つであり、他のメカニズムと比べ、作成方法や駆動方式が単純であり、特に低電力向けの応用への開発が興味深い。また、構造的には柔軟性があり、上下（横型湾曲梁）または左右（縦型湾曲梁）のたわみ方向の安定状態をもつように設計できる。このため、双安定性湾曲梁の応用範囲は広く、メモリーのほかに、ＲＦスイッチ、マイクロＴＡＳ(Total Analysis System)、ディスプレイピクセルなどへの応用も期待できる。本研究では、メモリー素子への応用を目指した基礎研究として、微小なシリコン双安定性湾曲梁の特性解析を行ない、設計と試作を通じてその動作を検証することを目的として実施した。

双安定性湾曲梁の形成には、両端固定梁の軸方向に圧縮力を内蔵させたプリストレス法を提案した。このプリストレス法とは真っ直ぐなシリコン両端固定梁の表面を熱酸化し、二酸化シリコン被膜を形成し、シリコンと二酸化シリコンの熱膨張率を利用して梁の内部に残留軸圧縮力を発生させたものである。この軸圧縮力の作用により、梁は座屈され、湾曲化の形状に至る。この方法は相補形金属/酸化物/半導体素子(ＣＭＯＳ)を用いた大規模集積回路(ＬＳＩ)プロセスとの適合性も良いことからメモリーへの応用が期待できる。提案したプロセス技術で軸圧縮力を付与した湾曲梁が形成できることを、予備実験で明からにした。

プリストレス法による湾曲梁の双安定性を調べるには、Ｅｕｌｅｒ座屈理論と最小エネルギー原理を用いて解析を行った。プリストレスの導入により、湾曲梁の駆動力対変位の特性は特定な非線形を示し、その積分は双安定性に相当する２つの谷間をもつポテンシャルエネルギー対変位特性を示した。よって、プリストレス法で形成される湾曲梁は双安定性をもつことがわかった。また、湾曲梁の初期たわみと厚さとの比は双安定性の程度、スナップ動作、およびスナップに必要な閾値駆動力を左右することがわかり、素子設計の最適化には重要なパラメータの一つとなる。

素子の設計や試作において、閾値駆動力を知る必要があり、上述した解析結果より、導出された。また、駆動力分布への依存性について検討を行ない、その低減を図った。その結果、湾曲梁のスナップ中のたわみエネルギーの発達を抑制することにより、駆動エネルギーをより効率よく圧縮エネルギーに変換し、閾値駆動力の低減に導くことがわかった。これを実現するには、駆動力を湾曲梁の中心付近に高く、両端に向かって低い、いわゆる山形分布させればよいが、従来の容量型静電力駆動方式では困難であり、理論上、１０Ｖ以上の高閾値電圧が必要とされる。この山形分布をしている駆動力を発生するには、本研究がアンペア力による駆動方式を提案し、それに伴う素子の構造設計、試作および検証を行なった。

湾曲梁の試作はシリコンと二酸化シリコンを主材料とし、ＭＥＭＳ技術を利用して行なった。試作した結果、静電力、アンペア力のいずれの駆動力を用いた場合でも安定状態間の遷移動作(スナップ動作)が観察された。容量型静電力による駆動方式を用いた場合には、スナップ動作に２０Ｖ以上の電圧が必要であった。一方、本研究で新たに提案したアンペア力で駆動する素子では、理論的考察から予想されたとおり、１０Ｖ以下の電圧でスナップ動作が確認された。この電圧は相補形金属/酸化物/半導体(CMOS)素子を用いた回路で容易に発生できる範囲の電圧である。よって、本研究が提案したアンペア力による駆動方式は、ＣＭＯＳ回路と集積化が可能であり、新しい方式のメモリーに応用可能であると結論する。

論文調査の要旨

半導体メモリーが情報の蓄積用途としても使われ始めているが，既存の不揮発半導体メモリーのデータの保持時間は長期のデータ保存用としては充分とは言えない．本論文の筆者は，長期のデータ保存を実現する半導体メモリーの実現を目指して，微小電気機械システム（Micro Electro Mechanical System, MEMS)による双安定性機構に注目した．この機構は，二つの安定状態を無消費電力で維持でき，その安定状態間を外力により切り替えることができるものである．それを実現する構造の中で湾曲梁構造は，考え得る他の双安定構造と比べ，作製方法および駆動方式を単純にできる可能性があること，および，構造設計の自由度が大きく，上下(横型湾曲梁)または左右(縦型湾曲梁)のたわみ方向の安定状態をもつように設計できるため柔軟なデバイス構造を取り得ることに着目した．本論文は，半導体

メモリー素子への応用を目指した基礎研究として，微小なシリコン双安定性湾曲梁の特性解析を行ない，設計と試作を通じてその動作を検証した成果をまとめたもので，以下の点で評価できる．

第一に，双安定性湾曲梁を実現するための方法として，両端固定梁の軸方向に圧縮力を内蔵させたプリストレス法を考案した．このプリストレス法をシリコン素子として具現化する方法として，真直なシリコン両端固定梁の表面を熱酸化して二酸化シリコン被膜を形成し，シリコンと二酸化シリコンの熱膨張率差を利用して梁の内部に残留軸圧縮力を発生させることを提案した．発生した軸圧縮力の作用により，梁は座屈し，湾曲した形状に至る．この方法は相補形金属/酸化物/半導体素子(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)を用いた大規模集積回路(Large Scale Integrated Circuit)プロセスとの適合性も良いことから，メモリーへの応用が期待できる．本研究で提案したプロセス技術を用いて軸圧縮力を付与した湾曲梁を形成できることを実証した．

第二に，プリストレス法による湾曲梁の双安定性を，Ｅｕｌｅｒ座屈理論と最小エネルギー原理を用いて解析し，双安定性の発現に必要な構造設計，ならびに双安定状態を切り替えるスナップ動作に要するエネルギー等の性能指針を与える定式を導いた．この解析手法を用いて，湾曲梁の駆動力対変位特性，ポテンシャルエネルギー対変位特性を導出し，スナップ動作のしきい値などを定量的に与えた．

第三に,CMOS回路で容易に発生できる電圧(約10ボルト)でスナップ動作を実現するための駆動方式として，アンペア力による駆動を提案し，その動作を実証した．筆者は最初に，駆動方式としては最も簡便な静電力駆動による素子を設計，試作し，双安定状態のスナップ動作が可能であることを実証した．一方，この方式では，数十ボルト以上の電圧がスナップ動作に必要とされることを実験および解析式による検討から示し，この電圧を CMOS 集積回路で発生させるのは容易ではないし，信頼性の観点でも避けるべきであると判断した．そこで筆者は，本研究で導出した解析法を用いて，スナップ動作のしきい値駆動力を低減させる駆動法について検討を加え，湾曲梁のスナップ中のたわみエネルギーの発達を抑制すれば駆動エネルギーをより効率よく圧縮エネルギーに変換でき，結果としてしきい値駆動力を低減できるとの結論に至った．これを実現するには，駆動力を湾曲梁の中心付近で大きく，両端に向かって小さくなる山形分布させればよいこと，そしてこの山形分布を発生させる方法として，アンペア力による駆動方式を提案した．アンペア力駆動による素子を設計，試作し，10ボルト以下の電圧でスナップ動作ができることを実証した．

以上要するに本論文は，長期の情報蓄積が可能な不揮発性半導体メモリーの実現を目指し,MEMS 技術によって実現できる軸圧縮力入り梁構造が示す双安定性を利用することを提案し，科学的理解を踏まえて双安定動作を実証したものである．これは，新たなメモリーの創出に貢献するものと期待され，電子デバイス工学上の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	岩　下　伸　也
学 位 記 番 号	シ情　博甲第 384 号（工学）
学位授与の日付	平成 22 年 2 月 28 日
学 位 論 文 題 名	パルス放電プラズマを用いたナノ粒子含有多孔質低誘電率膜作製法の開発

論文調査委員

（主　査）	九州大学	教　授	白　谷　正　治
（副　査）	〃	〃	宮　尾　正　信
〃	〃	〃	岡　田　龍　雄

論 文 内 容 の 要 旨

半導体技術の急速な発展に伴い，超大規模集積回路は社会のあらゆる分野で活用されている．集積回路の性能はデバイスの微細化による高集積化・高周波数化によって進展してきた．一方，配線ピッチの微細化，配線の多層化は配線間信号遅延(RC 遅延)を招く．従って RC 遅延を低減するために，低抵抗の配線材を用いるとともに配線間容量を小さくするため，配線材として Cu が，絶縁材として低誘電率膜が導入されるようになった．膜を低誘電率化するためには膜を多孔質構造にして膜密度を低くする必要があるが，これまでに様々な多孔質低誘電率膜が開発されているにも関わらず，近い将来膜の低誘電率化が困難になると予測されている．この原因として，膜の多孔質化による低誘電率化と CMP プロセスに耐え得る膜の機械強度の保持の両立が求められる点，膜の比誘電率や機械強度のみならず，高耐熱性，低吸湿性など様々な物性が要求される点が挙げられる．

上述の課題を解決するため，本研究ではナノ粒子が基板上に敷き詰められた構造から成るナノ粒子含有多孔質低誘電率膜作製法の開発を行った．膜作製法は，CVD プラズマ中で材料ガスを分解して気相中でのラジカルの生成・ナノ粒子の合成を行い，構造材としてのナノ粒子と接着剤としてのラジカルを基板上へ共堆積させるという方法である．本研究では，この膜作製法の要素プロセス，すなわち①ナノ粒子の合成，②ナノ粒子の輸送，③ナノ粒子の基板上への収集，④多孔質膜の堆積をそれぞれ制御するための実験・検討を行った．

本章は 6 章から構成されている．第 1 章では，現在までに開発されている低誘電率膜の紹介とその課題を説明し，

本研究の目的を示している．第 2,3,4 章では，それぞれナノ粒子の合成，輸送，収集効率の研究ついて述べている．第 5 章ではナノ粒子含有多孔質低誘電率膜の作製とその物性評価について，第 6 章では本研究の結論と今後の課題を示している．

第 2 章では，2 次元フォトンカウンティングレーザー散乱法を用いて測定したプラズマ CVD 法によるナノ粒子合成実験の結果を示した．放電期間中，ナノ粒子は CVD および凝集により成長する．CVD 成長が支配的な条件でパルス放電の放電維持時間を 0.08 s から 4.0 s の範囲で制御することで，ナノ粒子のサイズを 1.3-26 nm，数密度を 10^9-10^{11} cm^{-3} の範囲で制御できることを示した．

第 3 章では，プラズマ CVD 法で合成されたナノ粒子の輸送実験の結果を示した．放電期間中にナノ粒子に働く力は主にイオン抗力と静電気力である．振幅変調パルス放電を用いることによって変調中にナノ粒子をイオン抗力により速度 67 cm/s 以上で基板方向に高速輸送できることを示した．一方，無変調パルス放電を用いた場合は，ナノ粒子は放電オフ後に熱泳動力により 6-9 cm/s の速度で基板方向に輸送できることを示した．また針状電極を設置して振幅変調パルス放電を用いた場合，変調中にナノ粒子は針方向へ速度 9.8 cm/s で輸送され，ナノ粒子 3 次元輸送制御が可能であることを示した．

第 4 章では，マルチホロープラズマ CVD 法で合成したナノ粒子の基板への収集効率・輸送効率を測定した結果を示した．収集効率が約 100 %となる最小のナノ粒子サイズが存在し，高ガス流ほど輸送中におけるナノ粒子の壁への拡散損失を小さくできるため，ナノ粒子拡散時間がガス滞在時間の 5 倍以上である場合，ガス流に沿ったナノ粒子の輸送効率約 100 %が実現できる．

第 5 章では，第 2-4 章で得られた結果を基にナノ粒子含有多孔質低誘電率膜の作製と物性評価を行った結果を示した．振幅変調パルス放電を用いた場合，空孔率 56 %以下では膜のヤング率は空孔率にあまり依存せず 10 GPa 以上であることを示した．一方，無変調パルス放電を用いた場合，空孔率が 38 %から 81 %まで大きくなるとヤング率が 14 GPa から 0.8 GPa まで小さくなることを示した．また振幅変調パルス放電では，無変調パルス放電と比べて製膜速度は 2.5-10 倍向上することを示した．以上のように，振幅変調パルス放電を用いることで，空孔率 4-60 %，比誘電率 1.4-2.9，ヤング率 10 GPa 以上のナノ粒子含有多孔質低誘電率膜を作製することに成功した．

第 6 章では本研究によって得られた結論について述べた．

論 文 調 査 の 要 旨

半導体技術の急速な発展に伴い，超大規模集積回路は社会のあらゆる分野で活用されている．集積回路の性能はデバイスの微細化による高集積化・高周波化によって進展してきた．一方，配線ピッチの微細化，配線の多層化は配線間信号遅延(RC 遅延)を招く．従って RC 遅延を低減するために，低抵抗の配線材を用いるとともに配線間容量を小さくするため，配線材として Cu が，絶縁材として低誘電率膜が導入されるようになった．膜を低誘電率化するためには膜を多孔質構造にして膜密度を低くする必要があるが，これまでに様々な多孔質低誘電率膜が開発されているにもかかわらず，近い将来，膜の低誘電率化が困難になると予測されている．この原因として，膜の多孔質化による低誘電率化と化学機械研磨プロセスに耐え得る膜の機械強度の保持の両立が求められる点，膜の比誘電率や機械強度のみならず，高耐熱性，低吸湿性など様々な物性が要求される点が挙げられる．

本論文は，上述の課題を解決するため， CVD(Chemical Vapor Deposition)プラズマ中で材料ガスを分解して気相中でのラジカルの生成・ナノ粒子の合成を行い，ナノ粒子を含有した多孔質低誘電率膜の作製法の開発を行った結果をまとめたもので，以下の点を明らかにしている．

（1）プラズマ中でナノ粒子は CVD および凝集により成長すること，および CVD 成長が支配的な条件でパルス放電の放電維持時間を 0.08-4.0 s の範囲で制御することで，ナノ粒子のサイズを 1.3-26 nm，数密度を 10^9-10^{11} cm^{-3} の範囲で制御できることを示している．

（2）放電期間中にナノ粒子に働く力は主にイオン抗力と静電気力である．振幅変調パルス放電を用いることによってイオン抗力によるナノ粒子の輸送速度制御を初めて実現した．

（3）ナノ粒子の基板への収集効率・輸送効率を測定し，収集効率が約 100 %となる最小のナノ粒子サイズが存在すること，および，高ガス流速ほど輸送中におけるナノ粒子の壁への拡散損失を小さくできるため，ナノ粒子拡散時間がガス滞在時間の 5 倍以上である場合，ガス流に沿ったナノ粒子の輸送効率約 100 %が実現できることを示している．

（4）振幅変調パルス放電を用いることで，空孔率 4-60 %，比誘電率 1.4-2.9，ヤング率 10 GPa 以上の，高機械強度を有するナノ粒子を含有した多孔質低誘電率膜を作製することに成功している．

以上要するに本論文は，超大規模集積回路内の多層配線用の絶縁材としてのナノ粒子を含有した多孔質低誘電率膜のプラズマ CVD による作製法を提案し，従来にない高機械強度の低誘電率膜の作製を可能としたもので，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）の学位論文に値すると認める．

氏　　名　成　澤　和　志
学位記番号　シ情　博甲第 385 号（理学）
学位授与の日付　平成 22 年 3 月 25 日
学位論文題名　Algorithms for String Data Classification
（文字列データ分類アルゴリズム）
論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　竹　田　正　幸
（副　査）　〃　〃　瀧　本　英　二
〃　〃　准教授　正　代　隆　義
〃　〃　〃　池　田　大　輔

論文内容の要旨

情報通信技術の進展を背景として，テキスト，音楽，画像，動画など多種多様なデータが大量に生成され蓄積されている．データ分類は，これらのデータを整理し効率的に保存するだけでなく，検索やデータ抽出，知識発見の効率化などに広く応用できる技術である．情報爆発時代とよばれる今日，データの多様性と大規模化に対応した，汎用的かつ効率的な分類手法を確立することは重要な課題である．

計算機上で扱うデータは記号の連鎖，すなわち，広義の文字列とみなすことができる．本研究では，この視点に立ち，文字列データの分類問題を扱った．特に，(1)教師付き分類のための文字列カーネル関数の開発，(2)文字列上の異質性を利用した教師なし分類手法の開発，(3)大規模データを扱うための効率的なアルゴリズムの開発，の３つの課題に取り組んだ．

(1)の課題では，Variable Length Don't-Care (VLDC)パターンに基づく文字列カーネルを新たに開発した．教師付き分類は，データに予め付与されたラベルを利用した分類方法であり高い精度を期待できる．Support Vector Machine (SVM)は，最もよく利用される教師付き分類手法である．SVM を文字列データに適用する場合，内部では文字列カーネルと呼ばれる文字列間の類似性を示す関数が用いられるが，SVM の分類精度はこの文字列カーネルに強く依存する．本研究では，従来の n-gram カーネルや部分列カーネルが用いるパターン族の上位族となる VLDC パターン族に着目し，これに基づいた文字列カーネルを提唱した．また，与えられた２つの文字列に対する共通 VLDC パターンを効率的に計算するためのデータ構造とアルゴリズムを開発した．さらに，計算機実験により既存のカーネルに対する優位性を示した．

(2)の課題では，データに内在する異質性に基づく教師なし分類手法を開発した．教師なし分類は，ラベル情報を利用せずに行う分類手法であり，人手によるラベルの付与が難しいようなデータの分類に効果的である．本研究では，文字列データにおける「異質性」という新しい概念を提唱し，これを文字列上の同値関係を用いて定式化した．また，大量データから異質なデータを自動的に取り出す分類手法を開発した．さらに，この手法をスパム抽出の問題に適用し，その有効性を示した．

(3)の課題では，まず，異質性計算のための文字列上の同値関係を計算する効率的アルゴリズムを開発した．同値関係を計算するには，これまで Compact Directed Acyclic Word Graph と呼ばれるデータ構造が用いられていたが，本研究では，接尾辞配列に基づくアルゴリズムを開発した．このアルゴリズムは既存アルゴリズムと比べ省メモリであると同時に高速であることが実験に示されている．次に，文字列の編集距離の左増加・減少問題に対する効率的なアルゴリズムを開発した．編集距離は，最も有名な類似性指標のひとつであり文字列カーネルとしても有効であるが，計算に文字列長の二乗に比例した時間を要する．そこで，本研究では文字列がその左端で増加／減少した場合の編集距離の再計算を効率的に行うアルゴリズムを開発した．これにより編集距離カーネルの計算を効率化できることが期待できる．

本研究は，文字列データを対象とするデータ分類の問題に取り組み，そのための基盤技術を開発した．教師付き分類においては，既存のパターン族より表現力の VLDC パターン族を扱う文字列カーネルを提唱し，その有効性を示した．教師なし分類においては，データ中に内在する「異質性」という概念を新たに定式化し，これに基づいたデータ分類手法を提案した．さらに，この両方において，大規模データを扱うための効率的アルゴリズムを開発している．

論文調査の要旨

Web 上の新聞記事やニュース，ブログ，掲示板，メールアーカイブや企業内の電子文書アーカイブなど，様々なテキストデータが各所で大量に生成・蓄積されている。これらのデータを有効に活用するための技術の一つとして，テキスト分類に関する研究が盛んに行われている。テキスト分類は，テキストに対してその分野・内容に応じたラベルを付与する問題である。メールやブログ掲示板等においてはスパムの自動検出技術の確立が急務であるが，この問題は，スパム／非スパムというラベルを付与する分類問題と捉えることができる。

本論文は，テキストを単なる文字の連鎖とみなす立場から文字列データ分類の問題に取り組み，教師なし分類および教師付き分類のそれぞれの設定のもとで有効な分類手法の開発を目指したものであり，以下の点で評価できる。

第一に，文字列集合中における各部分文字列の異質性を定量化し，それに基づいた教師なし分類手法を開発している。スパム抽出に関する既存研究は，種々のヒューリスティクスを組み合わせたアドホックな手法が多い。これに対し，本研究では，文字列に関する組合せ論に基づいた独自の手法を提案している。まず，与えられた文字列集合 S に

おいてＳの部分文字列全体の集合上で定義される同値関係を導入し，個々の部分文字列ｗの異質度をｗの所属する同値類の濃度や最大元・極小元の長さ等に基づいて定義している。次に，この異質度を用いて文字列データ中の各文字列をスパムと非スパムに分類する教師なし分類手法を提案している。さらに，これをブログ掲示板におけるスパム抽出の問題に適用し，単独の手法としては高い精度が得られることを示している。

第二に，異質度計算アルゴリズムの効率化に成功している。異質度を求めるために必要な同値類の濃度，最大元・極小元の長さの値は，接尾辞木を構築しその上を巡回することで効率よく計算できる。接尾辞木は入力のサイズに比例した時間と領域で構築できるが，比例常数が大きいという問題を抱えている。本研究では，Kasai ら(2001)の手法に基づき接尾辞木の巡回を接尾辞配列上で模倣し，各同値類の濃度，最大元・極小元の長さを枚挙するアルゴリズムを開発している。この際，通常であれば接尾辞リンク情報の保持が必要となるが，本アルゴリズムはこれを用いずに計算できる。また，接尾辞木を用いたアルゴリズムと比較した実験により，領域だけでなく時間に関しても効率的であることを示している。

第三に，Variable-Length-Don’t-Care (VLDC)カーネルと名付けた文字列カーネルを新たに開発している。Support Vector Machine (SVM)は，最もよく利用される教師付き分類手法である。SVM を文字列データに適用する場合，内部では文字列カーネルと呼ばれる文字列間の類似性を示す関数が用いられるが，SVM の分類精度はこの文字列カーネルに強く依存する。本研究では，従来の n-gram カーネルや部分列カーネルが用いるパターン族の上位族となる VLDC パターン族に着目し，これに基づいた文字列カーネルを提案している。また，与えられた二つの文字列に対する共通 VLDC パターンを効率的に計算するためのデータ構造とアルゴリズムを開発し，さらに，計算機実験により既存のカーネルに対する優位性を示している。

以上要するに本研究は，スパムの検出というきわめて具体的かつ切実な問題を出発点として「異質とは何か」という根源的な問いに取り組み，文字列に関する組合せ論に基づいて異質性を定量化してそれに基づく教師なし分類手法を提案し，実問題に適用してその有効性を示すとともに，異質度計算アルゴリズムを領域と時間の両面から効率化しており，さらに，代表的教師付き分類手法である SVM を文字列データに適用する際の成功の鍵となる文字列カーネルについて新たなカーネルの提案を行ったもので，情報科学に寄与する所が大きい。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　Walaa Ata Ahmed Aly
学位記番号　シ情　博甲第 386 号（学術）
学位授与の日付　平成 22 年 3 月 25 日
学位論文題名　Large-Scale Analysis of Mathematical Expressions for Understanding Their Structure
（数式構造理解のための大規模解析）

論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　内　田　誠　一
（副　査）　〃　〃　谷　口　倫一郎
〃　〃　〃　鈴　木　昌　和

論文内容の要旨

Mathematical expression is an essential part in scientific and engineering document images and thus its conversion into an electronic format is an important task. Recognition of mathematical expression is the main process of the conversion and consists of two parts: symbol recognition and structure analysis. The first part is necessary for recognizing each symbol image by OCR approaches. The second part is necessary for representing and understanding the spatial relationships of the symbols recognized by the first part.

Structure analysis is not a trivial problem even if all the symbols are recognized correctly. Symbols in mathematical expressions are arranged according to subtle rules for representing specific mathematical relationships. For example, the relationship between the symbols “a_2” is subscript while the relationship between the symbols “a^2” is superscript; that is, the same symbols convey different relationships. Unfortunately, the arrangement rule depends on each document and thus is not obvious. In addition, the two-dimensional structure of mathematical expressions is often complex. For example, several big mathematical symbols (e.g., summation symbol) may accompany small sub-expressions around them.

In this thesis, we proposed a system to analysis the structure of mathematical expression. As noted below, this system contains three steps: (i) baseline specification, (ii) parent-child determination, and (iii) spatial relationship classification. The main contribution of this thesis is to realize those steps by statistical classification methods and evaluate the methods through experiments on very large databases, called InftyCDB-1 and InftyCDB-2. After the introduction of Chapter 1 and the database specification of Chapter 2, the thesis is organized as follows.

Chapter 3 is devoted for the first step, where we specify the baseline for the expression. For example, in mathematical expression “$a^2 + b_3$”, the symbols “a”, “+”, and “b” are

classified as baseline symbols and the symbols “2” and “3” are classified as non-baseline symbols. An SVM-based classification method utilizing context information has been proposed for this step.

Chapter 4 is devoted for the second step, where we determine the neighboring symbol for each symbol. In the above example, “b” is the neighboring symbol for “3”. This neighboring relation is called parent-child relation. In the example, “b” is the parent of the child “3”. This relation is determined by another SVM-based classification method utilizing several features of the positional relations.

Chapter 5 is devoted for the third step, where we classify the spatial relationship for each parent-child pair. There are five classes of the relationships: horizontal, subscript, superscript, lower, and upper. The relationship between “b” and “3” is “subscript”. For this classification, two methods, a Bayesian quadratic classifier and an SVM-based classifier, have been trained and evaluated qualitatively and quantitatively. Those simple classifiers could achieve 99.5% and 99.8% classification accuracies, respectively, by a large number of the training samples of the databases. The experimental results also indicated that document-dependent processing on feature extraction is necessary for achieving those high accuracies.

論 文 調 査 の 要 旨

科学文書用 OCR(光学的文字読み取り装置)を実現するためには，文書中の数式を認識する必要がある．数式の認識処理は一般に二段階より成る．すなわち，数式を構成する様々な文字や記号(以下，記号と総称)の認識と，それら記号間の関係解析である．後者は数式構造解析と呼ばれ，例えば数式“$a_{k-2}+b^3$”において“k”が“a”の下付き添え字であることや，“a”と“+”と“b”がベースライン上にあることの把握を目的とする．数式構造解析により，任意の数式を木構造として表現・理解できる．その結果，科学文書全体を LaTeX などのテキスト形式で保存でき，さらには数式の検索・理解といった二次利用が可能となる．

数式構造解析は容易ではない．第一に，ベースラインが自明ではない．左添え字などもあるので，左端の記号がベースライン上にあるとは限らない．第二に，構造上隣接する記号対が自明ではない．前出の“$a_{k-2}+b^3$”において“+”に左隣接するのは“2”ではなく“a”であるように，レイアウト上での隣接と構造上での隣接は一致しない．第三に，添え字か否かといった隣接記号対の意味関係が自明ではない．例えば記号対のうちで相対的に小さい記号が必ず添え字であるとは限らない．また，積分記号や総和記号などは様々な位置に添え字を持つ．さらに記号のレイアウト規則は文書毎に異なる．

数式構造解析に対しては，従来法が幾つか提案されている．しかしそれらはいずれも直感的な if-then ルールやヒューリスティクスに基づくものであり，理論的な根拠に乏しい．さらに，評価実験は数例の数式に対して行われる程度であり，多様な数式にどの程度まで耐えうるのかも不明であった．

本論文は，数式構造解析における 3 つの問題，すなわち（1）ベースライン上の記号の同定，（2）構造上隣接する記号対の同定，（3）それら隣接記号対の意味関係の同定，について，統計的パターン認識手法の枠組みで解決を試みたものである．そして，それらの有効性を 2 万枚の数式画像を用いた大規模な定量的評価実験により示したものである．

まず問題（1）に対しては，各記号からそのサイズや種類などの特徴を抽出した上で，統計的パターン認識手法によりベースライン上の記号か否かの 2 クラス識別を行っている．ここで認識手法としては，大量のデータで学習したサポートベクトルマシン(SVM)を用いている．さらに識別の際に周囲との位置関係に関する特徴を加えることで，精度が向上することを明らかにしている．評価実験の結果，98.5%の同定精度を得ている．

次に問題（2）に対しては，各記号についてその周囲から隣接記号候補を n 個選び，そしてそれらの中から真の隣接記号を同定している．この同定処理は n クラス識別問題として定式化され，学習済みの SVM によって解かれる．識別の際の特徴としては，各記号のサイズや文字種，および候補との相対位置などを用いている．評価実験の結果，98.5%の同定精度を得ている．

最後に問題（3）に対しては，各隣接記号対について，それが上付き添え字など 5 クラスの隣接関係のいずれにあるかを，やはり SVM で同定している．特徴としては，記号対の相対位置と相対サイズの 2 つを用いている．また，それらの抽出に際しては，文書固有のレイアウト規則の影響を極小化するべく，記号サイズなどの正規化処理を行っている．評価実験の結果，99.9%の同定精度を得ている．

以上要するに，本研究は，数式を含む科学文書の OCR による電子化の際に必要となる数式構造解析について，一種のパターン認識問題として定式化し，統計的パターン認識手法を用いた解法を提案し，さらにその有効性を大規模な定量的評価実験により示したものであり，知能システム学上寄与するところが大きい．よって本論文は博士（学術）の学位論文に値するものと認める．

氏　　名　　木 村 功 作
学 位 記 番 号　　シ情　博甲第 387 号（工学）
学位授与の日付　　平成 22 年 3 月 25 日

学位論文題名　　コミュニティ指向マルチエージェントフレームワークに関する研究

論文調査委員

（主　査）　九州大学　准教授　峯　　恒　憲
（副　査）　　〃　　教　授　横　尾　　真
　〃　　〃　　〃　　倉　爪　　亮

論 文 内 容 の 要 旨

同じ興味や関心，目的を持った人と，時間や居場所に関係なく情報を共有，交換できる有用な場として，インターネットコミュニティが注目されている．このインターネットコミュニティを実現する技術として，SNS やグループウェア，掲示板，メーリングリストなどの様々なサービスやアプリケーション（本研究では，コミュニティウェアと呼ぶ）が開発されている．

既存のコミュニティウェアの多くは，クライアントサーバ型，すなわちサービス提供者がユーザやコミュニティの全ての情報を集約する形式を採用している．しかし，この方式では，ユーザは公開を望まない情報まで預託する必要があり、秘密情報を利用した活動が制限される可能性がある．さらに管理者も，多数のユーザがアクセス可能なサーバを構築し，運用する必要がある．このクライアントサーバ型の問題点を解決するため，Peer-to-peer (以下，P2P)型のコミュニティウェア（以下，P2P コミュニティウェア）が提案された．この P2P コミュニティウェアは，ユーザ情報を集約するサーバを必要としないため，管理者の負担を低減できる．しかし，P2P コミュニティウェアに関する先行研究では，ユーザがコミュニティ内で秘密情報を扱うためのセキュリティ機能や，コンピュータやネットワークの故障に対する頑健性保持の仕組みについては，その重要性にも関わらず，十分に考慮されていない．さらにセキュリティ機能や頑健性保持の機能を P2P コミュニティウェア上に実装する際の問題についても，これまで議論されていなかった．

これらの問題を背景として，本研究では，セキュリティ機能や耐故障性を考慮した頑健性保持の機能を P2P コミュニティウェアに実装する際の問題を明らかにするとともに，P2P コミュニティウェアを容易に構築するためのフレームワークを実現することを目的とする．この目的の実現のため，本研究では， P2P コミュニティウェアを容易に構築するためのフレームワーク「コミュニティ指向マルチエージェントフレームワーク」を提案するとともに，セキュリティや頑健性を考慮した P2P コミュニティウェアの開発を通して，その有用性を明らかにした．

具体的には，本研究成果は，以下の 3 つにまとめることができる．

1. P2P コミュニティウェアで利用するサービス開発のための記述方法の提供 : この記述方法により，ユーザに対応するエージェントの開発, コミュニティ単位で管理することが可能なデータやサービスを簡潔に記述することができる．さらに，この方法を取ることにより，データをコミュニティ単位で管理し，メッセージの受信やデータの変更のイベントによって自動的にデータとサービスを Sandbox にセットして安全に実行するように記述できる．これらにより，イベントに対するデータやサービスの切り替えを, 手間をかけずに正確に行う事や, コミュニティ外からの予期しないデータアクセスを防ぐ事が可能となる．その結果，P2P コミュニティウェアの開発者は, それぞれのコミュニティで提供する異なったサービスを開発する際に実装やデバッグのコストを軽減することが可能となる．
2. エージェントによるセキュアで頑健なコミュニティの形成のための機能の実現と，その基本機能化 : コミュニティ管理の冗長化, 管理者による新たなエージェントをコミュニティに参加させる際の承認の仕組み，暗号鍵の共有といった, セキュリティや頑健性のために必要な機能を実現し, これらの機能を利用した P2P 型のビジネスマッチング・コミュニケーション支援システムの開発や，P2P 型の SNS の開発を行った．さらに, これらの機能は複雑な非同期通信を伴うため自前で実装，デバッグが困難であることから，これらの機能をフレームワークの基本機能化することで, フレームワークを利用する開発者に負担をかけることなく, コミュニティのセキュリティや頑健性を保証する事を可能とした．
3. 各ユーザの PC で動作するエージェント間の P2P 通信の頑健性を保証する仕組みの提供 : エージェント間での P2P 通信で利用するネットワークの再構成コストを抑制しつつ, 頑健化を実現するネットワーク構造である房付き順序木(Ordered Tree with Tuft: OTT)型オーバレイネットワークを提案し，その OTT 上でのノードの頻繁な参加・離脱に対応する頑健な経路制御手法を開発した．これにより，P2P コミュニティウェアを利用したい時だけオンラインにするという一般的な利用形態や，低性能なノート PC から無線ネットワークを介して利用するという形態でも, 通信が途切れてシステムが利用不可になるような事態にならずにユーザが安心して利用する事が可能となる．

本研究で開発したコミュニティ指向マルチエージェントフレームワークにより，P2P コミュニティウェアを容易に実現する仕組みを提供するとともに，サーバ構築の権限や技術を持たない一般のユーザでも，必ずしも高性能とは言えない PC を利用して，容易にかつ安心して，インターネット上で秘密情報を送りあうことができる環境を提供できるようになった．これらは，今後のユビキタス情報社

会を推進して行く上での大きな一助と言える．

論 文 調 査 の 要 旨

同じ興味や関心，目的を持った人と，時間や居場所に関係なくコミュニケーションするための有用な場として，インターネット上のコミュニティが注目されている．このコミュニティを形成するソフトウェア（以下，コミュニティウェア）として，ソーシャルネットワーキングサービス(SNS)やグループウェア，掲示板などがある．また多様なユーザの社会的関係をモデル化できるマルチエージェントモデルに基づき，ユーザのコミュニティ形成を積極的に支援するシステムも提案されている．しかし，そのほとんどは，クライアント・サーバ型，すなわちサービス提供者の元にユーザやコミュニティの全ての情報を預ける形式が採られている．そのため，サービスを利用する上でのユーザのプライバシー情報や秘密情報を適切に保護することが困難であり，また，サービスを提供するためのサーバの構築コストや維持管理コストが無視できないという問題を抱えている．

これらの問題を解決する一手段として，ユーザの秘密情報を預けるサーバを必要としない Peer-to-peer（P2P）型のコミュニティウェア（以下，P2P コミュニティウェア）が考えられる．セキュアで頑健なコミュニティウェアでは，セキュリティ機能（ユーザのプライバシー保護や秘密情報保護を適切に行う機能）や頑健化機能（コミュニティの維持管理を保障する機能）が必要とされる．P2P コミュニティウェアでは，複雑な非同期通信処理が必要で，一般にデバッグが困難と言われる分散システムとしてこれら機能を開発しなければならない．そのため開発者に大きな負担を強いることとなり，上記の機能を有したセキュアで頑健な P2P コミュニティウェアを容易に開発できるフレームワークの実現が求められている．

以上を背景として，本論文は，多様なユーザのコミュニティ形成を支援するコミュニティ指向のマルチエージェントモデルに基づいた，セキュアで頑健な P2P コミュニティウェアを容易に実現するためのフレームワーク（以下，本フレームワーク）についてまとめたものであり，以下の点で評価できる．

第一に著者は，コミュニティ指向のマルチエージェントモデルを提案し，セキュアで頑健なコミュニティ形成のための機能を実現した．これらの機能を利用した P2P 型のマッチング・コミュニケーション支援システムや SNS システムの開発を行い，これらの機能の有効性を確認した．さらに，本フレームワークの基本機能としてこれら機能を実装することで，アプリケーション開発者の負担を軽減した．

第二に著者は，各ユーザの PC 上で動作するエージェント間の P2P 通信の頑健性を保障する仕組みを提案した．具体的には，エージェント間での P2P 通信で利用するネットワークの再構成コストを抑制しつつ，頑健化を実現する房付き順序木（Ordered Tree with Tuft ： OTT）型オーバレイネットワークを提案し，その OTT 上でのエージェントの頻繁な参加・離脱に対応する頑健な経路制御手法を開発した．

第三に著者は，本フレームワークで利用されるサービス開発用の各種機能の記述方式を提案した．この記述方式では，ユーザに対応するエージェントや，コミュニティ毎に管理されるデータやサービスのアクセス管理制御機能を明瞭かつ簡潔に記述できる．これにより，実装やデバッグのコストを軽減した．

以上要するに，本論文は，セキュアで頑健な P2P コミュニティウェアに必要とされる機能を示し，その P2P コミュニティウェアを容易に実現するためのコミュニティ指向のマルチエージェントモデルに基づいたフレームワークを提案したものであり，知能システム学上寄与するところが大きい．

よって，本論文は博士（工学）の学位論文に値すると認める．

氏　　名	松　尾　一　矢
学 位 記 番 号	シ情　博甲第 388 号（工学）
学位授与の日付	平成 22 年 3 月 25 日
学 位 論 文 題 名	触覚と力覚を用いた手作業の認識に関する研究

論文調査委員

（主　査）	九州大学	教　授	長谷川　　勉
（副　査）	〃	〃	倉　爪　　亮
〃	〃	〃	内　田　誠　一

論 文 内 容 の 要 旨

日常生活における人の作業を支援するロボットの開発が期待されている．日常生活での作業の多くが手作業である．そこで，手作業を代行しうるロボットハンドとして，複数の関節で構成された指を複数本もつ多関節多指ロボットハンドの研究が行われている．

多関節多指ロボットハンドの作業プログラムでは，複数の関節の協調的な動きを記述する必要がある．また，多関節多指ロボットハンドは冗長系であることが多いため，作業対象物体の目標軌跡が与えられても，それを実現する関節角度軌跡が一意に定まらない．これら 2 つの問題のため，多関節多指ロボットハンドに器用な作業をさせる動作プログラムを，人が直接に記述するのは困難である．

人は，日常生活で使用する多様な物体を対象として，器用な作業を行うことができる．そこで，作業時の人の手指の関節角度や指先位置を計測し，ロボットハンドにマッピ

ングする手法が提案されている．しかし，関節角度をマッピングする手法は，人の手と構造がわずかでも異なるロボットハンドには適用できない．また，指先位置をマッピングする手法は，指先位置のわずかな計測誤差のために，ロボットハンドが物体を取り落とすなどの致命的な失敗が生じる可能性がある．手指の連続動作を，関節角度や指先位置のレベルでマッピングするのではなく，手指の連続動作から認識した作業の内容を，個別のロボットハンドの構造と機能に合わせてマッピングすれば，ロボットでも人と同様の作業を実現できると考えられている．この考え方では，作業を抽象化して表現し，作業の内容を認識する．そして，認識した作業内容をロボットハンドへの作業指令とする．

人が行う作業の内容は多様であるため，そのすべてを認識するのは難しい．しかし，手作業は，把握する・運ぶ・置くなどの単位動作のシーケンスとして構成されていると考えられる．そのため，作業の分節の候補となる単位動作を用意し，それらの単位動作のシーケンスとして作業内容を認識すればよい．従来研究では，作業の分節の候補として把握の型がよく用いられている．しかし，把握の型は外見上の手のかたちによる分類であるため，人が行っている把握の型をロボットハンドにマッピングしても，手が物体に加えている力は再現されない．ロボットハンドが作業を代行するためには，手が物体に加えている力を再現することが重要である．

作業内容の認識を行うとき，手指の関節角度に加えて手と物体の接触状態を用いることで，認識精度を向上できる．ただし，素子分散型触覚センサを用いる場合は，触覚センサ素子の配置を考慮する必要がある．なぜなら，多数の素子を用いれば多くの接触情報が得られるが，多数の素子は作業の妨げとなるし，多くの費用や配線の手間がかかるからである．従来研究では，素子の配置は人の直観で決められており，その効果的な配置を決定する手法については研究がされてこなかった．

本研究の目的は，効率よく接触状態を取得し，手が物体に加える力の計測に基づいた単位動作のシーケンスとして作業内容を認識することである．この目的を達成するために，以下の２つの手法を開発する．

（1）少数の触覚センサ素子で，多数の素子を用いた場合と同程度の精度で手作業を認識できる素子配置を決定する手法を開発する．

（2）手が物体に加える力の計測に基づいて，手作業を分節化する手法を開発する．

本論文は８章から構成される．

第１章では，手作業内容の認識に関する従来研究の状況と課題について述べ，本研究の目的を明らかにする．

第２章では，少数の触覚センサ素子で，多数の素子を用いた場合と同程度の精度で手作業を認識できる素子配置を決定する手法を提案する．この手法は，手掌部全体に配置した多数の素子の作業時における出力を取得し，取得した出力に対して ID3 を適用することで素子配置を決定するものである．

第３章では，第２章で提案した手法を実装するために開発した，手と物体の接触状態を計測するデバイスについて説明する．

第４章では，鎌倉と Cutkosky の把握分類を対象として，認識に効果的な素子配置を決定した実験について述べる．そして，決定した素子配置に基づいて各把握分類の認識実験を行い，認識に効果的な素子配置を決定できたことを示す．

第５章では，ID3 が出力した決定木の枝刈りを行うことで，選択された素子を減らす手法について述べる．多くの被験者から取得したデータに提案手法を適用すると，被験者の違いに対して汎化性能が高い素子配置が得られるが，選択される素子が増えてしまう．そこで，ID3 が出力した決定木に対して枝刈りを行い，選択された素子を削減する．

第６章では，提案手法により決定された素子配置を，解剖学の知見による人の手の触覚受容器分布と比較する．人の手には，手と物体の接触を検出する触覚受容器が存在している．触覚受容器の分布密度は手の各部位で異なるが，その理由はよく分かっていない．そこで，提案手法による素子配置を，人の手の触覚受容器分布と比較し，両者の類似点を示すと共に，触覚受容器の分布密度が偏っている理由について考察する．

第７章では，手が物体に加える力の計測に基づいて，手作業を分節化する手法を提案する．

第８章では，本論文で得られた結果を総括し，今後の課題を述べる．

論 文 調 査 の 要 旨

多関節多指ロボットハンドは，人間のように器用に作業を実行する可能性を有するハンドである．これまでに，機械的動作構造，位置や力の制御，転がりや滑りなど指表面と把持対象との相互作用，安定把持と操り，指表面の柔軟性とその効果，人工触覚の実現，触覚による認識など多くの基礎研究がなされてきた．しかし，これらの研究成果をもってしても，多様な作業を人間のように器用に遂行できるロボットの実用化には至っていない．手作業は，多自由度運動機構である指を協調させ，作業対象との接触や力を制御して目標状態を作り上げることである．そのためには多岐にわたる技術要素を動的かつ有機的に統合する必要があるが，これをハンド制御プログラムとして実装するのは容易でない．

人間の手作業を手本にロボットハンドを制御することは，自然な考え方である．複雑に見える連続作業動作も，時間軸に沿って分節し，基本単位動作に分解することがで

きる．この基本単位動作を実行するロボット制御プログラムを用意しておき，人間の手作業観測結果に基づいて，その実行手順通りに再構成すればロボット作業プログラムが自動生成できるであろう．しかし，この実現には，人間の手作業動作をどのように観測するか，どのような情報に基づいて動作を分節するか，また種々の誤差をどのように克服するかなど多くの課題が残されている．

本研究は，ロボットハンドによる作業動作のプログラミングの自動化を目的として，手作業中の人間を対象に，操作対象との接触状態の変化，力のかかり方を工学的に計測する新手法，ならびに実行中の作業動作を認識し分節する手法を考案し，その効果を明らかにしたもので，以下の点で評価できる．

第一は，作業中の人間の手と操作対象との接触状況に基づいて把握の型を識別するため，効果的なセンサ素子配置を決定する新手法を考案したことである．接触状況を計測するためには，人間がセンサグローブを装着することになるが，上記手法に基づいて決定された少数のセンサ素子配置を実装することにより，効果的に把握の型が識別できることを明らかにしている．さらに把握の型の違いから，人間の連続作業動作を個々の基本単位動作に分節できることも実験的に示している．センサグローブに実装するセンサ素子数の低減は，人間の手指動作を妨げる度合いを軽減し，本来の作業情報を獲得する上で不可欠であるうえ，コストを下げるなど極めて有益である．

第二は，人間の手作業を認識するうえで，接触の有無やその分布だけでなく力のかかり具合の変化が重要な要因となる場合があることを見いだし，これを工学的に検出するデバイスを開発したうえで，力のかかり具合の変化の認識手法を考案したことである．実際の作業中の情報に基づいて基本単位動作への分節ができることを示している．従来研究での手の把握の型の変化に基づく分節では，抽出しえない作業状況変化を検出できる手法として評価できる．

第三は，著者の提案手法により数理的に得られた接触センサ素子配置と，解剖学で得られた人間の手指の感覚受容器分布との類似性の比較がなされたことである．人間の感覚受容器のうち，感度特性の異なる４種の分布の中には，本研究で得られたセンサ素子分布と類似したものがあることが示されている．人間の把握認識に対する感覚受容器の関わりの違いや，工学センサ分布の評価に関する知見として意義が認められる．

以上要するに本論文は，人間の手作業動作を観測するためのセンサデバイスとその情報処理に関し，操作対象との接触状態から作業把握の型を識別する手法とその効果的実装法，ならびに，操作対象に対する力のかかり方の変化の検出法とこれに基づく連続作業動作の基本単位動作への分節手法を提案したもので，ロボット工学に寄与するところが大きい．よって本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認める．

氏　　名	安　藤　裕一郎
学 位 記 番 号	シ情　博甲第 389 号（工学）
学位授与の日付	平成 22 年 3 月 25 日
学 位 論 文 題 名	シリコン上における強磁性シリサイドの高品質形成とスピン注入に関する研究

論文調査委員

（主　査）	九州大学	教　授	宮　尾　正　信
（副　査）	〃	〃	松　山　公　秀
〃	〃	〃	中　島　　寛
〃	〃	准教授	佐　道　泰　造

論 文 内 容 の 要 旨

微細化(スケーリング則)を指導原理とした集積回路の性能向上は物理的限界に直面しており，革新技術の創製が必須となっている．その有力候補が，電子の電荷特性のみを用いて情報処理を行う従来のトランジスタに、スピン特性をも活用し、情報処理を飛躍的に高度化するスピントランジスタである．特に従来の MOS 型電界効果トランジスタ（MOSFET： Metal□Oxide□Semiconductor Field□Effect Transistor）のソース，ドレインを強磁性体電極としたスピン MOSFET は，低消費電力動作，不揮発性機能，論理演算の再構築化等の特長を有し，研究開発が進め出されている．

スピン MOSFET の実現には，強磁性体/半導体ヘテロ構造の高品質形成技術，及びショットキー障壁を介した半導体中へのスピン注入技術等の確立が必須であり，Ⅲ-Ⅴ族系半導体をプラットホームとして研究が進められてきた．しかし，集積回路プロセスとの整合性を考慮すると，Si をチャネルとしたスピン MOSFET の創出が重要であると考えられる．しかし，ショットキー障壁を介した Si へのスピン注入は未だ報告されていない．その主たる理由は，強磁性金属原子と Si 原子は反応性が非常に高く，ソース・ドレインの電極形成時にシリサイド化合物が形成されるため，強磁性体/Si 構造の高品質形成が困難であることが挙げられる．

本論文は，ショットキー障壁を介した Si チャネルへのスピン注入とその電気的検出を目的として，強磁性体 Fe_3Si/Si 構造の高品質形成，Fe_3Si 単結晶薄膜の磁気特性と Fe_3Si/Si ショットキー障壁特性の制御，及び，Fe_3Si 電極から Si チャネルへのスピン注入の電気的検出を行ったものであり， 6 章から構成されている．

第 1 章は序論であり，本論文の研究背景と目的，及び本論文の構成について述べた．

第 2 章では，強磁性金属と基板 Si 原子の界面反応抑制を目的として，強磁性シリサイド化合物 Fe_3Si に着目し，Si 基板上における Fe_3Si 薄膜の原子層制御エピタキシャル成長を検討した． Si 基板の面方位をパラメータとして結晶成長特性を検討し，Si(111)基板上において最も高品質な Fe_3Si 結晶が得られることを明らかにした．これらの現象を Fe_3Si/Si 界面における原子配列マッチングに着目して考察し，定性的に説明した．また， Fe_3Si 薄膜の高規則度化（DO_3 化）と Fe_3Si/Si(111)界面の急峻性の両立を目指し，結晶成長温度および Fe/Si 組成比の最適化を行なった．その結果，Fe/Si 組成比を化学量論組成（Fe/Si=3/1）に精密制御すると共に結晶成長温度を 130 ℃とすることにより，原子層レベルで急峻な界面を有する DO_3 型 Fe_3Si/Si(111)の高品質形成に成功した．

第 3 章では，Si(111)上にエピタキシャル成長した Fe_3Si 薄膜の磁気特性を制御する手法を検討した．Fe_3Si/Si(111)構造の磁気特性を評価し，Fe_3Si 薄膜は一軸性の面内磁気異方性を有すること，その磁化容易軸は，分子線成長における材料原子(Fe，Si)の入射方向に依存することを明らかにした．スピン注入の検出デバイスに用いる電極間の反転磁界の差を明瞭化するため，形状磁気異方性効果を用いた手法と磁気交換結合を用いた手法を検討した．その結果，後者の方がより有効であることが明らかとなり，Fe_3Si 電極（25 nm 厚）上に Co 薄膜（25 nm 厚）を蒸着することにより，反転磁界を 3 Oe から 30 Oe 迄へと増大化することに成功した．

第 4 章では，Fe_3Si/Si(111)界面のショットキー障壁特性を制御する手法を検討した．低不純物濃度（1×10^{15} cm^{-3}）を有するｎ型Si基板を用いて作製したショットキーダイオードの特性を評価し，熱電子放出が支配的な伝導機構であることを明らかにした．スピン注入に必須となるトンネル伝導支配型の伝導特性に改善するため，Si 基板の不純物濃度効果を調べた．その結果，不純物濃度の増加（1×10^{15} ～ $1\times10^{18}cm^{-3}$）に伴い，トンネル電流の寄与が増大していることを明らかにした．更に，高いトンネル確率と長いスピン拡散長の両立を目指し，低不純物濃度（1×10^{15} cm^{-3}）基板の Si 表面近傍のみに不純物（Sb）を高濃度ドーピング（$2\times10^{19}cm^{-3}$）にしたδドープ基板を作製した．その上に Fe_3Si 層をエピタキシャル成長し，ショットキーダイオード特性を作製することにより，トンネル電流が支配的な伝導機構に改善することに成功した．

第 5 章では，ショットキー障壁を介した Fe_3Si 電極から Si チャネルへのスピン注入を電気的に検出する手法を検討した．表面近傍に不純物(Sb)をδドープした Si 基板を用いて非局所電圧素子を試作したところ，100 K～200 K の温度範囲で明瞭な非局所電圧信号の検出に成功した．スピン注入電極と検出電極の磁化配置を異方性磁気抵抗効果測定より確認し，両電極の磁化配置が反平行状態に近いときに非局所電圧信号が得られていることを確認した．また，非局所電圧信号の電流依存性を測定し，正の相関があることを確認した．これらの結果より，δドープ試料で得られた非局所電圧信号が Si へのスピン注入に起因することを立証した．以上の結果は，ショットキー障壁を介した Si 中へのスピン注入を実現したものであり，スピン MOSFET の実現を加速する成果である．

第 6 章では，本論文を総括し，今後の研究課題について整理した．

論 文 調 査 の 要 旨

シリコン(Si)をプラットフォームとした集積回路(LSI：Large Scale Integration)は、電子が有する「電荷の機能」を活用してトランジスタを構築し、その寸法を微細化(スケーリング)する事で高性能化(高速動作・低消費電力動作)を推進してきた。しかし、このアプローチにも物理的限界が見え始め、高移動度チャネル半導体・高誘電率ゲート絶縁膜・低抵抗シリサイド電極等の新しい材料をトランジスタに活用し、その性能を向上する研究が国内外で行われている。このような Si プラットフォーム上に、電子が有する「スピンの機能」をも導入できれば、トランジスタの動作性能は飛躍的に向上し、21 世紀高度情報社会を切り拓く未来型 LSI が創製できる。

スピントランジスタを実現するには、スピン偏極率の高い強磁性シリサイドを半導体上に高品質形成し、偏極スピン電子を強磁性シリサイドから半導体中へと注入する必要がある。世界中で、Ⅲ-Ⅴ族半導体を結晶成長基板とした研究が行われている。Ⅲ-Ⅴ族半導体は直接遷移型のバンド構造を有し、注入スピンの検出に発光現象を利用できるメリットを有するが、LSI プロセスとの整合性が悪く、この構造を集積回路に活用することは困難である。即ち、未来型 LSI の創製には Si プラットフォーム上に強磁性シリサイドを高品質形成する必要がある。

本研究は、未来型 LSI の創出を目指して、Si 上における強磁性シリサイドの原子層制御エピタキシャル成長とその電気・磁気特性の評価・制御を行い、Si へのスピン注入とその電気的検出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. 強磁性シリサイド(Fe_3Si)のエピタキシャル成長に与える Si 基板の面方位効果及び結晶成長条件を総合的に検討した。その結果、Si(111)面上において、結晶性が最も良好であることを見出すと共に、Fe/Si 比(3/1)及び成長温度(130℃)を最適化して、原子層レベルで急峻な界面を有する Fe_3Si/Si(111)構造を実現した。Si 上における強磁性シリサイドの原子層制御エピタキシャル成長技術の創出である。
2. Fe_3Si/Si(111)構造の磁気特性を評価すると共に、Fe_3Si 電極の磁化反転に要する印加磁界(反転磁界)を

制御する手法を検討した。その結果、Fe_3Si 上に保磁力の高い Co 薄膜を積層し、磁気交換結合効果を活用する事で、強磁性電極の反転磁界制御が実現した。

3. Fe_3Si 電極からショットキー障壁を介した Si への電子注入機構を評価すると共に、不純物ドーピング法を用いて、注入機構を制御する手法を検討した。その結果、Si 基板表面近傍の局所領域のみに不純物を高濃度ドーピング(δドープ)する事でショットキー障壁幅が極薄化し、スピン散乱の抑制が期待できるトンネル型電子注入が実現した。
4. Fe_3Si/δドープ Si(111)構造を用いて、スピン注入電極とスピン検出電極が空間的に分離された非局所電圧測定デバイスを作製した。反転磁界の異なる注入電極(Fe_3Si)と検出電極(Co/Fe_3Si)の磁化配置に依存した非局所電圧信号の観測に成功し、ショットキー障壁を介した Si 中へのスピン注入を実証した。Si 系スピントランジスタの実現を加速する成果である。

以上要するに本研究は、Si 半導体上における強磁性シリサイドの高品質形成及び電気・磁気特性について詳細な実験を行い、Si へのスピン注入に成功したもので、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　　石　田　雄　二
学位記番号　　シ情　博甲第 390 号（工学）
学位授与の日付　　平成 22 年 3 月 25 日
学位論文題名　　Research on Electrostatic Inkjet Patterning for Electronic Devices
(電子デバイス作製用の静電式インクジェット描画技術に関する研究)

論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　浅　野　種　正
（副　査）　〃　〃　松　山　公　秀
〃　〃　〃　末　廣　純　也

論 文 内 容 の 要 旨

インクジェットによる描画は、必要量だけの材料を対象物の表面の所定の位置に直接描画できるので、それを電子デバイスの製造に応用できれば、既存のフォトリソグラフィーやスクリーン印刷技術と比較して、環境への負荷が少なくかつ少量多品種生産が可能な新たな製造技術となる。また、製造プロセス設計の自由度が高く、大面積デバイスや三次元形状のデバイス製造なども可能となるものと期待できる。これまでの研究開発の成果により、現在では液晶ディスプレイに利用されるカラーフィルターパネルに実用されており、プリント回路基板の製造も可能になってきている。また、有機半導体を使った薄膜トランジスタや発光ダイオードなどへの応用が検討されている状況にある。

これらの応用には現在、ピエゾ効果を利用した機械式のインクジェット駆動が用いられている。この方式で描画する場合の細線幅の微細化は数十ミクロンまでに留まっている。描画できる細線幅を 1 ミクロン以下にできれば、電子デバイス製造技術としてインクジェット技術の可能性が大きく拡がる。

現状のインクジェット技術における描画線幅の微細化の限界は、液滴の吐出を細管の先端から液を押し出す方式であることに由来する。本研究は、液を引き出して吐出する方式である故に微細描画を実現できると見込めることから、静電式インクジェットに着目した。静電吐出現象は以前より知られており、容器などの印字に応用された例はあるが、液滴の吐出挙動に関しては未解明の部分が多く、微細描画に応用できる水準まで理解できているとは言い難い。本研究では、液滴の吐出観察装置を独自に試作して液滴生成挙動を調べ、微細な液滴の生成機構を明らかにした。それにより達成できた高精度の位置・サイズ制御性を応用して、シリコン薄膜の結晶化制御に利用できることを示すとともに、極限的な微細化のため、独自のシリコン加工技術を用いてノズルを作製し、この方式で数 100 nm サイズのドットを描画できることを示したものである。これらの成果は、以下の三点に要約できる。

(1) 液滴生成挙動の解明

独自に試作した静電式インクジェット観察・描画装置を使用して、液滴生成挙動を解明した。初めに、高速度カメラを使用した液滴吐出現象の観察結果およびナビエ-ストークスの式を元にした数値解析より、階段状の印加電圧の立下り後に液滴が吐出する興味ある現象を見出した。これは、急激な印加電圧の立ち上がりによるテイラーコーンの生成と急激な立下りによって励起される液体の揺動が、液滴生成の主な駆動力になっているためである。次に、液滴吐出挙動を詳細に検討して、キャピラリーの中にニードルを配置したニードル型インクジェットノズルの方が、キャピラリーから直接吐出するキャピラリー型インクジェットノズルより、方形波電圧の周波数に依存せず、波形に同期して液滴吐出することを見出した。これは、印加電圧立下りから吐出までの時間が、ニードル型 (0.28 ms)の方 がキャピラリー型 (5.8 ms) より短くて波形追随性が良いからである。さらに、ニードル型の方が、微細描画が可能であることを示した。これは、電圧印加によるエレクトロウェティング現象により、微量な液体がニードル表面を濡れて行き、電圧の立下りにおいて、ニードル先端より吐出するためである。これらの結果より、微細液滴を高精度に位置・サイズ制御して描画するには、ニードル型インクジェットノズルが適している。

さらに、ゲート駆動により、液滴を吐出できることを示した。シングルゲート駆動の場合は、液滴が描画用基板に到達せずにゲートへ戻る問題があったがそれを解決するためにダブルゲート駆動を考案し、液滴飛翔を能動的に制御できることを示した。

(2) 非晶質シリコン薄膜の金属誘起固相結晶化への応用

ニードル型インクジェットノズルを使用して、ニードル先端の曲率半径 (2, 5, 30 μm) および印加電圧の波形数 (1, 5, 25) を制御することにより、Ni コロイド溶液の描画ドットサイズ (0.86-50.4 μm) を制御する方法を示した。曲率半径を小さくすること、または、ドット当たりの波形数を少なくすることにより、描画サイズを小さくすることができた。さらに、波形数制御の方が描画サイズのバラツキを小さくできることを示した。

これらの結果を元に、非晶質シリコン薄膜上の所定の位置に Ni コロイド溶液を描画して結晶化熱処理を実施した。その時の結晶化形態は、Ni 濃度および描画ドットサイズに依存することを示した。描画ドットサイズを小さくすれば単結晶粒を生成できることを実証し、単結晶粒の生成確率とドットサイズの関係を理論的に考察した。

(3)シリコン微細加工技術による静電式ニードル針型インクジェットノズルの作製

ニードルの先端曲率半径を小さくできれば、さらなる微細化が実現できる。pn 接合構造における正孔の流れを利用して微細な針構造を形成できる陽極化成を応用して、高さが 100 ミクロン程度で先端の太さが数百ナノメートルの極めてアスペクト比の大きなシリコン針を作製した。この針を組み込んだ静電式ニードル型インクジェットノズルを作製して、吐出挙動と描画特性を調べた。このノズルを使用して、直径が 0.32 μm の極微細なドット描画を実現した。

論 文 調 査 の 要 旨

インクジェットによる描画は、必要量だけの材料を対象物の表面の所定の位置に直接描画できるので、既存のフォトリソグラフィーやスクリーン印刷技術と比較して、環境への負荷が少ない、製造プロセス設計の自由度が高く少量多品種生産が可能、大面積デバイスや三次元形状のデバイスの製造が可能になるなど、新たな電子デバイス製造技術を創出できるものとして注目される。インクジェット技術そのものの研究は 1960 年代にまでさかのぼるが、電子デバイス製造を意図した研究は 2000 年頃から行われるようになってきた。これまでの研究開発の成果により、現在では液晶ディスプレイに利用されるカラーフィルターパネルに実用されており、プリント回路基板の製造も可能になってきている。また、有機半導体を使った薄膜トランジスタや発光ダイオードなどへの応用が検討されている状況にある。

これらの応用には現在、ピエゾ効果を利用した機械式のインクジェット駆動が用いられている。この方式で描画する場合の細線幅の微細化は数十μm までに留まっている。描画可能な細線幅を 1μm 以下にできれば、電子デバイス製造技術としての応用の可能性が出てくる。

現状のインクジェット技術における描画線幅の微細化の限界は、液滴の吐出を細管の先端から液を押し出す方式であることに由来する。本研究は、液を引き出して吐出する方式である、静電式インクジェットに着目した。液滴の静電吐出現象は以前より知られており、容器などの印字に応用された例はあるが、液滴の吐出挙動に関しては未解明の部分が多く、微細描画に応用できる水準まで理解できているとは言い難い。本研究は、静電方式における液滴の吐出機構を解明することから着手し、液滴吐出の制御に関する重要な知見を見出すとともに、独自のシリコン加工技術を用いた吐出ノズルを作製して微細な図形描画の実現に取り組んだものである。本研究の成果は、以下の四点に要約できる。

(1) 液滴生成挙動の解明： 静電式インクジェットによる液滴の吐出過程を直接観察可能な描画装置を設計試作した。この装置に組み込んだ高速度カメラによる画像の詳細な観察、および液体の運動方程式(ナビエ-ストークスの式)を元にした数値解析を併用して、液滴の吐出は階段状の印加電圧の立下り直後に発生することを見出した。これは、静電力によって生成されたテイラーコーン型のメニスカスに対して電圧の急激な立下りによって誘導された液体の揺動が加わることで、液体の表面張力を駆動力として液滴が生成されるためであることを明らかにした。

(2) 液滴吐出の制御法： キャピラリーの中にニードルを配置したニードル型静電式インクジェットノズルを用いた場合、電圧印加によるエレクトロウェティング現象により、微量な液体がニードル表面をその先端に向かって濡れ拡がり、先端にてテイラーコーンが生成され吐出に至ることを見出した。キャピラリー型ノズルにおけるこの液滴吐出機構では、一度の吐出事象に関わる液滴の量が、ニードルを持たないキャピラリー型に比べて少ないため、微細描画が可能であること、および、広い周波数範囲にわたり印加した方形波に同期して液滴を吐出できることを明らかにした。また、液滴に残留する電荷の影響を排除して液滴の飛行路を整えるためのダブルゲート駆動法を考案した。

(3) シリコン微細加工技術を利用したニードル型静電式インクジェットノズルの実現： ニードルの先端曲率半径を小さくすれば微細描画を実現できるとの指針を示し、シリコンの微細加工技術を利用したノズルの製作に取り組んだ。pn 接合構造におけるキャリヤの流れを利用して微細な針構造を形成できる陽極化成を応用し、高さが 100μm 程度で先端の太さが数百 nm の

極めてアスペクト比の大きなシリコン針を作製した。この針を組み込んだ静電式ニードル型インクジェットノズルを作製し、直径が 0.3 μm の極微細なドット描画を実現した。

(4) 薄膜トランジスタ材料技術への応用：　ニードル型インクジェットノズルを使用して、Ni コロイド溶液の微細ドットを非晶質シリコン薄膜表面に配列し、金属誘起固相結晶化現象を利用して位置選択的結晶成長が可能であることを示した。また、有機半導体材料についても位置選択的結晶成長が可能であることを実験的に示した。これらの成果は、ディスプレイ等の大型電子デバイスの製造に有用である。

以上要するに本論文は、製造エネルギーおよび資源利用の合理性を飛躍的に向上できる新たな電子デバイス製造技術の実現を目指し、極微細な液滴を吐出できるインクジェット方式とそのデバイス化に取り組んだ結果、インクジェット技術に関する科学的理解を大きく進展させるとともにその応用の可能性を示したものである。これは、電子デバイス工学上の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　　飯野　由里江
学 位 記 番 号　　シ情　博甲第 391 号（工学）
学位授与の日付　　平成 22 年 3 月 25 日
学位論文題名　　特許情報を用いた研究開発組織の分析

論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　廣　川　佐千男
（副　査）　〃　　〃　　竹　田　正　幸
〃　　〃　　〃　　村　上　和　彰

論 文 内 容 の 要 旨

少子化や若者の技術離れ、BRICs などの諸外国の技術発展により、日本の相対的技術開発力の低下が叫ばれている。経済産業省や特許庁などの政府機関を中心として、プロパテント政策からイノベーション創出の取り組みへと転換が始まっている。イノベーション創出に有効な研究開発組織の検討等がなされているが、その多くは優秀な発明を行った研究者やイノベーションが盛んな企業へのインタビューやアンケートなど、社会学的手法によるものであり、研究開発組織の詳細まで客観的にとらえることは難しい。分析者に依存せず効率的に、個々の研究者や研究開発グループと研究開発活動の概観まで分る客観的な分析手法が求められている。

従来、技術イノベーション創出の成果の多くは、学術論文として発表されてきた。しかし、将来の事業独占に大きな影響を与えることから、企業や企業の研究員にとって特許出願の重要性が増している。特許は、すべての技術分野について、技術開発の結果が一定の書式で公開されるもので、特許庁の審査に耐えうる客観性のある高い技術内容と考えられる。さらに日本だけでも年間約 40 万件も出願される膨大なテキストデータであるので、特許庁や企業の知的財産部における調査等の実務的ニーズに対して、商用の検索システムだけでなく、特許検索技術についての研究が多数報告されている。一方、経営的ニーズから特許を分析する手法も求められるようになっている。例えば、技術動向の把握、関連技術分野における自社ポジショニングの把握、より具体的には競合企業の研究開発組織の分析など、研究開発の方針決定に重要な事柄がある。しかし、これらの経営的ニーズに対する研究事例は必ずしも多くはない。

本論文では、特許情報を客観的データとして利用し、企業の研究開発組織を分析する手法を提案する。企業名、国際特許分類、技術用語あるいは出願年を検索語として得られる検索結果の特許明細書集合について、発明者や技術用語の共起関係を可視化する。具体的な企業や企業群について提案手法を適用することで、企業の研究開発組織の特徴や違いや変化を把握できることを示す。

特許情報には、出願人名、発明者名、特許として取得する技術的内容等、多くの情報が記載されている。特に発明者数や発明者の関連、技術用語の関連は、企業における研究開発組織の規模や発明者のグループの状態、注力する技術などを知る手掛かりになる。文書群における単語の共起情報を可視化する手法として概念グラフが知られている。まず本論文では、この概念グラフを、特許明細書に含まれる発明者名に適用し、研究開発組織を可視化する発明者概念グラフを提案する。発明者概念グラフでは、まず、出願件数の少ない発明者から見て、共起頻度の割合が閾値以上である出願件数の多い発明者との間に上位下位関係を定める。発明者概念グラフは、発明者を頂点、隣接上位・下位関係にある発明者の組を辺とする有向グラフとして定式化される。関連する研究者を近くに配置することで研究者グループのまとまりを把握でき、上位の研究者を左側に配置することで、各グループの中心的研究者、中心的研究者と他の研究者の関連、そして、異なるグループの間の関連を有向グラフとして把握できる。発明者名だけでなく、要約等に含まれる技術用語や国際特許分類を特徴語として同時に表示させることにより、研究開発組織の構造と各発明者グループの研究開発内容も合せて把握できることを事例分析により示す。

著者は、発明者概念グラフの構造分析を行う過程で、発明者関連度閾値を下げることによって、可視化された発明者グループのつながりが複雑になること、そして、企業によってその複雑化の程度に違いがあることを見出した。本論文では、これを発明者関連度の分布として定量化し、化

粧品関連の日本企業と外国企業で比較し、外国企業は日本企業より発明者グループの固定化の度合が高いという結果を得た。これは、社会学的手法を用いて日本企業とフランス企業の研究マネジメントを比較した瀬谷等による研究事例と合致している。さらに本論文では、技術分野による研究開発組織の違いや、同一企業・同一技術分野であっても経年で研究開発組織が変化することを分析し、本提案の手法が研究開発組織分析に有効であることを示した。特に、時系列的分析の対象とした化粧品関連の日本企業が、2001 年を境に柔軟な日本型研究組織から、固定的な構造の外国型組織に変わっているという、他の研究等では報告されていないことを発見した。この発見は、特許以外の他の情報により確認できた、その企業における大きな組織改革と符合している。

論 文 調 査 の 要 旨

企業にとって競合企業やその業界の研究開発の動向分析は重要である．従来，特許出願件数や研究者数，あるいは売上や利益率などの指標を用いた大局的な分析や，学術論文，特許明細書，技術報告などの個別分析が行われている．また企業経営という観点から，技術革新を続けている優良企業について，研究者や経営者へのインタビューと，売上や利益率という経営的尺度を合せて分析するケーススタディが多く報告されているが，個別の詳細な分析と組織の大局的な分析を合せ，客観的かつ効率的に研究開発組織を分析する手法が求められている．

近年，日本の技術開発力の低下が叫ばれ，プロパテント政策とイノベーション創出のための取り組みが始まっている．また，特許出願とイノベーションの創出は密接な関係があることが知られている．特許庁や企業の知的財産部員の調査等の実務的ニーズに応えるため，特許に対する検索やデータマイニングの研究が報告されている．しかし，将来技術動向や関連技術分野での自社ポジショニングの明確化，競合する研究開発組織の分析などの経営的ニーズに応える研究事例は多くない．

本論文は，分析対象とする企業が出願人である特許明細書を客観的データとして利用し，そこに現れる発明者の関連を可視化する発明者概念グラフという手法を提案し，具体的な企業群に対し適用し，研究開発組織の分析に有効であることを示しており，以下の点で評価できる．

第一に，著者は，2000 年から 2005 年の間に日本で出願された全ての化粧品関連特許から，出願件数上位の日本企業3社,外国企業3 社について発明者概念グラフを構築し，日本企業と外国企業の研究開発組織の特性を比較している．日本企業では小規模のグループが弱くつながり，全体としては大きなグループを構成するのに対し，外国企業では，小規模のグループが独立していることを発見している．これは，出願件数，発明者数，発明者一人当りの発明件数などの単純な統計的指標では得られない特性である．日本企業と外国企業のこのような特性の違いは，多くの研究者を対象としたインタビューを人手で解析した瀬谷らの報告と符合しているが，本論文はこれを，特許情報という客観的データを使って機械的に示したものである．さらに著者は，研究者のつながりの強さを表す発明者間の関連度とその分布という尺度を提案している．外国企業では強いつながりの研究者の組が大半を占めるが，日本企業ではつながりの強弱に多様性があるという事を示し，外国企業と日本企業の発明者概念グラフの違いの要因を定量的に解明している．

第二に，著者は，1998 年から 2002 年に出願された化粧品，殺虫剤，洗浄剤，紙箱，時計，印刷，製紙，燃料電池の 8 分野の全特許情報を用いて，分野ごとの発明者概念グラフを分析し，研究組織の違いを明かにしている．例えば，同一企業であっても，時計では発明者概念グラフは非常に単純だが，燃料電池では複雑な大きなグラフとなるという組織の違いを発見している．この発明者グループの差異から，単独発明の割合という指標を得て，単独発明が多数を占めるという時計分野の研究開発組織の特色を効率よく発見している．

第三に，著者は，研究開発組織の時系列変化を，発明者概念グラフの変化として捉える手法を提案し，新な技術開発を続ける優良企業として多くの分析がなされている花王株式会社を対象として分析を行っている．その結果，2001 年を境に発明者関連度の分布に幅がある日本型の発明者概念グラフから，関連度の強い研究者群からなる独立した小グループ群の外国型発明者概念グラフに大きく変わっていることを発見している．後の調査により，2000 年は，花王株式会社で EVA(Economic Value Added) という業績評価手法を導入し全社員への評価に適用開始した年であることが判明している．これは，従来の統計的分析やケーススタディによる報告はなく，本研究で初めて明らかになったものであり，提案手法の有効性と優位性を示すものである．

以上要するに，本論文は，研究開発組織の構造を特許明細書における発明者の共起情報から抽出し可視化する手法を提案し，企業による研究開発組織の違い，分野による研究開発組織の違い，時系列的な研究開発組織の変化の分析に提案手法を適用し，その有効性を実証したものであり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（工学）の学位論文に値すると認める．

氏　　名　　井 上　仁
学 位 記 番 号　　シ情　博甲第 392 号（工学）
学位授与の日付　　平成 22 年 3 月 25 日

学位論文題名　A Study on e-Learning Supporting Environment
(e ラーニング支援環境に関する研究)

論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　廣　川　佐千男
（副　査）　〃　〃　青　柳　　睦
〃　〃　〃　藤　村　直　美

論 文 内 容 の 要 旨

教育改善手法として、情報通信技術を利用した教育、いわゆる e ラーニングが多くの高等教育機関で実用的に使われ始めている。e ラーニング導入により、教育の主体者である学生や教員そして組織の各立場から、教育の機会、効果、効率、魅力などの向上が期待されている。

e ラーニングによる改善には、遠隔教育のように地理的時間的な制約を排除し教育の機会を増やす量的改善と、従来型のオンキャンパス授業と併用することにより教育の効果や効率を上げる質的改善の二つがある。また、e ラーニングの利用という観点からは、導入期、活用期、発展期の三段階で捉えることができる。導入期では、新たな教育手法が教員に根づいていないために、個々の教員の利用開始の障壁が大きな課題として残っている。教材の充実と日常的な授業支援システムとして e ラーニングが利用される活用期では、教材作成の手間が問題となり、それを軽減するシステムが重要となる。発展期で一番期待されているのは、学生の個々の特性に応じた評価と教育、ならびに教育内容そのものの改善であるが、個々の事例報告しか行われていないのが現状である。その原因は、高等教育機関で多く利用されているコース管理システム(CMS)の機能が不十分であることだけでなく、CMS に蓄積された学習履歴情報を活用して教育学習活動を把握する手法が完成されていないことが大きい。

本論文では、CMS を利用した e ラーニングにおいて、教員の教育活動を質的に改善するための支援システムと、改善のための教育学習活動把握の手法を提案し、実データを使って提案手法の有効性を分析した。

まず研究の背景と動機を述べた後、第 2 章では、CMS 導入期において個々の教員の利用開始の障壁を減らすための教員を支援するヘルプシステムを提案している。このシステムでは、教材、CMS の利用法、および教育実践事例等のさまざまな形式のファイルを蓄積し、教員がこれらのファイルを明示的に検索することによって蓄積された情報を提示するだけでなく、教員の利用状況や利用履歴を用いることで、教員の明示的な検索なしに関連文書を提示する機能を有する。また、CMS 活用期においての問題点である教材の作成と共有や再利用の問題を、ソフトウェアの開発過程と対比して捉え、ソフトウェアの開発において一般的に用いられるモジュール化と版管理システムの手法を教材の開発と共有・再利用のために拡張したシステムを提案している。CMS は、商用・非商用のものが多く存在し、各大学の e ラーニング実施に最適なシステムが導入されている。第 3 章では、教育学習活動把握の実践と手法の蓄積と共有化が重要であるという観点から、利便性、拡張性、CMS からの独立性のある統一的プラットフォームを提案し、教育学習活動の把握が可能となることを示した。

第 4 章では、学生の学習活動を把握する手法を提案している。学生の学習活動把握には、CMS に記録される学習履歴情報が有用であるが、分析手法はまだ確立されていない。本論文では、学生の学習活動を学習成果、反応、行動の三つの観点で捉え、学生群を全体、層別、個別という階層的に把握し、活動状況を数値化する分析手法を提案し、実際の授業における学習履歴情報を元に個々の観点から分析した。

第 5 章では、教員の教育活動の改善を目的とした形成的評価手法を提案している。まず、半年間あるいは一年間の一連の授業(コース)だけなく、それを構成する個々の授業(レッスン)、さらにレッスンにおいて実施される小テストのように階層的に授業を捉える。実際の授業での履歴を使って、各段階での相互比較や、全体での位置づけとして分析できることを示している。最後に、授業内容の難易度、受講者の授業直後の理解度、復習省察後の理解度の評価基準により、授業を客観的に評価する分析手法を提案した。各評価基準は、項目応答理論を用いて客観的かつ定量的に測定可能である。そのため、同一のコースでの異なるレッスン間での比較、異なるコース間での比較分析が可能であり、従来研究で扱うのが難しかった授業改善の分析を実現するものである。

論 文 調 査 の 要 旨

教育改善手法として，e ラーニングが多くの高等教育機関で実用的に使われ始めている．教育の主体者である学生や教員そして組織の各立場から，教育の機会，効果，効率，魅力などの向上が期待されている．e ラーニングによる改善には，遠隔教育のように地理的時間的な制約を排除し教育の機会を増やす量的改善と，従来型のオンキャンパス授業と併用することにより教育の効果や効率を上げる質的改善の二つがある．しかし，e ラーニングによる質的改善についてはまだ多くの問題が残っている．e ラーニングの利用には導入期，活用期，展開期の３つの時期がある．導入期では，新たな教育手法が根づいていないために，個々の教員が利用を始めること自体が大きな課題である．日常的な授業支援システムとして e ラーニングが利用される活用期では，充実した教材を作成する手間が問題となり，それを軽減するシステムが重要となる．発展期で一番期待されているのは，学生の個々の特性に応じた評価と教育，ならびに教育内容そのものの改善であるが，個々の事例報告

しかないのが現状である．その原因は，高等教育機関で多く利用されているコース管理システム(CMS)の機能が不十分であることだけでなく，CMS に蓄積された学習履歴情報を活用して教育学習活動を把握する手法が確立されていないことが大きい．

本論文は，CMS を利用した e ラーニングにおいて，教員の教育活動を質的に改善するための支援システムと，改善のための教育学習活動把握の手法を提案し，実データを使って提案手法の有効性を示したものであり，以下の点で評価できる．

第一に，著者は，CMS 導入期における個々の教員の利用開始の障壁について，利用状況や利用履歴を用いる関連文書ヘルプシステムを提案している．また，CMS 活用期における教材の作成と共有や再利用の問題については，ソフトウェアの開発過程におけるモジュール化と版管理を拡張したシステムを提案している．いずれも，e ラーニング支援環境の具体な改善方法を示したもので意義がある．

第二に，著者は，学生とコースという観点に着目し，教育の改善を行うための形成的評価システムの提案を行っている．形成的評価とは，小テストなどを繰り返すことで学生の学力や理解度をモニターし，学生だけでなくコースの効果も評価して改善する仕組である．CMS に記録される学習履歴情報について，学生の学習活動を学習成果，反応，行動の三つの観点で捉え，学生群を全体，層別，個別という階層的に把握する手法を提案している．これは，有用性が期待されてきたものの，確立された分析手法がなかった学習履歴情報を，学習活動の定量的分析に活用する一般的な指針を示したもので意義がある．

第三に，著者は，項目応答理論に基づく学習履歴の可視化による分析手法を提案し，具体的な事例について有効性を示している．提案手法では，まず，半年間あるいは一年間の一連の授業だけなく，それを構成する個々の講義，さらに講義において実施される小テストのように階層的に授業を捉える．また，授業内容の難易度，受講者の授業直後の理解度，復習省察後の理解度を，項目応答理論を用いて客観的かつ定量的に測定する．学生の理解度分析に学習履歴を利用した事例研究は多くあるが，異なる科目間の比較や一つの科目の講義であっても異なる回における理解度の比較など，従来研究で扱うことが難しかった授業改善の分析を実現するものである．

以上要するに，本論文は，CMS を利用した e ラーニングにおいて，教員の教育活動を質的に改善するための支援システムと，改善のための教育学習活動把握の手法を提案し，実データを使って提案手法の有効性を示したものであり，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（工学）の学位論文に値すると認める．

氏　　名	中　藤　哲　也
学 位 記 番 号	シ情　博甲第 393 号（工学）
学位授与の日付	平成 22 年 3 月 25 日
学位論文題名	A Study on Pattern Discovery and Information Extraction from Web Documents (Web 文書群からのパターン発見と情報抽出に関する研究)

論文調査委員

（主　査）	九州大学	教　授	廣　川　佐千男
（副　査）	〃	〃	竹　田　正　幸
〃	〃	〃	鈴　木　英之進

論 文 内 容 の 要 旨

Web 上の様々な文書のうち，検索結果としてデータベースから生成される動的ページの量は一般的な静的ページよりも圧倒的に多い．そのようなサービスを提供しているサイトは Web データベースと呼ばれている．複数の Web データベースを利用して統合検索を行うには，クエリーの入力形式を解析してクエリーを個々の Web データベースに送ることと，検索結果から必要なコンテンツ部分を抽出することが必要となる．そのためのプログラムはラッパーと呼ばれる．Web データベースの数は増えつづけており，その入出力の形式はより複雑となる傾向があり，また頻繁に更新されるため，個々の Web データベースについて人手でラッパーを作って維持することは困難である．そのため，ラッパーの自動生成が期待されている．

本論文では，ラッパーの自動生成に必要なクエリーの入力形式を自動的に推定するアルゴリズム，検索結果から必要なコンテンツ部分を抽出する情報抽出ラッパーの自動生成アルゴリズムの両方を提案した．また，情報抽出ラッパーの生成に用いた不一致を許す文字列照合アルゴリズムについて，新たな方法を提案し高速化と精度向上を達成した．

入力形式の推定については，まず収集した 553 サイトに関して入力フォームの詳細を調査し，入力フォームの自動的な生成方法，論理和や論理積に対する検索式の表現を推定する手法を提案した．13 のサイトに対して実験を行い，その有効性を確認した．また，属性の異なる複数の入力項目を持つサイトの増加に対して，入力項目の構成等を詳細に調査し，入力項目の個々の属性を推定する方法を提案し，無作為に選んだ 134 サイトについて評価を行った．

情報抽出ラッパーの自動生成に関しては，まず具体的に 114,540 個の Web データベースのリストをまとめ，その中から無作為に選んだ 51 サイトの出力形式を分析し，情報

抽出ラッパーの性能を評価するためのテストベッドと評価尺度を提案した．加えて，不一致を許す文字列照合アルゴリズムを用いた反復パターン発見手法を提案し，反復パターンによる情報抽出ラッパーを自動的に生成して，テストベッド 51 サイトのデータを用いた評価を行った．

さらに本論文では，反復パターン発見に用いた文字列照合アルゴリズムについて高速化と精度向上の研究を進めた．不一致を許す文字列照合問題は，長さ n の文字列 T（テキストと呼ばれる）中の全ての位置における長さ m の文字列 P（パターンと呼ばれる）との文字の一致数を表すスコアベクトルを求める問題として定式化される．スコアベクトルの i 番目の要素 c_i は，P が T の i 番目の位置に置かれた場合の T と P の文字の一致数である．ナイーブな手法での計算時間は $O(mn)$ であるが，文字列の比較に畳み込みを使えることに着目した高速フーリエ変換を用いた確率的アルゴリズムが Atallah，Baba，Schoenmeyr らなどにより提案されており，k 個のサンプルを用いた際の計算時間は $O(kn \log m)$ である．

これらのアルゴリズムでは文字を数値に変換する複数の写像を用いてスコアベクトルを求める．全ての写像に関して計算を行えば厳密な解が求まるが，これら確率的アルゴリズムでは高速化のためにサンプルによる近似解を求める．写像集合の生成手法により，写像の総数とそれらから得られる近似解の精度が異なる．本論文で提案した写像生成手法では，既存手法と比較し，生成される写像の要素数が極めて少ない．いずれの手法でも写像総数はアルファベットのサイズ σ に依存しており，Atallah らのアルゴリズムでの写像総数が σ^{σ}，Baba らでは 2^{σ}，Schoenmeyr らでは $\sigma!$ であるのに対して，本提案手法での写像総数は理論上最小である $\sigma-1$ である．

サンプリング方法として，重複を許してサンプルを選ぶ復元抽出と，異なるサンプルを選ぶ非復元抽出とがあり，サイズ s の母集団から k 個のサンプルを選ぶ場合には非復元抽出による分散は復元抽出による分散の $(s-k)/(s-1)$ 倍となる．写像総数が大きい場合，サンプル数を増やしても精度は余り向上しない．写像総数が理論上の最小値である本論文の提案手法は，サンプル数を増やす事による精度の向上が最大である．

実際に，非復元抽出による各手法の分散を理論的に求め，提案手法の精度が最も高い事を示した．更に，提案手法と代表的な既存アルゴリズムである Atallah らの手法との実験的な精度の比較を行った．精度の値に影響すると思われるスコア，パターン長，アルファベットサイズ，サンプル数をパラメータとして，提案アルゴリズムと既存アルゴリズムを実行し，推定値の正解値に対する分散を求めて比較した．その結果，提案アルゴリズムの推定値の精度が常に高い事を確認した．

論 文 調 査 の 要 旨

WWW 上の文書として，人手で書かれた静的な文書の他に，特定の目的や分野についてのデータベースからキーワード検索の結果として動的に生成されるページが多数ある．このような検索サービスを提供しているサイトは Web データベースと呼ばれる．複数の Web データベースを利用して統合検索を行うには，検索キーワードを各サイトの入力形式にしたがって送信し，検索結果から必要なコンテンツ部分を抽出することが必要となる．そのためのプログラムはラッパーと呼ばれる． Web データベースの数は増え続けており，同じ Web データベースでも入出力形式の変更もあるので，人手でラッパーを作成し維持することは困難で，ラッパーの自動生成が期待されている．

以上を背景として，本論文は，クエリ入力形式の自動推定アルゴリズム，検索結果から必要なコンテンツ部分を抽出する情報抽出ラッパーの自動生成アルゴリズム，ラッパー生成のための不一致を許す文字列照合アルゴリズムについてまとめたもので，以下の点で評価できる．

第一に，著者は，まず，多数の実在する Web データベースについて，入力フォームの詳細な分析を行っている．その結果に基づき，クエリ入力形式を推定する方法，複数キーワードによる論理検索式の形式を推定する方法，および，属性の異なる複数の入力項目を持つサイトについて入力項目の属性名を推定する方法を提案し，定量的評価により提案手法の有効性を示している．これはラッパー自動生成についての入力部分の課題を解決したものとして評価できる．

第二に，著者は，不一致を許す字列照合アルゴリズムを用いた反復パターン発見手法と，反復パターンによる情報抽出ラッパーの自動生成法を提案し，定量的評価により有効性を示している．定量的評価に使ったテストベッドは，114,540 個の Web データベースのリストをまとめ，その中から無作為に選んだ 51 サイトの出力形式を分析し評価尺度を定めたもので，他の研究者にも利用されており評価できる．

第三に，著者は，不一致を許す文字列照合問題に着目し，従来の手法よりも高速で精度のよい確率的アルゴリズムを提案している．不一致を許す文字列照合問題は，長さ n の文字列中の各位置に長さ m の文字列を並べたとき，二つの文字列の対応する位置の文字の一致数を表すスコア・ベクトルを求める問題として定式化される．素朴な手法では計算時間は $O(mn)$ となるが，各文字を数値に変換し文字列の比較に畳み込みを使うことで，アルファベットサイズ σ について計算時間が $O(\sigma n \log m)$ となるアルゴリズムが知られている．Atallah ら，Baba ら，Schoenmeyr らは，それぞれこの改良として，文字を数値に変換する写像集合から k 個のサンプルを利用することで計算時間が $O(kn \log m)$ となる確率的アルゴリズムを提案している．写

像集合の生成手法により，写像の総数と得られる推定値の精度が異なる．本論文では，写像総数が理論的に最小である $\sigma-1$ となる手法を提案し，推定値の正解値からの分散を理論的に評価することで，サンプル数の増加による精度の向上が他の手法より大きいことを示している．さらに，提案アルゴリズムと代表的な既存アルゴリズムである Atallah らの手法について，実験的な精度比較を行い，提案手法は Atallah らの手法より精度がよいだけでなく，十分小さなサンプル数で正解が得られることを実証しており，実用的な確率的アルゴリズムとして評価できる．

以上要するに，本論文は，Web データベースのクエリ入力形式の自動推定アルゴリズムと，検索結果から必要なコンテンツ部分を抽出するラッパー生成アルゴリズム，および，ラッパー生成のための不一致を許す文字列照合アルゴリズムを提案し，有効性を示したものであり，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（工学）の学位論文に値すると認める．

氏　　名	中　村　直　人
学 位 記 番 号	シ情　博甲第 394 号（情報科学）
学位授与の日付	平成 22 年 3 月 25 日
学 位 論 文 題 名	3D Multimedia Data Search Systems Based on Stochastic Attributed Relational Graph Matching (確率的 ARG マッチングを用いた 3 次元マルチメディアデータ検索システム)

論文調査委員

（主　査）　九州大学　准教授　岡　田　義　広
（副　査）　〃　教　授　竹　田　正　幸
〃　〃　〃　瀧　本　英　二

論 文 内 容 の 要 旨

近年におけるグラフィックデバイスの急速な発達により，画像や動画像，3 次元形状モデルなどのマルチメディアコンテンツを扱うことが容易になっており，現在ではそれらを用いた多くのアプリケーションが存在する。しかし同時にユーザが扱うコンテンツの量は膨大になっており，ユーザが必要とするコンテンツを高速に見つけ出すためには，各コンテンツの特徴を効率よく表現し，それらを精度よく照合検索する技術の開発が必要不可欠である。マルチメディアコンテンツの特徴として彩色が異なる組や類似型が多く存在するため，外見などの単純な特徴を抽出するだけでは不十分である。そこで，近年ではコンテンツの構造的な特徴を用いる手法が注目されている。コンテンツの構造的な特徴を表すものとして，属性付き関係グラフ(ARG)がある。これはグラフの一種であり，部分的な特徴値を各頂点や各辺に付加することができるものである。この確率的に基づく ARG マッチング法では局所的な構造の特徴も類似度に反映することができるため，部分的な類似も評価できる手法となっている。

本論文では，各メディアのコンテンツから ARG を構築し，その ARG を特徴として扱うマルチメディアコンテンツ検索システムを提案する。そして，その検索システムを実装し，実際に検索精度を検証する。本論文では複数のメディアを対象とした検索システムを構築するため，各メディアに対する構築方法をそれぞれ提案する。本論文で扱うメディアは動画像シーン，3 次元形状モデル，モーションデータの三種である。

動画像シーン検索に関しては，問い合わせのためにスケッチインターフェイスを使用した。これによって，ユーザは直感的な問い合わせが可能となった。前処理として，カイ二乗検定を用いたキーフレーム抽出手法を使用してキーフレームを抽出した。得られたキーフレームに対してレイヤー化という手法を適用することで層状に分解し，それらからキーフレームの内容物の構造的特徴を表す ARG を作成した。検索の際には，問い合わせ画像からも同様に ARG を構築し，これらをマッチングすることで類似度を計算した。実験においては，構造的な特徴の類似したシーンを検索することができた。3 次元モデル検索に関しては，3 次元モデルの部品を頂点とし，それらの接続関係を辺とすることでグラフ構造を構築した。さらに各部品の特徴値を属性として付加し，ARG を構築した。実験においては，従来の一般的な手法よりよい結果を得ることができた。モーションデータに関しては，骨格構造からグラフを構築し，その関節の空間的な存在確率を特徴とすることで，ARG を構築することができた。実験においては，従来の一般的な手法より，部分的ではあるが良い結果を得ることができた。また，確率的 ARG マッチングは検索時間がかかるという問題があるため，これらの高速化を試みた。これはグラフ構造を対象にしたアルゴリズムを木構造に限定することで，高速化を図っている。

また，これらの検索技術を用いたアプリケーションとして，実世界のシーンからのレイアウト情報の自動抽出手法を提案した。これはロボット等で取得した実世界の画像から，内容物の構造を表す ARG を構築し，オブジェクトデータベース内の ARG と比較し，実世界のレイアウト情報を解析する手法である。実験に関しては，いくらかの有用なレイアウト情報を取得することができた。

本論文は以下の 6 章より構成される。第 1 章では，研究の背景と目的，関連研究，研究成果の要点ならびに論文の構成について述べた。第 2 章では，本論文で紹介する各シ

ステムの基礎アルゴリズムである確率的 ARG マッチングに関して詳述した。第 3 章では，確率的 ARG マッチングを用いた画像／動画シーン検索システム，3 次元形状モデル検索システム，モーション検索システムの構築方法，およびそれらの実験結果に関して記述し，その有用性を示した。第 4 章ではそれらの検索システムを応用した，実世界の画像からレイアウト情報を抽出する手法に関して述べた。第 5 章では，確率的 ARG マッチングのマッチングする対象を木構造に限定した確率的 Attributed Relational Tree(ART)マッチングを提案し，また検索実験を行うことでその有用性を評価した。最後の第 6 章では，結論と今後の研究課題について述べた。

論 文 調 査 の 要 旨

本論文は，３次元マルチメディアデータの検索システムに関するものである。近年におけるグラフィックスデバイスの急速な発達により，画像や動画像，３次元形状モデルなどのマルチメディアコンテンツを扱うことが容易になっており，現在ではそれらを用いた多くのアプリケーションが存在する。しかし同時にユーザが扱うコンテンツの量は膨大になっており，ユーザが必要とするコンテンツを高速に見つけ出すためには，各コンテンツの特徴をよく表す特徴量の抽出と，それらを用いて精度よく検索する技術の開発が必要不可欠である。マルチメディアコンテンツの特徴として彩色が異なる組や類似型が多く存在するため，外見などの単純な特徴を抽出するだけでは不十分である。そこで，近年ではコンテンツの構造的な特徴を用いる手法が注目されている。コンテンツの構造的な特徴を表すものとして，属性付き関係グラフ ARG（Attributed Relational Graph）がある。これはグラフの一種であり，コンテンツの部分的な特徴値をグラフの各頂点や各辺に付加したものである。この ARG の確率に基づくマッチング法では局所的な構造の特徴も類似度に反映することができるため，部分的な類似も評価できる手法となっている。静止画像に関しては，確率的 ARG マッチング法を用いた先行研究がいくつかあるが，十分に研究がなされているとは言えない。また，３次元形状モデルやモーションデータに関しては確率的 ARG マッチング法を用いた類似検索システムの先行研究はほとんどない。

本論文では，動画像のシーン，３次元形状モデル，モーションデータの各データからそれぞれ ARG を構築し，その ARG を特徴として類似検索を行う類似検索システムをそれぞれ開発した。各データの類似検索システムにおいて，各データから ARG を構築する手法の提案と，実システムの実装および検索精度に関する実験により，各類似検索システムの有用性を明らかにした。

動画像のシーン検索に関しては，問い合わせ画像入力のためのスケッチインターフェイスを開発した。これにより，ユーザは直感的な問い合わせが可能である。前処理として，カイ二乗検定を用いた手法により，キーフレームを抽出する。得られたキーフレームに対して新しく考案したレイヤー化という手法を適用してシーンの内容物を層状に分解し，キーフレームの構造的特徴を表す ARG を構築する。検索の際には，問い合わせ画像からも同様に ARG を構築し，これら ARG 間の類似度をシーン画像と問い合わせ画像間の類似度として類似検索を行う。実験により，構造的な特徴の類似したシーンを検索できることを示した。３次元形状モデル検索に関しては，３次元形状モデルの構成部品を頂点とし，それらの接続関係を辺としてグラフを構築する。さらに各部品の特徴値を属性として付加し ARG を構築する。実験により，従来の一般的な手法よりも高い精度で３次元形状モデルの類似検索ができることを示した。モーションデータに関しては，人体モデルの骨格構造を元にいくつかの代表的な関節を頂点としてグラフを構築し，それら関節の空間的な存在確率を特徴値として ARG を構築する。実験により，従来の一般的な手法より，部分的ではあるが高い精度でモーションデータの類似検索ができることを示した。

また，本論文では，検索時間の短縮を試みている。上記の３次元マルチメディアデータは，いずれも木構造で表すことができるため，グラフ構造を対象にした類似度評価のアルゴリズムではなく，木構造（ART）を対象にした類似度評価のアルゴリズムを用いることにより，検索時間の短縮が図れる。木構造を対象にした類似度評価のアルゴリズムを新たに提案した。

さらに，本論文では，上記動画像シーン検索技術の応用として，実世界のシーンからのレイアウト情報の自動抽出手法を提案している。これは，ロボット等で取得した実世界の画像から，内容物の構造を表す ARG を構築し，オブジェクトデータベース内の ARG と比較することにより，実世界のレイアウト情報を取得する手法である。実験により，いくつかの有用なレイアウト情報を取得することが可能であることを明らかにした。３次元グラフィックス応用システムの開発においては，シーンの生成は重要な要素であるが，手作業によるためこの時間の短縮が大きな課題となっている。本手法を利用することにより，３次元グラフィックス応用システムで必要となるシーンを自動生成することが可能となり，その意義は大きい。

以上のように，本研究では，動画像シーン，３次元形状モデル，モーションデータの各データからそれぞれ ARG を構築しその ARG を特徴として検索を行う類似検索システムをそれぞれ開発し，各データから ARG を構築する手法の提案と実システムの実装および検索精度に関する実験により各類似検索システムの有用性を明らかにし，また，類似検索時間短縮のための ART 間の類似度計算法を新たに考案し，さらに，実世界にあるオブジェクトの実画像か

らそれらオブジェクトのレイアウト情報を取得するために確率的 ARG マッチング法による動画像シーン検索技術が利用できることを示した。これらは，情報科学上価値ある業績である。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	宮　原　克　典
学 位 記 番 号	シ情　博甲第 395 号（情報科学）
学位授与の日付	平成 22 年 3 月 25 日
学位論文題名	3D Graphics Applications Supporting Various Peripherals and Their Network Collaborative Environments（様々な周辺機器をサポートした３次元グラフィックス応用システムとそのネットワーク上の協調作業環境に関する研究）

論文調査委員

（主　査）	九州大学	准教授	岡　田　義　広
（副　査）	〃	教　授	竹　田　正　幸
〃	〃	〃	瀧　本　英　二
〃	〃	〃	志堂寺　和　則

論 文 内 容 の 要 旨

近年の計算機ハードウェア技術の発達により，高精細な３次元 CG 画像や３次元 CG アニメーションを作成することが可能となってきている。一方仮想現実感に関する研究においては，より現実世界に近い操作感を与えるために様々な周辺機器が提案，開発されてきている。これらの周辺機器を利用することにより，高い没入感を得ながらオブジェクトを操作できる３次元グラフィックス応用システムの開発が可能である。しかし，このような特殊な機器を利用可能なシステムは少なく，現在も広く一般に普及するに至っていない。そこで本論文では，様々な周辺機器をサポートする３次元グラフィックス応用システムについて研究開発を行った。

本論文では，まず，触力覚機能のある３次元入力デバイスをサポートした３次元グラフィックス応用システムとして，衣服デザインシステムの開発を行った。現在までに多くの衣服シミュレーションシステムが提案されてきたが，３次元グラフィックス表現された仮想空間内で３次元人体モデルに直接生地をあてながら，直感的に生地を裁断・裁縫または着色することにより服飾デザインを行うシステムはこれまでに提案されていない。そこで，触力覚機能のある３次元入力デバイスを利用して，３次元仮想空間内で「切る」，「縫う」などの直感的な操作により服飾デザインを行うことが可能であり，またネットワークを介した協調作業により，離れた場所にいる複数ユーザでデザインが出来る新しい服飾デザインシステムの開発を行った。さらに，触力覚のある３次元入力デバイスを利用した場合とマウスデバイスや液晶タブレットを利用した場合の操作性についてユーザ評価を行うことにより，どの種類の操作がそれぞれのデバイスに適しているのかを明らかにした。

また，３次元グラフィックス応用システムが様々な周辺機器をサポートするためには，３次元グラフィックス応用システムがそれら周辺機器と通信を行う際のデータの標準化が必要である。従来，３次元グラフィックス応用システムは，それぞれ個別のフォーマットのデータファイルを利用していたが，近年，応用システム間でデータファイルの共有を図るための COLLADA(COLLAborative Design Activity)とよばれる XML ベースのデータフォーマットが提案されている。本論文では，COLLADA ファイルに３次元形状データだけではなく触力覚情報や注釈情報等の周辺機器の操作に対応した情報を定義追加することを提案している。これにより，それら周辺装置をサポートした３次元グラフィックス応用システム間でデータファイルの再利用性を高めることが可能となる。実証システムとして，手術トレーニングシステムの開発を行いその有用性を明らかにした。

さらに本論文では，様々な周辺機器をサポートする３次元グラフィックス分散共有空間応用システムの開発を可能にする基盤システムの開発を行った。本システムでは，共有空間は複数の分散された個別３次元 CG 空間で構成されており，それぞれ異なるサーバで管理されるため，従来のクライアント・サーバ型システムにおけるサーバの負荷集中問題はなく，建設的に大きな共有空間を構築することが可能となった。また，分散管理される個別の３次元 CG 空間の編集機能も提供し，３次元 CG オブジェクトに様々な機能を GUI 操作により定義でき，プログラミング知識のないユーザでも簡単に３次元グラフィックス応用システムの開発が可能となっている。

本論文は以下の５章より構成される。第１章では，研究の背景と目的，関連研究，研究成果の要点ならびに論文の構成について述べた。第２章では，Phantom デバイスを用いることにより，直感的な操作によって３次元キャラクタの衣服を作成可能な服飾デザインシステム，更に複数の Phantom による Internet を介した協調作業環境について述べた。また，マウスや液晶タブレットを利用できるようシステムの拡張を行い，それぞれの入力デバイスがどのような操作に適しているかの評価実験結果を示した。第３章では，COLLADA ファイルを利用した様々な周辺機器をサポートするための３次元グラフィックス応用システムについて詳述した。ここでは３次元グラフィックス応用システ

ムとして手術シミュレータの開発を行い， COLLADA ファイルの拡張の例を示した。第４章では，３次元グラフィックス分散共有空間応用システム開発のための基盤システムである RoCoS（Room-Based Communication System）について詳述した。最後の第５章では，結論と今後の研究課題について述べた。

論 文 調 査 の 要 旨

本論文は，様々な周辺機器をサポートするための３次元グラフィックス応用システムに関するものである。近年の計算機ハードウェア技術の発達により，高精細な３次元 CG 画像や３次元 CG アニメーションの実時間表示が可能となり３次元グラフィックス応用システムの需要が高まっている。３次元グラフィックス表示によって，現実世界で見ているものと同様の空間を計算機の画面上に表現可能である。計算機の画面上に表現された３次元 CG 空間に存在している３次元 CG オブジェクトを現実世界で行っているものと同様に操作することが可能であれば，高い没入感が得られるため，高度なシミュレーションシステム等の開発が可能となる。そのため，高い没入感を得ることができる様々な周辺機器の研究開発が盛んに行われている。しかし，３次元グラフィックス応用システムにおいて，そのような特殊な周辺機器を利用するためには，それらを制御するためのプログラムを個別に開発しなければならないといった問題がある。また，ネットワークを介した協調操作可能な３次元グラフィックス応用システムにおいても同様に，このような特殊な周辺機器を利用することは容易ではないといった問題がある。さらに，どの入力デバイスを利用すれば３次元 CG オブジェクトの操作が効率よく行えるかといった点も明らかにされていない。

本論文では，まず，触力覚機能のある３次元入力デバイス，マウスデバイス，液晶タブレットを入力デバイスとして利用可能な３次元グラフィックス応用システムとして，服飾デザインシステムの開発を行った。それぞれの入力デバイスを利用して，３次元グラフィックス表現された仮想空間内で３次元人体モデルに直接生地をあてながら，「切る」，「縫う」などの直感的な操作により服飾デザインを行うことが可能であり，またネットワークを介した協調作業により，離れた場所にいる複数ユーザでデザインが出来る今までにない新しい服飾デザインシステムの開発を行った。さらに，それぞれの入力デバイスを利用した場合の操作性についてユーザ評価を行うことにより，どの種類の操作がそれぞれのデバイスに適しているのかを明らかにした。３次元 CG オブジェクトの移動操作や視点の移動操作は，３次元入力デバイスが適しているが，生地を「切る」，「縫う」の操作については，生地の表面上で入力ポインタを移動する２次元的な操作が主たるものであり，マウスデバイスと液晶タブレットが優れていることが分かった。

本論文では，また，３次元グラフィックス応用システムで様々な周辺機器を利用可能とするために，３次元グラフィックス応用システムがそれら周辺機器を制御する際のパラメータの標準化を行った。従来，３次元グラフィックス応用システムは，それぞれ個別のフォーマットのデータファイルを利用していたが，近年，応用システム間でデータファイルの共有を図るための COLLADA(COLLAborative Design Activity)とよばれる XML ベースのデータフォーマットが提案されている。本論文では，COLLADA ファイルに３次元形状データだけではなく触力覚情報や注釈情報等の周辺機器の操作に対応した情報を定義追加することを提案している。これにより，それら周辺装置を利用可能な３次元グラフィックス応用システム間でデータファイルの再利用性を高めることが可能となる。具体的には，触力覚のある３次元入力デバイスを利用するための触力覚情報，３次元 CG オブジェクトを操作した際に発生する音情報と注釈情報，におい発生デバイスを利用するための制御情報に関してパラメータの定義を行った。実証システムとして，手術トレーニングシステムの開発を行いその有用性を明らかにした。

本論文では，さらに，様々な周辺機器を利用可能な３次元グラフィックス分散共有空間応用システムの開発を可能にするための基盤システムの開発を行った。本システムでは，共有空間は複数の分散された個別３次元 CG 空間で構成されており，それぞれ異なるサーバで管理されるため，従来のクライアント・サーバ型システムにおけるサーバの負荷集中問題はなく，建設的に大きな共有空間を構築することが可能である。また，分散管理される個別の３次元 CG 空間の編集機能も提供し，３次元 CG オブジェクトに様々な機能を GUI 操作により定義でき，プログラミング知識のないユーザでも簡単に３次元グラフィックス応用システムの開発が可能である。種々の周辺機器を利用するためのインタフェースオブジェクトがあらかじめ用意されており，それら周辺機器を利用する３次元グラフィックス応用システムの開発においても，特別なプログラミングを必要としない。

以上のように，本研究では，様々な入力デバイスを利用可能な３次元グラフィックス応用システムに関して，今までにない新しい協調操作可能な服飾デザインシステムの開発を行うとともに，それぞれの入力デバイスを用いた場合の操作性についてのユーザ評価を行い新しい知見を与え，また，応用システム間でデータファイルの再利用性を高めるために，それら周辺装置の制御パラメータの標準化を行い実証システムの開発によりその有用性を明らかにし，さらに，様々な周辺機器を利用可能な３次元グラフィックス分散共有空間応用システムの開発を可能にする基盤システムの開発を行い，いくつかの応用システムの開発例を示すことによりその有用性を明らかにした。これらは，

情報科学上価値ある業績である。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　岩　橋　正　國
学 位 記 番 号　シ情　博甲第 396 号（工学）
学位授与の日付　平成 22 年 3 月 25 日
学 位 論 文 題 名　経頭蓋磁気刺激と脳波同時計測による脳内電気現象の可視化に関する研究
論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　長谷川　隆　三
（副　査）　〃　〃　森　周　司
〃　〃　〃　伊良皆　啓　治

論 文 内 容 の 要 旨

本研究の主目的は，経頭蓋磁気刺激時の脳内電気現象の動的活動の可視化である．脳内電気現象は，音，光などで被験者を刺激し，生体がどのように反応するか脳波を計測することで調べられてきた．しかし，この方法は脳を直接刺激するのではなく，外的刺激に対して脳が反応する様子を観察するいわば受動的な方法である．脳内の動的活動を調べるには，脳に直接刺激を与え，その反応を観察する必要がある．脳に直接刺激を与える方法として経頭蓋磁気刺激があり，運動野を局所的に刺激し，運動野のどこを刺激すれば，どの指が動くかなどの研究がなされてきた．更に，運動野以外の脳を刺激し，治療に用いる，高次脳機能を調べるなどの試みがあるが，その効果，影響に関して生理学的な裏付けがなされていなく，定量的に調べられていない．このため，磁気刺激時の脳内の電気現象を定量的に調べる方法が望まれている．これを見るには，脳磁図や脳波などを用いることが考えられるが，脳磁図計測室内に，磁場を発生するコイルを持ち込むことはできない．したがって，時間分解能の高い，脳波計測が有用である．

ところが，経頭蓋的に磁気刺激を行い，同時に脳波計測を行うと，磁気刺激直後の脳波に磁気による大きなアーチファクトが混入し，磁気刺激後，約 20 ms 以内の脳内電流変化を観察することはできなかった．しかし，脳波計に Sample-Hold 回路を内蔵し，磁気刺激のトリガパルスで，脳波計の入力回路の電子スイッチを約 2 ms 間 OFF することで，過大なアーチファクトの混入を防止することができたが，刺激部位付近の脳波にはまだアーチファクトが残っていた．そこで，観測された脳波に独立成分分析（ICA）を施し，磁気刺激による成分を観測脳波から取り除くことにより，アーチファクトを減少させる手法が提案された．

本論文では，まず磁気刺激直後の脳内活動の伝播を調べるため，運動野，後頭頂葉，小脳を個別に磁気刺激すると同時に脳波計測を行い，磁気刺激直後から約 30 ms までのトポグラフィーおよび脳内電流分布の時系列的な変化を見た．運動野については，過去に約 20 ms 後に反側へ興奮が伝播したと報告されているが，この部位以外を磁気刺激して，興奮の伝播を調べた報告はない．本研究でも，運動野を刺激すると約 20 ms 後に，反対側への伝播が観測された．しかし，後頭頂葉を刺激しても反側の脳には伝播しなかった．また，小脳を刺激した場合は同側の前頭葉での電流密度と刺激部位と反側の側頭―頭頂間での電流密度が高くなった．このことは，後頭頂葉では，運動野に比べ，左右間のつながりが弱いことを示している．小脳の場合は同側の前頭葉および反側の側頭―頭頂間になんらかの結びつきがあることを示唆するものであった．

次に磁気刺激を与えることで，脳活動制御の可能性を脳波計測によって調べた．本研究では，聴性オドボール課題（注意を払う特別な音刺激）を与えて脳波を計測中に磁気刺激を加えた場合，P300 潜時がどうような影響を受けるかに着目し，音刺激後，150 ms，200 ms，250 ms の時点で 3 回に分けて磁気刺激を行った．P300 は注意を払う特別な刺激がランダムに入った場合に，刺激後約 300 ms に発現する陽性の脳波である．刺激部位は P300 の発現に関与していると言われている左縁上回である．音刺激後 150 ms の時点で磁気刺激を行った場合は，P300 潜時に顕著な変化はなかったが，200 ms，250 ms の時点で磁気刺激を行った場合には，約 40 ms の潜時遅れが観察された．このことは，標的音であると認識する過程で磁気刺激したことにより，認識が遅れ，P300 潜時が長くなったためだと考えられる．

以上述べたように，経頭蓋磁気刺激を行うことで，運動野は左右の結びつきが大きいこと，小脳には前頭葉との結びつきがあること，オドボール課題呈示中に，音刺激後，200 ms または 250 ms の時点で磁気刺激を行えば，P300 の発現が約 40 ms 遅れ，磁気刺激で脳活動の制御が可能なことが分かった．これらは，磁気刺激をすることで，明らかになったものであり，経頭蓋磁気刺激と脳波の同時計測が脳内電気現象の動的活動の可視化に有用な方法であることを示している．

論 文 調 査 の 要 旨

本研究の目的は，経頭蓋磁気刺激時の脳内電気現象の可視化を行い，経頭蓋磁気刺激の効果を評価することである．これまで，脳内電気現象は，音や光などで被験者の感覚を刺激し，その際の脳波や脳磁図を計測することで調べられてきた．これは，外的刺激に対する脳の応答を観察する，いわば受動的な方法である．一方，最近の研究では，脳に直接刺激を与えてその反応を観察し，脳内電気現象を可視化する経頭蓋磁気刺激法が提案されている．経頭蓋磁気刺激では，脳に一時的な刺激を随時与えることにより，脳機

能ダイナミックスを直接調べることができる．しかし，その効果の定量的評価法については，運動野を刺激し運動誘発電位を測定する方法以外には確立されていない．そこで，新たな手法として，経頭蓋磁気刺激を行うと同時に脳波を測定することが提案された．しかし，この方法では，磁気刺激直後の脳波に磁気による大きなアーチファクトが混入し，磁気刺激後約 20ms 以内の脳波を観察することはできない．この問題を避けるため，脳波計にサンプルホールド回路を内蔵し，磁気刺激のトリガパルスで，脳波計の入力回路の電子スイッチを約 2ms 間遮断する方法がとられている．これにより，過大なアーチファクトの混入を防止できるようになったが，測定された脳波は磁気刺激による誘導アーチファクトを依然含み，脳内電気現象だけを表しているものではなかった．

以上を背景として，本論文では，経頭蓋磁気刺激と脳波計測を併用する方式において，磁気によるアーチファクトを除去する手法を提示するとともに，磁気刺激後の脳内興奮の伝搬特性および磁気刺激による脳機能制御の可能性を探究したものであり，以下の点で評価できる．

第一は，経頭蓋磁気刺激によって誘発された脳波に独立成分分析を施し，誘発脳波から磁気刺激によるアーチファクト成分を取り除く手法を提示したことである．これにより，磁気刺激後，約 5ms の時点から，電気現象としての脳波を観測することが可能となった．

第二は，上述の可視化手法を用いて脳内の興奮伝播特性を解明したことである．従来，経頭蓋磁気刺激による脳内の興奮伝播は，左右半球の運動野間で知られていたが，運動野以外の部位に対する知見は得られていなかった．著者は，運動野，後頭頂葉，小脳を個別に磁気刺激した場合の，脳波トポグラフィーおよび脳内電流分布の時系列的な変化を解析した．その結果，小脳を刺激した場合には，小脳と同側の前頭野への興奮伝搬経路と共に，対側の頭頂－側頭間への興奮伝搬経路が存在していること，また，後頭頂葉を刺激した場合には，反対側への興奮伝搬は見られず，左右半球間のつながりがないことを新たに見出している．

第三は，経頭蓋磁気刺激が脳内活動に与える影響を脳波で観測することに初めて成功したことである．著者は，聴性オドボールと呼ばれる注意課題中に，経頭蓋磁気刺激を左縁上回に加えることで，音刺激により誘発される事象関連電位である，P300 の潜時に遅れが現れることを見出した．さらに，この遅延が特定の磁気刺激のタイミングで生じることを証明した．これらの知見は，経頭蓋磁気刺激により脳機能の制御が行える証左を脳波計測でとらえた画期的成果である．

以上要するに，本論文は，経頭蓋磁気刺激と脳波計測の併用による脳内電気現象の可視化手法を提示するとともに，未解明であった小脳における磁気刺激の興奮伝搬経路を明らかにし，さらに，聴性オドボール課題を通じて磁気刺激による脳機能制御の可能性を示したものであり，生体工学上価値ある業績である．

よって，本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認める．

氏　　名　大　田　直　樹
学位記番号　シ情　博甲第 397 号（工学）
学位授与の日付　平成 22 年 3 月 25 日
学位論文題名　匿名の開環境に適用可能な協力ゲーム理論の構築
論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　横　尾　　真
（副　査）　〃　　〃　山　下　雅　史
〃　　〃　准教授　峯　　恒　憲

論文内容の要旨

協力ゲーム理論は，複数のプレイヤがどのように協力関係（提携）を形成し，提携内で得られた利得をどのように配分するかに関する理論である．協力ゲーム理論は，フォン・ノイマン以来の伝統ある研究分野であり，近年のインターネットの発展により，その適用分野が拡大している．

本研究では，従来の協力ゲーム理論を拡張し，インターネットのような，個人を特定することが困難で，多数のプレイヤが存在する環境で生じる問題に対応することを目的とする．具体的には，提携内での利得の配分方法（提携形ゲームの解概念）に関して，一人のプレイヤが複数のプレイヤになりすます架空名義操作，複数のプレイヤが単一のプレイヤとして行動する談合に対して頑健な新しい解概念を提案する．また，提携形ゲームの前段階である，プレイヤがどのような提携を形成するかを扱う提携構造形成問題を対象とし，多数のプレイヤが存在する場合に効率的に提携構造を求めるアルゴリズムを提案する．

本論文は，以下の 7 章からなっている

１章では，本研究の背景と目的，および得られた結果に関して概説する．

２章では，伝統的な協力ゲームのモデル，提携構造形成のためのアルゴリズム，提携内での利得の配分方法を与える解概念について述べる．

３章では，インターネットに代表される匿名の開環境でプレイヤが実行可能な不正行為を定式化し，既存の解概念がこれらの不正行為に対して頑健でないことを示す．

４章では，提携の安定性に着目した解概念であるコアを拡張し，上記の不正行為に対して頑健な新しい解概念である匿名操作不可能コアを提案する．

５章では，プレイヤ間の公平性に着目した解概念であるシャプレイ値を拡張した，匿名操作不可能シャプレイ値を

提案する．匿名操作不可能シャプレイ値は任意のゲームに対して一意に決定され，匿名操作不可能コアと比較して大幅に少ない計算量で求解可能であるという特徴を持つ．

６章では，提携構造形成問題を対象とし，提携の利得を表す関数（特性関数）が，複数のルールとして記述される際に効率的に提携構造を求めるアルゴリズムを提案する．

７章では結論と今後の課題について述べる．

論 文 調 査 の 要 旨

ゲーム理論とは，異なる目的を持つ複数の参加者（プレイヤ）が，それぞれの目的達成に向けて行動する状況での，プレイヤの振る舞いに関する研究分野である．近年，インターネット上での電子商取引等のゲーム理論と情報科学との境界領域の応用分野が拡大している．協力ゲーム理論は，プレイヤ間で交渉が行われ交渉の結果到達した合意に拘束力がある状況を対象とする．協力ゲーム理論の主要な分野として，望ましい協力関係（提携）を求める提携構造形成問題に関する研究と，提携内で得られた利益の分配方法を与える提携形ゲームの解概念に関する研究が存在する．

従来の協力ゲーム理論は，参加するプレイヤが固定的で少数である状況を対象としており，インターネットのような不特定多数が集まる環境に適用する場合に以下の問題点が生じる．(a) 提携形ゲームに関して，不特定多数のプレイヤが存在するため，一人のプレイヤが複数のプレイヤになりすます架空名義，複数のプレイヤが一人のプレイヤとして行動する談合等の不正行為が生じる可能性がある．(b) 提携構造形成問題に関して，多数のプレイヤが存在する場合，既存の求解アルゴリズムでは現実的な時間内で最適解を得ることが不可能である．

本研究はこれらの問題点に対する解決策を示したものであり，以下の点で評価できる．

第一に，著者は架空名義，談合等の不正行為をモデル化し，既存の解概念がこれらの不正行為の影響を受けることを示した．さらに，提携の安定性に着目した解概念であるコアを拡張し，上記の不正行為に対して頑健な新しい解概念である匿名操作不可能コアを提案した．匿名操作不可能コアは提携の安定性と不正行為への頑健性等の条件を満たす唯一の解概念となっている．

第二に，著者はプレイヤ間の公平性に着目した解概念であるシャプレイ値を拡張した，匿名操作不可能シャプレイ値を提案した．匿名操作不可能シャプレイ値は，プレイヤ間の公平性と不正行為への頑健性等の条件を満たす唯一の解概念となっている．また，匿名操作不可能シャプレイ値は任意のゲームに対して一意に決定され，匿名操作不可能コアと比較して大幅に少ない計算量で求解可能であるという特徴を持つ．

第三に，著者は提携構造形成問題に関して，提携の利得を表す関数（特性関数）を複数のルールとして簡潔に記述することにより効率的に最適な提携構造を求めるアルゴリズムを提案した．既存の手法ではプレイヤ数が 30 程度の問題を解くために数時間を要していたが，本手法によりプレイヤ数が 120 の問題でも 20 秒程度で最適解が得られることを示した．

以上要するに，本論文はインターネットのような不特定多数のプレイヤが集まる環境に，従来の協力ゲーム理論を適用する場合に生じる問題点，具体的には，既存の提携形ゲームの解概念が不正行為に脆弱である点，およびプレイヤが多数となった場合に，既存の提携構造形成アルゴリズムの実行時間が膨大となる点を，数理的手法により解決したものであり，知能システム学上寄与するところが大きい．よって，本論文は博士（工学）の学位論文に値すると認める．

氏　　名	Moe Thu Thu
学 位 記 番 号	シ情　博甲第 398 号（工学）
学位授与の日付	平成 22 年 3 月 25 日
学位論文題名	A Study on Refinement of Krylov Subspace Methods Based on Lanczos Process (ランチョス過程に基づくクリロフ部分空間法の改良に関する研究)

論文調査委員

（主　査）	九州大学	教　授	藤　野　清　次
（副　査）	〃	〃	櫻　井　幸　一
〃	〃	准教授	高　橋　規　一
〃	〃	〃	渡　部　善　隆

論 文 内 容 の 要 旨

Krylov subspace methods based on Lanczos process are often used for solving linear systems of equations with large sparse matrices which arise from realistic problems. Conjugate Gradient (CG) and BiCG methods are based on Lanczos and dual Lanczos processes, respectively. Furthermore, CGS and GPBiCG methods are typical variants of BiCG method. It is crucial that iterative methods have safety convergence and high convergence rate. For BiCG and CGS methods, initial shadow residual can be determined arbitrarily, and safety convergence and convergence rate of these methods are affected by determination of initial shadow residual. On the other hand, for GPBiCG method, two acceleration parameters ζ_n and η_n minimize residual 2-norm for safety convergence. However, the popularity of GPBiCG method has diminished over time except for context of

limited field of analysis because of instability of convergence.

Therefore, our research devised three main refinements to remove the instability of Krylov subspace methods and verified the effectiveness through numerical experiments.

In the first refinement, we considered on determination of initial shadow residual r_0^*. Hence, we devised new determination of initial shadow residual r_0^* by using transpose of coefficient matrix. In numerical experiments, we used BiCG and CGS methods for verifying the effect of our new determination of initial shadow residual r_0^*. BiCG and CGS methods with our refinements could converge smoothly and reduced their computation time.

In the second refinement, we put an issue on the determination of two acceleration parameters ζ_n and η_n from minimization of residual 2-norm in GPBiCG method. Then, we proposed GPBiCG based on associate residual (GPBiCG_AR) method. In this method, two acceleration parameters ζ_n and η_n are determined from minimization of associate residual 2-norm. As a result, GPBiCG_AR method has safety convergence compared with original GPBiCG method. Moreover, GPBiCG_AR method converges with less computation time compared with GPBiCG method.

In the third refinement, we considered on 2-term and 3-term of recurrences. We proposed Intelligent variant of GPBiCG_AR (In_AR) method, and verified the convergence properties. For In_AR method, computational cost was reduced by switching 2-term and 3-term of recurrences. From numerical results, we could verify that In_AR method can converge with minimum iteration numbers and minimum computation time compared with those of GPBiCG and GPBiCG_AR methods. Finally, we could conclude that our refinements for Krylov Subspace methods based on Lanczos process is estimated to be successful.

論 文 調 査 の 要 旨

大規模線形計算の高速化や高精度化などの課題は、自然科学計算や産業界の工業技術計算などの数値シミュレーションにおいて、重要かつ緊急を要する大きな課題の１つである。前者において、数値自然現象を解き明かすための強力なツールの確立、後者では、製品開発期間の短縮や高信頼性の確立、など課題解決への要求が極めて強い。

数値シミュレーション分野でよく使われる線形計算の数値解法に、Krylov Subspace（クリロフ部分空間）法と呼ばれる解法がある。例えば、対称正定値な係数行列の場合には、共役勾配(Conjugate Gradient）法を用いるのが通例である。 一方、非対称な係数行列の場合には、数多くの Krylov 部分空間法の中から最適な反復法をどのように選択するかが重要である。さらに、その反復法の収束性向上をどのように図るのかも次に重要である。本研究では、数多くの Krylov 部分空間法の中から、代表的な２種類の反復法を研究対象とした。まず、主として Lanczos プロセスの収束性に依存した反復法を取りあげた。この反復法のグループに属するものとして、BiCG(Bi-Conjugate Gradient)法と CGS(Conjugate Gradient Squared)法がある。次に、残差の最小化により収束を加速する反復法を取り上げた。この反復法のグループに属するものとして、安定化 BiCGStab 法や一般化積型(Generalized Product-type)BiCG 法がある。

本研究では、これら２種類の反復法のグループに対して、以下に述べるような視点からその収束性について考察し、反復法の収束性向上とその収束安定化を図った。
本研究の成果は次のようにまとめられる。

第１の成果として、BiCG 法や CGS 法において、それらの収束性に重要な働きをする初期シャドウ(Shadow)残差の新しい与え方を提案し、その有効性を示した点が挙げられる。すなわち、従来のように初期残差あるいは一様乱数を単に与えるのではなく、それらに係数行列の転置行列を掛けたものを与える、という新しい着想である。さらに、それらの転置行列のべき乗を与えるという着想まで発展をさせた。多くの数値実験と考察の結果、これらの着想は Lanczos プロセスに基づく反復法のグループの収束性向上に非常に有効であることがわかった。従来のアプローチとは異なる方法で収束性向上が実現できる方法を見出しその有用性を実証した点で十分意義深いことであると評価できる。

第２の成果として、残差の最小化により収束を加速する反復法のグループに対する准残差
(Associate Reidual)の発見が挙げられる。通常のように残差ノルムの最小化から加速パラメータを決定するのではなく、算法中には陽に現れない残差、すなわち准残差の存在を見出し、その最小化から加速パラメータを決定し、収束を加速させかつ収束安定性を増した新しい反復法：GPBiCG_AR 法を考案し、数値実験にてその有効性を実証した。准残差の利用により、新しい反復法が構築できるようになったという点で大きく評価できる。

最後に、第３の成果として、GPBiCG_AR 法の収束性をさらに向上させた点が挙げられる。解決のための着想は、Lanczos プロセスを構成する漸化式の項数の最適化から生まれた。すなわち、反復過程において漸化式の項数を適宜変化させることによって計算コストが削減できないかという着想である。また、項数の切り替えを合理的かつより少ない計算コストで行うための判断指標として、残差ベクトルの空間的配置の情報などを採用した。これらの工夫により、収束性の保持ができかつ計算コストの削減を実現する反復法：インテリジェント版 GPBiCG_AR 法を考案し、数値実験にてその有効性を実証した。

以上要するに、本論文は、Lanczos プロセスに基づく Krylov 部分空間法に対して、その収束性を向上させる初期シャドウ残差の与え方の提案、次に准残差を用いる新しい反復法の提案、さらにその計算コストの削減を実現したインテリジェント版の反復法の考案を行い、それらの有効性を実証した点において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と認める。

氏　　名　髙 田 大 河
学位記番号　シ情　博甲第 399 号（工学）
学位授与の日付　平成 22 年 3 月 25 日
学位論文題名　Robust Algorithms for LUT-based FPGA Technology Mapping Applicable to Large-scale Designs
(大規模設計に適用可能な LUT 型 FPGA 向けテクノロジ・マッピングのアルゴリズム)

論文調査委員
（主　査）　九州大学　准教授　松 永 裕 介
（副　査）　〃　教 授　安 浦 寛 人
〃　〃　〃　村 上 和 彰
〃　〃　准教授　井 上 弘 士

論 文 内 容 の 要 旨

Field programmable gate arrays (FPGAs) are reconfigurable devices whose functions can be changed after fabrication. Common lithography masks for FPGAs could be used for multiple designs, while application specific integrated circuits (ASICs) require specific lithography masks for individual design. They can be lower cost implementation than ASICs for designs with small production volume, because a cost of making lithography masks is often expensive and the cost is distributed to products. On the other hand, they are available to use immediately after being reconfigured in a few minutes, while ASICs need fabrication for individual design, which might take several weeks. For these reasons, they could be adapted for designs of prototypes or products required to be developed faster.

LookUp-table(LUT) based FPGAs are popular architectures for recent FPGAs. They are reconfigurable with LUTs and programmable interconnections. An LUT is a programmable circuit which can implement any Boolean function with a certain number of inputs. Because LUT-based FPGAs require extra transistors for configuration, performance and power consumption of them tend to be inferior compared to those of ASICs. Given a register transfer level (RTL) design, computer-aided design (CAD) tools for LUT-based FPGAs determine every interconnections and functions of all the LUTs in a target FPGA, which significantly affect performance and power. Thus, CAD tools for LUT-based FPGAs are required to implement designs with good performance and power for a target FPGA. Furthermore, they are also required to implement large-scale designs in short run-time, because LUT-based FPGAs are often used for prototypes or products required to be developed faster.

Technology mapping for LUT-based FPGAs plays an important role in CAD flow for LUT-based FPGAs to generate high-quality circuits, which is a process to convert a Boolean network into a functionally equivalent network comprised of K-input LUTs (called LUT network). Existing delay-aware technology mappers firstly minimize depth (the longest path length). They secondly minimize area (the number of LUTs) or power. Because technology mapping problem to minimize area or power corresponds to NP-hard class problem, heuristics are likely to be necessary to generate a depth-minimum LUT network whose area or power is minimal. Recent technology mappers take a three-step approach. The first step is cut enumeration which enumerates many or all the cuts. The second step is depth-minimum DAG (directed acyclic graph) covering which generates a depth-minimum LUT network using the enumerated cuts. The third step is post-processing which recovers area or power with keeping the same depth. There are rooms for improvement in existing cut enumeration and post-processing, while polynomial algorithms for depth-minimum DAG covering have been proposed. This thesis presents two contributions for cut enumeration and post-processing applicable to large-scale designs.

The first contribution is having proposed two algorithms to enumerate cuts in short run-time. Recently, the maximum number K of inputs of LUTs for LUT-based FPGA has grown from 4 to 6. If K grows larger than 7, the run-time of cut enumeration might be significantly long. Existing state-of-the-art algorithms for cut enumeration are based on bottom-up merging that calculates Cartesian products of the fanins' cuts for each node. The number of cuts is much smaller than the size of the Cartesian products in most cases. Thus, the existing algorithms are inefficient to enumerate all the cuts. Furthermore, the number of cuts exponentially increases with K, which makes the run-time of the existing algorithms much longer. Several algorithms to enumerate not

all the cuts but partial cuts have been presented, but they cannot guarantee to generate depth-minimum LUT networks, and tend to disturb area or power. This thesis presents two algorithms to enumerate cuts; an exhaustive enumeration algorithm and a partial enumeration algorithm. Both of them are efficient, because they do not employ the bottom-up merging. The exhaustive enumeration algorithm is more efficient than the existing algorithms to enumerate all the cuts. The partial enumeration algorithm selects cuts with a guarantee that a depth-minimum LUT network can be constructed. The experimental results show that the exhaustive enumeration algorithm runs in practical time for K=8 or K=9, while a state-of-the-art algorithm to enumerate all the cuts fail to run in practicable run-time. If a little penalty of area is acceptable, the partial enumeration algorithm is valid to run faster than the exhaustive enumeration algorithm, while keeping the minimum depth of LUT network.

The second contribution is having proposed an efficient heuristic to reduce area or power of LUT networks under depth constraint. In depth-minimum DAG covering, recent methods generate an LUT network with considering cost flow of each cut, where cost flow is a heuristic metric to indicate how good a cut is for area or power. At post-processing step, area or power of an LUT network is recovered with keeping the same depth. Some methods recover area by iterating depth-minimum DAG covering with modifying cost flow of each cut using the structure of current LUT network. Because cost flow does not have direct relation with actual area or power, they might fail to find good LUT network. Other methods recover area by iterating local transformation of LUT network. They iteratively extract a subgraph in LUT network, and re-map it with fewer LUTs with manipulating Boolean functions. They tend to consume long run-time, because manipulating Boolean functions with large number of inputs is time-consuming. The post-processing presented in this thesis recovers area or power of LUT network in short run-time even for large-scale designs. The proposed post-processing generates a local optimum solution, by iteratively removing LUTs with considering actual area or power reduction. It runs fast because it uses only structures of subject graph and LUT network without manipulating Boolean functions. Experimental results show that the post-processing generates depth-minimum LUT networks with smaller area than a state-of-the-art depth-minimum and area-minimal mapper,, or depth-minimum LUT networks with smaller power than a depth-minimum and power-minimal mapper in short run-time, even for large-scale designs.

The proposed techniques are valid to generate good LUT networks in short run-time for large-scale designs for K adopted in current FPGAs. They generate good LUT networks in practical run-time even for larger K, while existing technology mappers might fail to generate LUT networks in practicable run-time for such K.

論 文 調 査 の 要 旨

LUT(LookUp-Table) 型 FPGA(Field Programmable Gate Arrays) は定められた入力数以下の任意の論理関数を実現できる LUT 回路とプログラマブルな配線からなる再構成可能なデバイスである．近年，集積回路の大規模化，複雑化にともなって半導体チップのコストに対する設計コストの割合は増大しており，設計および検証に要する期間も増大している．FPGA はチップの製造後にその機能をプログラマブルに変更可能なことからこのような設計コストおよび設計時間の増大を抑える有効な機能デバイスとなっている．本論文では，与えられた機能仕様を満足する FPGA 向け論理回路を自動合成する手法について取り上げている．特定の実装方法に依存しない論理回路（論理ゲートのネットワーク）を入力として、論理的に等価な LUT のネットワークを出力する処理を FPGA のテクノロジマッピングと呼ぶ．著者は特に大規模化する設計に適した効率の良い FPGA 向けテクノロジマッピングアルゴリズムの開発を行っている．

単純化した FPGA 向けテクノロジマッピングの問題でも NP 困難であることが知られており，実用的なプログラムでヒューリスティックを用いた近似アルゴリズムが用いられている．多くのテクノロジマッパーは以下の 3 つの処理を逐次的に行う．最初の処理はカット列挙と呼ばれる処理で，1 つの LUT で実現可能な部分回路(カットと呼ぶ)を列挙する．次が DAG(Directed Acyclic Graph)カバリングと呼ばれる処理で列挙されたカットの部分集合で与えられた回路全体の被覆を求める．実用上の観点から DAG カバリングに対しては近似解法が用いられるので，結果の回路に改善の余地が残されている場合がある．そのため，最後の後処理で解の逐次的な改善を試みる．本論文ではこのうちのカット列挙と後処理に対して既存手法よりも効率的かつ効果的なアルゴリズムの開発を行った．

一般にカット列挙の手間は列挙されるカット数に依存する．さらにカット数は LUT の入力数の指数乗に比例するので LUT の入力数が現行の 6 入力を越え，8 入力，9 入力となった場合には既存アルゴリズムでは多大な実行時間を要すると予想される．著者は，すべてのカットを列挙するアルゴリズムと，最終的な解の質に影響を与えうる良いカットのみを限定して列挙するアルゴリズムの 2 種類を提案した．前者は既存手法に比べて 8 入力で 3 倍，9 入力で 8 倍高速に処理を行っている．後者はさらに提案する全

列挙アルゴリズムに対して 8 入力で 2 倍，9 入力で 3 倍高速に処理を行っている．後者のアルゴリズムは一部のカットを除外するので生成される解の質が悪くなる可能性があるが，生成される LUT ネットワークの最大段数に関しては全列挙した場合と同じ最適な段数が得られる保証がある．実験では LUT 数の増加もわずか 4%であり，非常に高い実用性を持つと言える．

後処理に関しては，従来手法として，実際のコストではなく見積り値を用いた反復改善法と，実際のコストを考慮した論理関数処理を用いた手法が提案されているが，前者は見積り値を用いているため改善の効果が弱く，後者は強力であるが論理関数処理を用いているため多大な計算時間を要するという問題点がある．著者の提案した手法はカットの置き換え(Cut Resubstitution)と呼ばれる操作を用いた手法で，論理関数処理を用いずに効果的な局所改善を行っている．実験により，既存のテクノロジマッパーと比較して，10%程度面積が小さい回路を生成することを確認した．また，消費電力を目的関数にした場合でも同等の効果をあげている．実行時間は既存手法とほぼ同等かそれよりやや短く，実用上の高い効果が確認された．

以上を要約すると，本論文は，カット列挙および逐次改善処理における効率的かつ効果的なアルゴリズムを提案したもので，大規模回路を扱う FPGA 向けテクノロジマッパーの実現に大きな貢献をしており，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　花　田　達　之
学 位 記 番 号　シ情　博甲第 400 号（工学）
学位授与の日付　平成 22 年 3 月 25 日
学 位 論 文 題 名　大気乱流が衛星通信のビット誤り率に及ぼす影響に関する研究
論文調査委員
（主　査）　九州大学　准教授　藤　崎　清　孝
（副　査）　〃　教　授　香　田　徹
〃　〃　准教授　古　川　浩

論 文 内 容 の 要 旨

衛星通信において，搬送波周波数が高周波領域に推移すると，大気乱流による対流圏シンチレーションの影響が無視できなくなり，受信波の減衰や変動による通信品質の劣化が引き起こされる．通信需要の増加に伴い，衛星通信システムの高周波化は必須であり，この問題は避けられない．通信衛星は，自身の重量及び大きさの制約により送信電力に限りがあるため，微弱電波による通信を確立する必要がある．よって，大気乱流が電波伝搬特性に及ぼす影響を正確に推定し，ビット誤り率の評価をはじめとした衛星設計に適切にこの影響を反映することが重要である．大気乱流がビット誤り率に及ぼす影響を評価するには，受信波の確率密度関数を導出する必要がある．特に Ka 帯等の高周波領域を用いた場合，大気乱流の及ぼす影響がより大きくなり，多重散乱の影響を考慮する必要があるため，この大気乱流中を伝搬する電磁波の解析にも，光領域の伝搬問題で主に取り扱われてきた不均質ランダム媒質中を伝搬する電磁波の多重散乱理論を用いた解析が必要となる．しかし，この多重散乱理論に基づく受信波の確率密度関数の一般解を導出するのは非常に難しいため，大気乱流により生じる受信ビーム波のスポットダンシングが平均受信強度に与える影響をもとに，衛星通信のビット誤り率に大気乱流が及ぼす影響を近似的に評価した限定的な解析しか行われていない．

本論文では，Ka 帯を用いた衛星通信の電波伝搬に対し，多重散乱理論に基づき導出された受信波のモーメントを用いて衛星通信のビット誤り率の定式化及び解析を行っている．特に，これまでに十分な解析が行われていない受信波のスポットダンシングと波形歪みの両方の影響を考慮した場合や，受信波の空間コヒーレンスの影響を考慮した場合のビット誤り率の解析手法を示し，大気乱流が Ka 帯衛星通信のビット誤り率に及ぼす影響を評価する際に推奨される解析手法を提案している．

本論文は，7 章から構成されている．第 1 章は序論であり，研究の背景，目的等について述べている．

第 2 章では，ビット誤り率の解析に用いる受信波の統計量として，多重散乱理論に基づき導出されたガウスビーム波の 2 次モーメントを与えている．さらに，媒質揺らぎの統計的性質を決める相関関数に特定の近似式を適用した場合に得られる受信強度の確率密度関数を与えている．

第 3 章では，本論文の解析で用いる大気乱流モデルとして，媒質揺らぎの相関関数にコルモゴロフ乱流理論に基づき導出されるコルモゴロフ型モデル，相関関数がガウス関数で与えられ数学的取扱いの容易なガウス型モデルの 2 つを与えている．

第 4 章では，受信波の空間コヒーレンスが十分保たれており受信アンテナにおける集光時に受信強度の打ち消し合いの無い場合を考える．ガウスビーム波の 2 次モーメントより得られる平均受信強度に基づくビット誤り率を定式化し，Ka 帯衛星通信に対する定量的な解析を行っている．その結果，アップリンク通信では，大気乱流により引き起こされる受信波のスポットダンシングと波形歪みの両方の影響によって平均受信強度が減少し，ビット誤り率が劣化することを明らかにしている．

第 5 章では，受信波の空間コヒーレンスの減少が無視できない場合を考える．ガウスビーム波の 2 次モーメントを用いて平均受信電力に基づくビット誤り率を定式化し，Ka 帯衛星通信に対する定量的な解析を行っている．その結果，ダウンリンク通信では，受信波の空間コヒーレンスの減少の影響を無視できなくなり，それに伴い平均受信電力が減少し，ビット誤り率が劣化することを明らかにしている．

第 6 章では，媒質揺らぎの相関関数を近似式で与えた場合に得られる受信強度の確率密度関数を用いて平均ビット誤り率の定式化を行い，ガウス型モデルを用いて定量的な解析を行っている．その結果，1 ビット当りの受信エネルギー対雑音電力密度比の増加に伴い，ビット誤り率の劣化は平均受信強度の減少だけでなく，高次モーメントによる受信強度変動の影響も無視できなくなることを明らかにしている．

第 7 章では，結論として，第 4～6 章で示したビット誤り率の解析手法を総括している．そして，Ka 帯衛星通信のビット誤り率の評価に対し信頼性の高い結果を与える解析手法として，大気乱流にコルモゴロフ型モデルを用いること，アップリンク通信に対しては第 4 章に示した平均受信強度に基づくビット誤り率を，ダウンリンク通信に対しては第 5 章に示した受信波の空間コヒーレンスを考慮した平均受信電力に基づくビット誤り率をそれぞれ評価法として用いることを提案している．

論 文 調 査 の 要 旨

高速通信を前提としたサービスの増加に伴い，衛星通信においても，高い周波数帯の利用が検討されている．周波数が高くなると，降雨の影響により信号が減衰しやすくなることはよく知られており，その対策について様々な検討がなされている．ところが，晴天時でも大気中を長距離伝搬すれば，大気乱流による対流圏シンチレーションの影響が無視できなくなり，受信波の減衰や変動によりビット誤りが増加し，通信品質の劣化を招く．高品質の衛星回線の実現には，大気乱流が受信波に及ぼす影響をより正確に推定し，衛星回線の設計に適切にこの影響を反映することが重要となる．

大気乱流がビット誤り率に及ぼす影響を理論的に評価するには，空間コヒーレンスの影響を考慮した受信電力の確率密度関数を導出する必要がある．このためには，多重散乱を考慮した不均質乱流媒質中の電磁波伝搬理論に基づいた解析が必要となるが，受信電力の確率密度関数の一般解の導出は困難である．これまで大気乱流の影響によりビームの到達点が揺らぐ現象（スポットダンシング）状態の平均受信強度から衛星通信のビット誤り率に及ぼす影響を評価した限定的な解析しか行われていない．本論文では，Ka 帯を用いた衛星通信の電磁波伝搬に対し，多重散乱理論に基づき導出された受信波の 2 次モーメントを用い，スポットダンシングに加え，受信波の空間波形歪み及び空間コヒーレンスの影響を考慮して衛星通信のビット誤り率の解析及び評価を行い，大気乱流が Ka 帯衛星通信のビット誤り率に及ぼす影響を評価する手法を提案している．

著者はまず，ビット誤り率の解析に用いる受信波の統計量を与えるために，多重散乱理論を用いてガウスビーム波の 2 次モーメントを求め，さらにガウスビーム波及び平面波に対して乱流の構造関数を近似することで受信強度の確率密度関数を一意に定められる場合があることを示した．また大気乱流モデルとして，媒質揺らぎの相関関数にコルモゴロフ乱流理論に基づいたコルモゴロフ型乱流モデルを用い，乱流のパワースペクトル密度に Von Kármán スペクトルを適用し，乱流媒質の構造関数を与えた．更に大気乱流の強さを表す大気屈折率構造定数に対して関連する成果を基に高度分布プロファイルを与えた．また計算の簡便さからしばしば用いられるガウス関数を用いた相関関数（ガウス型乱流モデル）を与え，コルモゴロフ型乱流モデルと比較し大気乱流モデルとしての有効性を示した．これらの結果は，大気乱流中を伝搬する電磁波の統計的性質を与えるもので有用である．

著者は次に，受信波の空間コヒーレンスに対して 2 つの状態を想定し，Ka 帯衛星通信に大気乱流が及ぼす影響を考察した．まず空間コヒーレンスが受信アンテナ上で十分に保たれている状況において平均受信強度を基にビット誤り率を評価した．その結果，地球局から衛星に向けた通信（アップリンク通信）では，(1)受信波のスポットダンシングと空間波形歪みの影響によって平均受信強度が減少し，ビット誤り率が増大する，(2) 地球局側のアンテナが大口径になるほど，大気の影響が無視できない，(3) 大気乱流の相関長が短くなるほど，スポットダンシングだけでなく空間波形歪みの影響も考慮する必要があることを示した．一方，衛星から地球局に向けた通信（ダウンリンク通信）では，大気乱流の影響が無視できることを示した．次に空間コヒーレンスの減少が無視できない状況においてビット誤り率を評価して，ダウンリンク通信では受信波の空間コヒーレンスが小さくなり，平均受信電力が減少し，ビット誤り率が増大すること，アップリンク通信では空間コヒーレンスが十分保たれていることを示した．更に構造関数の近似により受信強度の確率密度関数が得られる場合について，平均ビット誤り率を解析し，乱流の影響が強くなるにつれて，高次モーメントの受信強度への影響が無視できなくなることを示した．これらの結果は，大気乱流の揺らぎによってスポットダンシング及び空間波形歪みが生じている状況下で，受信面上のビーム波の振る舞いを評価したもので，価値ある結果である．

最後に著者は，Ka 帯衛星通信のビット誤り率を評価する解析手法として，大気乱流にコルモゴロフ型モデルを用い，アップリンク通信に対しては平均受信強度に基づくビッ

ト誤り率の評価を，ダウンリンク通信に対しては受信波の空間コヒーレンスを考慮したビット誤り率の評価をそれぞれ用いることを提案した．

以上要するに，本論文は，大気の揺らぎによって引き起こされる受信電力の変動が Ka 帯衛星通信の回線品質に及ぼす影響を理論的に評価する問題に対して，不均質乱流媒質中の電磁波伝搬理論に基づきビーム波のスポットダンシングと空間波形歪みの影響及び空間コヒーレンスの影響を解析して平均受信強度及び平均受信電力の減衰をビット誤り率の評価に反映させて大気乱流の揺らぎの影響を明らかにし，数々の重要な知見を与えたもので，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　　福　重　貴　浩
学位記番号　　シ情　博甲第 401 号（工学）
学位授与の日付　　平成 22 年 3 月 25 日
学位論文題名　　複雑形状を有するモビリティ周り流体解析の高速化と収束の改善
論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　藤　野　清　次
（副　査）　〃　〃　古　川　雅　人
〃　〃　准教授　藤　崎　清　孝
〃　〃　〃　南　里　豪　志

論文内容の要旨

モビリティ周りの流体現象予測は，モビリティの効率向上や性能向上の観点から非常に重要である．開発コストの低減や開発期間の短縮のために，数値流体力学を用いたコンピュータによる性能予測が必須となる．複雑形状を有するモビリティの場合，形状の再現および，解析精度向上のために膨大な計算格子数が必要となる．さらに，計算格子の増加に伴い数値流体力学を用いた解析の計算時間は大幅に増加する．また，計算格子生成も自動化されていないため膨大な工数を必要とする．既に，複雑形状周りの数値流体力学の手法は，主に二つの技術により確立した．一つは，直交格子積上げ法による格子の自動生成技術であり，他方は，境界埋込法による高精度計算技術である．本研究の目的は，それらの手法に対する高速化手法および，収束改善手法を開発し，その効果を実証することである．本研究において，数値流体力学の計算時間短縮のために，二種類の手法を開発した．一つは，圧力方程式高速化法であり，他方は，大規模化時の収束改善法である．両手法を，低速用（非圧縮性）数値流体力学，高速用（圧縮性）数値流体力学に各々適用し有効性を実証した．

低速用（非圧縮性）　数値流体力学の高速化においては，計算コストの高い圧力方程式部分に着目した．圧力方程式は，Navier-Stokes の運動方程式および，連続の式の離散化と連成から得られる連立一次方程式である．圧力方程式を高速に解くために，解法のロバスト性に着目し最新の反復法のアルゴリズムを用い数値実験を実施した．その結果，すべての数値実験に対して，残差履歴が単調減少を示す Minimized Residual method based on Three-term Recurrence formula of CG -type（以下，MRTR と略す）法を圧力方程式の解法として選択した．さらに，MRTR 法を加速するために，行列の対称性を利用した前処理を施した．その結果，数値流体力学の計算に使用される実行列に対して，反復回数および，計算時間共に 1/3 程度の回数，時間の短縮が各々得られた．前処理付き MRTR 法を実装した数値流体力学プログラムをキャビティフロー問題に適用し，妥当な計算結果を得ることができた．

高速用（非圧縮性）数値流体力学の収束改善においては，大規模系の計算における収束性の悪化に着目した．従来，時間刻み制限の緩和に使用される残差スムージングを，数値流体力学プログラムへ適用した．残差スムージングを実装した数値流体力学プログラムを使用して，均一計算格子に対する収束の改善の効果を示した．また，実解析に用いる不均一の計算格子を用いて数値実験を実施し，手法の有効性を確認した．さらに，収束改善のために，残差スムージングの変数を動的に変化させる手法を考案し，収束改善の効果を示した．収束改善の原因を明らかにするために，二次元解析に対する数値実験を実施し，原因を考察した．また，残差スムージングを施した数値流体計算プログラムの解の妥当性を評価するために，球周りの計算を実施し解の妥当性を確認した．最終的に，複雑形状を有する高速モビリティとして Formula One レースカー周りの流れに適用し，大幅な収束改善を実現し，数値流体力学を用いた空力性能の評価が可能になった．本研究の成果により，複雑形状を有するモビリティ周りの流れに対する数値流体解析技術を確立した．

論文調査の要旨

モビリティ（高速移動体）周りの流体現象予測は、モビリティの性能向上や最適設計、開発コストの低減、開発期間の短縮などの観点から、非常に重要な課題の１つとなっている。そのため、数値流体力学(Computational Fluid Dynamics、以下ＣＦＤと略す)を用いた性能予測技術に対する要求が強い。さらに、複雑形状を有するモビリティの場合、解析対象物の形状モデルの再現や計算精度向上のために、有限体積法や有限差分法などで使用される計算格子数が膨大になる。さらに、計算格子数の増加に伴い、計算時間も大幅に増加する。そのため、計算の高速化は、ＣＦＤにとって常に大きな課題である。

本研究では、このようなＣＦＤの計算時間の短縮という

課題に対して、２種類の高速化法の研究開発を行った。第１の高速化は、解析全体に対する割合が非常に大きい圧力方程式の求解に対する高速化技術である。第２の高速化は流体解析技術の高速化と計算の安定化である。この技術は大規模解析のとき特に有効になる。これらの２つの高速化技術を低速（非圧縮性流体）用ＣＦＤおよび高速（圧縮性流体）用ＣＦＤの場合に適用し、その有効性を検証した。本研究の成果は次のようにまとめられる。

第１の成果として、低速（非圧縮性流体）用ＣＦＤの高速化技術として、ＭＲＴＲ(Minimized Residual based on Three term Recurrences)法を確立したことが挙げられる。従来、低速用ＣＦＤの分野で現れる線形方程式に対する反復法として共役勾配(Conjugate Gradient)法が使われていた。しかし、低速用ＣＦＤの解析スキームでは、圧力方程式の解（圧力）の一意性が保証されておらず、ＣＧ法の適用には限界があった。そのため、長時間ステップまでの非定常流体解析の場合、計算が破綻することがあった。一方、ＭＲＴＲ法の採用により、計算時間の短縮と安定な計算が可能となった。実際、多くのモビリティの計算に適用し有効性を確認した。さらに、ＭＲＴＲ法の前処理についても工夫し、流れ解析特有の性質を取り込み、収束をさらに加速した。その結果、1000 万自由度を超える実際のモビリティ大規模求解問題がより高速にかつ安定に解けるようになった。

第２の成果として、高速（圧縮性流体）用ＣＦＤの高速化技術として、大規模問題のとき特に頻発した収束の悪化という現象に有効な残差スムージング(Implicit Residual Smoothing、以下ＩＲＳと略す)技法を考案し、その問題解決に成功した。通常、残差スムージング技法は隣接するセルの残差どうしの陰的平均をとることにより解析の時間ステップを長くとるために使用されるが、本研究では、従来の陰的平均から半陰的平均にスキームを変えて処理時間の短縮を図り、さらに動的パラメータを導入することで、大規模問題かつ複雑な解析モデルの形状に合わせて自動的にスムージングが行えるように改良を行った。その結果、時速 250km/h を超えるスピードで走行するＦ１(Formula One）レースカーの車体周りの流れ解析を安定にかつ高速に計算できるようになった。シミュレーションの結果から、流れの圧力損失を減らし流量を増やす役割を担う、車体下部に取り付けられるディフュザーの最適設計が可能になり、高速走行時の車体の安定化にＩＲＳ技法は大きな貢献をした。さらに、小型ジェット機の３次元翼周りの流れ解析にもこの残差スムージング技法を適用し、その有効性を検証した。また、様々な高速モビリティに対するシミュレーション結果と実験結果との定量的一致も良好であった。

以上要するに、本論文では、低速用ＣＦＤの高速化技術として、改良された前処理つきのＭＲＴＲ法を見出し、時間短縮と計算の安定化に成功した。さらに、高速用ＣＦＤとして、複雑な解析モデルの形状に合わせて残差のスムージングができるＩＲＳ技法を提案した。そして、F1(Formula One)レースカーの車体周りの高速走行時の車体安定化に大きな貢献を果たし提案技法の有効性を実証し、これらの観点から情報工学上寄与するところが大きいと結論付けられる。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	山　田　　賢
学 位 記 番 号	シ情　博甲第 402 号（工学）
学位授与の日付	平成 22 年 3 月 25 日
学 位 論 文 題 名	マルチコアプロセッサにおいて時空間分割実行を支援するスケジューラに関する研究

論文調査委員

（主　査）	九州大学	准教授	日下部　　茂
（副　査）	〃	教　授	荒　木　啓二郎
〃	〃	〃	福　田　　晃

論 文 内 容 の 要 旨

本論文では汎用のマルチコアプロセッサを対象とし，マルチスレッドプログラムの性能向上を目的とする，汎用オペレーティングシステムのスケジューリング機構について述べる．

単一チップ上に複数の論理的もしくは物理的なプロセッサコア（以下コア）を持つマルチコアプロセッサが普及している．マルチコアプロセッサを用いることでスレッドレベルの並列処理を行うことが可能である．さらに各コアでキャッシュを共有する事が一般的である事から，従来の共有メモリ型マルチプロセッサに比べてコア間通信の高速化などの効果が期待出来る．一方で，コア間で共有するキャッシュの競合が発生した場合には，個々のプログラムのスループットが低下するという問題が知られている．この問題に対して，本研究ではスレッド間の参照の局所性を活用するカーネルレベルスレッドスケジューラによるプログラムのスループット向上を目指す．

本研究では，汎用マルチコアプロセッサ上でメモリアドレス空間を共有するスレッド(以下シブリングスレッド)の時分割，及び，空間分割実行を支援する，コア間時間集約スケジューラの提案と実装，及び評価を行なう．時分割実行とは異なるコア間でシブリングスレッドを同時に実行する方式である．我々はシブリングスレッドの参照するデータ領域は近接，もしくは共有していることが多いと考える．そのため，時分割実行を行なう事で，コア間で共有されたキャッシュに参照するデータを集約出来ると考える．

空間分割実行とは指定された 1 つ以上のコアでのみシブリングスレッドを実行することで，コア間でのメモリ整合性の維持に伴うコア間通信のオーバヘッドを削減する方式である．上記で述べた時分割実行は参照データをキャッシュ上に集約出来るものの，コア数の増加やメモリ階層の複雑化に伴い，キャッシュ間の整合性維持のためのコア間通信のオーバヘッドを増大させる可能性がある．コア間時間集約スケジューラでは，時分割実行を行なうコアのグループを複数任意に設定可能とする事で，過度なコア間通信の発生を防ぎ，空間分割実行と同等の効果が現れる事を期待する．本研究では以上の集約実行を支援するコア間時間集約スケジューラを Linux のスレッドスケジューラである Completely Fair Scheduler (以下 CFS)を用いて実装した．コア間時間集約スケジューラは CFS によって各スレッドに与えられた優先度を考慮しつつ，シブリングスレッドの集約を *O(1)*で行なう．

評価に際しては汎用のマルチコアプロセッサを用いて CFS との比較を行った．コア間時間集約スケジューラは CFS に各スレッドのメモリアドレス空間の情報のみを動的管理情報として付加する事で実装可能であり，付加オーバヘッドを抑制する事が出来る．多数のスレッドを生成するようなベンチマークプログラムを用いて CFS と比べたオーバヘッドを測定した結果，実際に付加されたオーバヘッドが小さいことを確認した．また，スレッド間の共有データサイズを指定出来るベンチマークプログラムを用いた実験の結果，コア間時間集約スケジューラの効果がスレッド間で共有するデータサイズとコア間で共有するキャッシュサイズに関連があり，共有データサイズが共有キャッシュサイズに近づくほど高い効果が得られることがわかった．さらに，汎用的な負荷をシミュレートしたベンチマークプログラムにおいてコア間時間集約スケジューラの効果の検証を行なった．具体的には，Java で実装されたベンチマークスイーツである DaCapo やデータベースの性能評価を行う SysBench ベンチマークの oltp プログラム，Web アプリケーションの実行性能を計測する RUBiS といったベンチマークなどを用いた実験を行い，様々な負荷を持つプログラムに対しスループット向上効果があることがわかった．

本研究ではコア間時間集約スケジューラをユーザが制御するための機構として，専用の API を併せて実装し，その有用性を示す．API によって変更出来るコア間時間集約スケジューラの機能としては，集約の是非，集約回数の制限値，優先度ボーナス値，集約グループの設定がある．集約の是非はシブリングスレッドの集約の是非をメモリアドレス空間ごとに指定する．単一コア上におけるスレッドの集約回数に制限値を設定することで，シブリングスレッドの過度の集約を抑制出来る．優先度ボーナス値はスレッドが前回消費した CPU 時間を基準に設定することが出来る．これによりユーザがスレッドの実行時情報の詳細を明示的に把握することなく，効果的な優先度ボーナス値の設定を行うことが出来る．集約グループの設定は，時分割実行を行なうコアのグループを設定し，その数を調節することである．コア数の増加に伴ってキャッシュの構造が複雑化した際には，キャッシュ間の整合性を維持するための通信に伴うオーバヘッドが高くなることが考えられる．集約グループの設定により，異なるキャッシュ間でメモリアドレス空間の異なるスレッドの集約実行を可能とすることで，通信のオーバヘッド削減と集約による効果の両立が期待できる．API を通して以上の機能を用いることで，さまざまな負荷やプラットフォームに併せて集約機能の調節が可能であることを示す．

論 文 調 査 の 要 旨

汎用プロセッサ上で高い実行性能を達成するには、キャッシュのようなメモリ階層の活用が重要であり、これまでのオペレーティングシステムのスケジューラの研究においてもメモリ階層の活用は重要な関心事の一つであった。近年、汎用プロセッサではマルチコア化が進み、汎用オペレーティングシステムでは、従来タスクの内部表現として代表的であったプロセスよりも軽量な、スレッドの利用が進んでいる。マルチコア化とソフトウェアのマルチスレッド化の進展に伴い、メモリ階層を活用してスループットを向上するためには、スケジューラは従来と異なる実行情報の取得と活用が必要となっている。本研究は、このような傾向を踏まえたスケジューラの提案と評価を行ったものであり、以下の点で評価できる。

第一に、低コストで収集可能な実行時情報に基づいてマルチスレッドアプリケーションのスループット向上を可能とするスケジューリング方式を提案し実装している点である。従来のマルチコア向けスケジューラは、対象がスレッドではなくプロセスである、実行に関するデータを事前に収集する必要がある、スレッド間の公平性や優先度を無視している、といった欠点があった。本研究で提案する方式は、実行データの事前収集を必要とせず、公平性を考慮した上で、マルチスレッドアプリケーションのスループット向上を可能とする。提案方式は、直前に実行したスレッドと同一のメモリアドレス空間を共有するスレッドを対象に、一定の優先度ボーナスを与えて集約実行と呼ぶ実行を試みる。集約実行では、メモリアドレス空間を共有するスレッドを、単一もしくは複数のコア上で、時間的に連続して実行する。提案方式は、既存の汎用オペレーティングシステムにも実装可能であり、本論文では、代表的な汎用オペレーティングシステムの一つ Linux に提案手法を実装し評価している。スケジューラ本体部分のみに関して通常のものと比較した結果、約 2%の時間増で情報の収集と反映が実現出来ている。これは実際のアプリケーション実

行時にはほとんど無視可能なオーバーヘッドと言える。複数のベンチマークでアプリケーション実行時の性能も評価しており、例えば Java のベンチマークの一つである DaCapo の lusearch では約 20%のスループット向上を確認している。

第二に、複数コアを対象とした場合の参照の局所性活用のトレードオフを考慮した上で、コアのグループを適切に設定することにより、スループットの向上を実現可能とする手法を提案して実装している点がある。複数コアにまたがって、同一メモリ空間を参照する複数のスレッドを集約して実行する場合、参照の局所性活用による性能向上の可能性があると同時に、コアごとに独立に持つキャッシュ間の、データ整合性維持に伴うオーバーヘッドが原因で性能が低下する可能性もある。適切なコアのグループを設定する効果を、Sysbench memory ベンチマークを用いて評価し、最大で約 20%の実行時間の短縮を確認している。

第三に、オペレーティングシステムの外部から、ユーザがスケジューラを制御するための機構を実現し、様々な負荷やプラットフォームに合わせた調整を容易にしている点である。ユーザが設定可能な値としては、集約実行の是非、集約実行回数の上限値、優先度ボーナス値、集約実行グループの設定がある。集約実行対象のスレッドに対して与える優先度ボーナス値について、対象のスレッドが前回消費した CPU 時間を基準に設定可能とすることで、直観的に設定出来るようになっており、内部表現に準拠した設定法を用いるより、性能向上に結び付く調整が容易なものとなっている。

以上、本論文は、汎用計算機のハードウェアとソフトウェアでのマルチスレッド処理活用の動向を反映し、現在および将来の汎用オペレーティングシステムにおいて有効な手法の提案を行った上で、提案手法を実装して複数のベンチマークによって有効性を示したものであり、情報工学上価値のある業績である。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　田　中　和　英
学 位 記 番 号　シ情　博甲第 403 号（工学）
学位授与の日付　平成 22 年 3 月 25 日
学 位 論 文 題 名　二ホウ化マグネシウム超伝導線材の基礎電磁特性・熱特性に関する研究
論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　船　木　和　夫
（副　査）　〃　〃　圓　福　敬　二
〃　〃　〃　古　君　　修

論 文 内 容 の 要 旨

MgB_2 超伝導体の発見から，はや 9 年が経過しようとしている．しかしながら，その本格的な応用に向けての開発研究はまだ緒についたばかりであり，ようやく長尺化及びコイル化技術に一応の見通しがついてきたという段階である．本格的な応用に供するためには，長尺化，高電流密度化，多芯化，低損失化等の他にも，耐電磁力化，超伝導接続技術等，克服すべき課題がなお多く残されている．さらに，低コスト化も避けて通れない課題である．このような背景のもと，本研究は，臨界温度が従来の金属系超伝導体と酸化物超伝導体の両者の中間に位置する MgB_2 超伝導体において，高電流密度化，低損失化等の線材特性の改善，及び熱特性，コイル保護等のマグネット技術の観点からの諸特性を従来の超伝導線材と比較検討しながら定量的に解明することを目的として行ったものであり，以下に要約する結論を得た．

第 1 章の序論に次いで、第 2 章では，工業的な観点から最も有望な線材化手法と考えられる Powder-In-Tube (PIT)/in-situ 法を用いて，Cu/Fe 複合シース MgB_2 単芯線材を作製し，線材基礎特性を評価した結果を述べている．臨界電流の加工度依存性を検討した結果，加工度を 99.7%以上にすることで，丸形状線材でも従来から高電流密度化が先行しているテープ形状線材と同等以上の線材性能が得られることを見出している．また，長尺均質化の観点から，粉末をボールミルで均質混合した線材作製法を提案し，この方法により作製した 58m 長及び 90m 長線材の両端末から切り出した短尺試料の臨界電流を測定した結果，そのばらつきはほとんどないことを明らかにしている．100m 級の MgB_2 線材を用いた長尺化・コイル化の実現可能性を実証した世界初の実績であり，その後の研究開発を加速させる成果であるといえる．

第 3 章では，MgB_2 線材の外部横磁場に対する低損失化の最初のステップとして，多芯化に適する断面構成法を検討している．Cu/Nb 複合シース MgB_2/6 芯線材及び Cu-Ni/Ta 複合シース MgB_2/6 芯線材を用いてコイル状試料を作製し，液体ヘリウム中において同軸ピックアップコイル法により，幅広い周波数領域で交流損失を測定した．その結果，Cu/Nb 複合シース線材については，中空円筒超伝導体モデルによる解析と測定結果との比較検討により，フィラメント同士が Nb バリアを介して超伝導的に結合していることを明らかにした．一方，Cu-Ni/Ta 複合シース線材については，その交流損失特性が，従来から用いられている多芯線モデルによりほぼ定量的に説明できること，つまり，互いに分離した超伝導フィラメント構造が実現していることを示した．これら一連の交流損失の解析により，線材の使用温度や経験磁場に即してバリア材料の選択が多芯線材化を進める上で重要であることを示している．

第 4 章では，MgB_2 コイルの熱的特性評価の一環として，局所的な熱的擾乱に対する線材レベルでの熱的応答を実

験と数値解析により評価している．Cu/Fe 複合シース MgB_2 単芯線材を用いて，3 ターンの疎巻コイルを作製し，常伝導部の伝播速度の測定を行った結果，実用線材である NbTi 線材と比べて伝播速度が 2 桁程度低いレベルになっていることを明らかにしている．また，実測結果と各種の冷却効果を考慮した解析モデルによる数値解析結果とを比較検討し、このような伝播現象を数値解析により予測するときには，過渡的な冷却効果を考慮したモデル化が必要であることを示している．さらに，短尺試料において実現している改善された通電特性が将来長尺にわたって実現できるとの前提で，このような次世代 MgB_2 線材について常伝導部の伝播速度を数値解析した結果，臨界電流特性の向上が実現できれば，MgB_2 線材においても従来の金属系超伝導線と同レベルの伝播速度が期待でき，これまでに開発されている金属系超伝導コイルのクエンチ保護対策が同様に採用できる可能性があることを明らかにしている．

第 5 章では，MgB_2 コイルの内部発熱に対する熱的特性評価として，MgB_2 多芯線材で作製した伝導冷却コイルについて，10～30K の範囲で設定した初期温度の下でコイルの臨界電流を超す過電流を通電し，コイルの熱的応答特性を測定した結果について議論している．また，コイル両端電圧，コイル巻線部の温度の変化を模擬する数値解析コードを開発し，巻線部で一様に発熱する条件の下でのコイルの熱的応答を解析している．その結果，両端電圧，巻線部の温度分布に関して，設定した初期温度の範囲内で，解析結果は実験結果と概ね一致し，また熱暴走電流や許容発熱量の初期設定温度依存性についても解析により，よく再現できることを明らかにしている．その結果，伝導冷却の MgB_2 コイルの自己発熱に対する熱暴走特性について，定量的な熱設計と保護対策が可能であることを明らかにしている。

最後に第 6 章において、以上の MgB_2 線材レベルからコイルレベルまでの系統的考察により，MgB_2 線材及びコイルの基礎電磁特性・熱特性に対しての設計指針の基盤を確立したこと，その実用可能性を示す多くの知見を得たことについてまとめている。

論 文 調 査 の 要 旨

2001 年に日本で発見された二ホウ化マグネシウム（MgB_2）超伝導体は、金属系超伝導線材として、最高の臨界温度（T_c）39K を有する．この T_c のレベルは、従来のニオブ・チタン（NbTi）などの金属系超伝導体（高々20K 程度）とイットリウム系などの酸化物超伝導体（90K-110K）の両者の中間に位置する．このため、MgB_2 線材を用いたコイル応用において、コイル特性の設計やクエンチ時のコイル保護の観点からは、両者のどちらに近い特性を示すのか、あるいはこれらの超伝導材料とは異なった特徴をもつのかを把握する必要がある．しかしながら、その本格的な応用に向けての線材開発研究はまだ緒についたばかりであり、長尺線材や小型コイルの製作に一応の見通しがついてきたという段階である．本格的な応用に供するためには、長尺化、高電流密度化、多芯化、低損失化等の線材レベルの特性改善に加えて、耐電磁力化、超伝導接続技術、クエンチ時のコイル保護法等、システム構成の面からも克服すべき課題がなお多く残されている．さらに、低コスト化も避けて通れない課題である．このような背景のもとで、本論文は、高電流密度化、低損失化等の線材特性の改善や熱特性やコイル保護等の超伝導コイル設計技術の観点からの諸特性を従来の超伝導線材と比較検討しながら定量的に解明することを目的として行った一連の研究をまとめたものであり、以下に示すように、将来の本格的なコイル応用に向けた要素技術とシステム化技術を確立するための新しい基盤を与えている。

第一に、工業的な観点から最も有望な線材化手法と考えられる *in-situ* パウダー・イン・チューブ法を採用し、加工度を 99.7%以上にすることにより、高電流密度化が先行しているテープ形状線材と同等以上の線材性能をもつ Cu/Fe 複合シース MgB_2 単芯線材を開発した。原材料粉末の混合法やシース材の組合せなどの線材化基盤技術を最適化して 100m 級の均質性の高い長尺線材を実現しており、MgB_2 を用いた長尺化・コイル化の実現可能性を実証した世界初の実績である。

第二に、MgB_2 線材の交流応用に道を開く低損失化の一環として、多芯化のための線材構成について系統的な特性評価を行っている。高電流密度化の観点から従来シース材として採用されているが交流用としては適さない Fe を避けて非磁性材料の Cu、 Cu 合金シースに切り替え、Cu と Mg との反応を抑えるバリア材として Ta、Nb を用いた 6 芯 MgB_2 多芯線モデル線材を試作した。これらの線材の交流横磁界中で交流損失を測定、比較・検討することにより、将来の低損失 MgB_2 多芯線材に対する基本的構成法を提案している。

第三に、MgB_2 コイルの保護システム構成の観点から、各種の冷却条件下で局所的な熱的擾乱に対する線材レベルでの熱的応答を実験と数値解析により評価した。まず、上記の Cu/Fe 複合シース MgB_2 単芯線材について、局所的な熱的擾乱による常電導部の伝播速度は冷媒や固体熱伝導による過渡的な冷却効果を取込んだ解析により定量的に評価できることを示した。また、将来 MgB_2 線材が現用の NbTi 線材に匹敵する電流容量を持つようになる場合については、数値解析により常電導部の伝播速度も NbTi 線材において観測される結果と同程度に高速になることを示し、コイルのクエンチ時にはこれまでの保護対策が同様に適用できることを明らかにしている。

第四に、伝導冷却 MgB_2 コイルの安定性マージンを定量化するために、試作した伝導冷却小コイルを用いて過電流通

電時の磁束フロー損失に対する安定限界と熱暴走時の熱的挙動について、実験と数値解析の両面から検討している。開発した解析コードによりコイルの内部発熱による熱暴走過程が超伝導線材の電磁特性、冷却条件を考慮することにより定量的に再現できることを明らかにしている。その結果に基づいて、超伝導巻線の内部発熱に即した冷却構造や内部発熱による熱暴走時の安全対策上の手法についての提案を行っている。

以上要するに、本論文は、多方面の応用分野でコイル巻線として期待される MgB_2 線材の基本性能として、電流容量増強と交流損失の低減のための線材構成の手法を確立すると共に、伝導冷却 MgB_2 コイルについて、実験・解析の両面から各種の熱的擾乱に対するコイルの熱的挙動、安定動作のための冷却構造、クエンチ時の安全対策など、コイル設計法を確立する上での基盤を与えたもので、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。

氏　　名	福　島　健太郎
学 位 記 番 号	シ情　博甲第 404 号（工学）
学位授与の日付	平成 22 年 3 月 25 日
学 位 論 文 題 名	パルスリンク方式による燃料電池用 DC-AC コンバー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	庄　山　正　仁
（副　査）	〃	〃	和　田　　清
〃	〃	〃	浅　野　種　正

論 文 内 容 の 要 旨

近年，地球温暖化の原因となる二酸化炭素の排出の問題は，世界的な問題となっている。国内における二酸化炭素を排出する部門を見てみると，エネルギーを変換する部門が約３割を占めており，エネルギーを変換する部門において，二酸化炭素の削減が求められている。クリーンなエネルギーシステムの一つとして，燃料電池が挙げられる。燃料電池は，水素と酸素を燃料とし，化学反応により電気を生成する。その為，従来の発電システムよりも燃料からの電気へのエネルギー変換効率が高い。更に，燃料電池は電気の生成反応において，大量の熱量も同時に発生する。この熱を回収し，熱エネルギー源として給湯などに利用することができる。その結果，総合エネルギー変換効率の大幅な改善が期待できる。この両エネルギー用いた，燃料電池コージェネレーションシステムを，家庭に適用することが注目されている。家庭用コージェネレーションによって，給湯を有効利用できるだけでなく，得られる電気に関しても従来よりも送電損失を低減させることができる。その為，将来の分散電源やマイクログリッドの発電源としても注目されている。

この家庭用燃料電池コージェネレーションシステムにおいて，燃料電池から得られた電力を，家庭の商用交流に変換する DC-AC コンバータが必要となる。この燃料電池用 DC-AC コンバータにおいて，小形化・低入力電流リプルなどが求められる。

本論文では，燃料電池用 DC-AC コンバータ回路において，パルスリンク方式を提案し，その動作特性の解析を行う。そして，入力電流リプルの低減手法を示し，実験によりその有用性を検証した。

本論文は，以下の５章で構成されている。

第１章は序論であり，クリーンエネルギーシステムが求められている背景として，近年の国内におけるエネルギー消費の動向及び家庭でのエネルギー消費についてまとめた。そして，クリーンエネルギーシステムの一つである燃料電池の特徴をまとめ，燃料電池を用いた家庭用コージェネレーションシステム，及び燃料電池について概説した。更に，家庭用燃料電池コージェネレーションシステムにおいて，必要とされる電力変換器，即ち燃料電池用 DC-AC コンバータについて，その仕様と研究意義を示す。

第２章では，燃料電池用 DC-AC コンバータにおける仕様をまとめ，燃料電池用パルスリンク方式 DC-AC コンバータを提案する。提案回路は，直流平滑が不要な為，小形化ができる利点がある。また，パルスリンク方式 DC-AC コンバータの動作解析を行っている。状態平均化法を用いて，静特性の解析を行っている。その結果，直流平滑することなく，直流－交流変換がなされることを確認している。実験において，その動作特性を検証し，パルス電圧波形で PWM インバータに供給していることを確認している。そして，実験結果より，90%以上の高効率で，直流－交流変換できる定常特性を確認している。

第３章では，燃料電池用途の電力変換器に求められる入力電流リプルの低減について，提案するパルスリンク方式において考察を行う。提案回路において挿入されている，直列 LC 回路を用いて電流リプルを低減させることを提案している。その低減法は，直列 LC 回路のインピーダンスに注目している。直列 LC 回路の共振周波数を商用交流の 2 倍のリプルの周波数に整合させることにより，直列 LC 回路にリプル成分を還流させることで，入力電流に重畳されないようにする手法である。実験により，回路パラメータを変化させて，その入力電流リプル特性を調べ，その低減手法の妥当性を確認している。更に，入力電流を検出して，スイッチの時比率の制御を施して入力電流の低減を図っている。低周波の入力電流リプルをなくすことを可能とした。

第４章では，提案するパルスリンク方式 DC-AC コンバータにおける入力電流リプルの低減手法として，動作モード（電流保持モード）による低減手法を提案している。１スイッチング周期においてインダクタに流れる電流の時間変化が零となる動作モード（電流保持モード）において，入力電流リプルが低減されていることが確認した。この電流保持モードにおいて拡張状態平均化法を用いて動作解析を行い，その動作特性を調べる。その結果，電流保持モードにおいて，入力電流に定常成分が存在することにより，入力電流リプルを低減できることを解析的に明らかにする。この時，電流リプル成分は，10%以下を達成できている。また，電流保持モードにおいて，直列 LC 回路パラメータは，小さな値で達成できることが確認している。その為，より小形化できることを示している。

第５章は，以上の研究を総括した結論である。

論 文 調 査 の 要 旨

今日の社会の進展によって，エネルギー消費がますます増加する傾向にあり，これに伴い，地球温暖化の原因となる二酸化炭素の排出の問題も増加している。現在，国内における二酸化炭素の全排出のうち，発電所などでのエネルギー変換時に生ずるものが約３割を占めており，二酸化炭素排出の少ないクリーンなエネルギー源が求められている。最近，そのクリーンエネルギー源の一つとして，燃料電池が注目されている。燃料電池は，水素と酸素を燃料とし，化学反応により電気エネルギーを生成するもので，従来の火力発電システムよりも燃料から電気へのエネルギー変換効率が高い。更に，燃料電池は電気エネルギーの生成反応において，大量の熱を同時に発生するため，この熱を回収し，熱エネルギー源として給湯などに利用することが可能であるため，総合エネルギー変換効率の大幅な改善が期待できる。この両エネルギー源を用いた発電システム，すなわち燃料電池コージェネレーションシステムを，家庭に適用することが，現在検討されている。この家庭用コージェネレーションを用いることで，現在の電力輸送方法における送電損失を低減させることもでき，省エネルギー，低二酸化炭素排出という特徴を生かした，分散電源やマイクログリッドなど将来の電気エネルギー源としても注目されている。

この家庭用燃料電池コージェネレーションシステムにおいては，燃料電池から得られた直流電力を，家庭で一般的に用いられている商用交流に変換する DC-AC コンバータが必要となる。この燃料電池用 DC-AC コンバータにおいて，小形化・高効率化を図るとともに，燃料電池の特性劣化を抑制するため，入力電流リプル率を 10%以下に低減することが求められる。

本論文において，著者は，燃料電池用 DC-AC コンバータの新しい回路方式として，パルスリンク方式を提案している。そして，提案回路において，入力電流リプル率の低減手法を考案し，その有効性を解析的・実験的に示している。本論文は，これらの成果をまとめたものであり，次の諸点で評価できる。

（１）　燃料電池用 DC-AC コンバータにおいて，従来方式の課題であった，平滑コンデンサの大容量化による装置の大形化を解決する方式として，パルスリンク方式を提案し，平滑回路を不要とすることで小形化を図っている。提案回路の動作解析を行い，定常特性をまとめ，高効率で DC-AC 変換を行えることを実験的に示している。

（２）　低周波の入力電流リプルの発生メカニズムを示し，提案回路における交流解析を行い，提案回路に挿入されている直列 LC 回路のパラメータにより，入力電流リプル率を低減させる手法を提案している。すなわち，直列 LC 回路の共振周波数をリプルの周波数に適合させるような回路パラメータを選定することにより，入力電流リプル率を 27%まで低減できることを実験で確かめている。更に，入力電流リプルを検出し，得られた信号をスイッチの時比率の制御に反映させることにより，入力電流リプル率を 10%まで低減している。

（３）　１スイッチング周期の中でインダクタ電流の時間変化が零になる電流保持モードにおいて，入力電流リプル率が更に低減されることを見出し，その低減メカニズムを解析的に示している。この解析結果より，電流保持モードを用いれば，前項の方式と比較して，コンデンサ容量が 10 分の 1 程度で済むことを示している。実験により，その有効性を確認し，電流保持モードにおいて，入力電流リプル率を最小で 5%まで低減できることを確認している。

以上要するに，本論文は，燃料電池用 DC-AC コンバータの新しい回路方式としてパルスリンク方式を提案し，小形化・高効率化への有効性を示したものである。さらに，燃料電池用 DC-AC コンバータの課題であった入力電流リプル率の低減を，提案回路の回路パラメータの調節，及び新しい動作モードでの動作により達成し，かつその低減メカニズム及び有効性を解析的・実験的に示している。この入力電流リプル率の低減化は，今後の直流電力を入力とした種々の電力変換器に求められる高性能化について先駆的に取組んだものであり，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ものと認める。

氏　　名　李　　振　強

学 位 記 番 号　シ情　博甲第 405 号（学術）
学位授与の日付　平成 22 年 3 月 25 日
学位論文題名　Data Domain Dependent Identification Method of Hammerstein Model
（ハマースタインモデルのデータ領域依存同定法）
論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　和　田　　清
（副　査）　〃　　〃　川　邊　武　俊
〃　　〃　　〃　庄　山　正　仁

論 文 内 容 の 要 旨

Most systems are nonlinear in practice. The identification of nonlinear systems has been an active research topic. Nonlinear dynamical system can be described with many forms. As a special case, Hammerstein model is the most widely applied nonlinear dynamic system, for example distillation columns, heat exchangers and continuous stirred-tank reactor (CSTR), etc. It assumes that a nonlinear system is divided into two parts: the static nonlinear part and the dynamic linear part. The Hammerstein model consists of a static memoryless nonlinear block followed by a linear dynamic block.

The main object of this study is to deals with the problem of identification of Hammerstein model. In this dissertation, we use three different types of data to estimate Hammerstein model. We can give the effective consistent estimates by using the data in time domain, in frequency domain and in wavelet domain, respectively.

This dissertation is composed of five chapters. Contents of each chapter are briefly described below.

Chapter 1 gives an introduction of system identification. System identification deals with the problem of building mathematical models of dynamical systems based on observed data from the system. Identification of linear time-invariant system has been a mature technique. It is an important task to identify the nonlinear systems. The structure of nonlinear system can be specified as a block-oriented model, such as Hammerstein model, Wiener model, etc. We can estimate the parameters of Hammerstein model using some methods.

Chapter 2 discusses the identification of Hammerstein nonlinear ARMAX model through the recursive least squares (RLS) method and the subspace identification method in time domain. The static memoryless nonlinear block of Hammerstein models is considered as the sum of some known functions, the linear part is described as an ARMAX model. By means of the QR and singular value decompositions, order of the system can be determined. We can identify the system by using the subspace identification method and the recursive least squares method. We compare the simulation results of the two methods. The subspace identification method is better.

In Chapter 3, we describe to estimate Hammerstein model using a subspace identification method in frequency domain. When the static memoryless nonlinear part of Hammerstein model can be considered as a polynomial with a known order, the linear part can be estimated as a multi-input single-output (MISO) system with the subspace identification method using the sampled input-output data in frequency domain. The coefficients of the nonlinear part can be estimated. The estimated linear part is a nonparametric model.

Chapter 4 proposes a subspace identification method to estimate Hammerstein model with wavelet multiresolution approximation. In this chapter, Hammerstein model structures and subspace identification method are introduced first. Then the wavelet transform and multiresolution analysis are described. The relationship between the filter banks and Daubechies wavelet is given. Therefore, when the static memoryless nonlinear parts of Hammerstein model can be considered as the sum of some known functions of input, we can use the orthogonal wavelet as the base function, and take the nonlinear function expanding to wavelet function with different levels. In other words, by the discrete wavelet transform, all signals are changed into the wavelet domain' signals, including input, output, and disturbance signals. The linear part is described as an ARMAX model. Using the numerical algorithm for subspace state space system identification method (N4SID), the system matrices can be estimated. All coefficients of the nonlinear part and linear part are obtained by a model transformation. The simulation results show that the wavelet multiresolution approximation method is effective.

Chapter 5 summarizes the results obtained in this study. In addition, some future research topics about this study are also mentioned.

論 文 調 査 の 要 旨

制御対象は非線形であるが，これまでは主として線形モデルで，ある動作範囲での動特性のモデル化を行ってきた。これは，非線形モデルを用いるとシステム同定の計算に多くの計算量と計算時間が必要とされるからである。

しかしながら，計算機の発展などでこれらの計算に関する問題が解消されるようになったことから，近年非線形モデルの同定に注目が集まるようになっている。特に，静的非線形部分と動的線形部分に分けた非線形モデルによる

システム同定の研究が盛んに行われるようになってきている。

２つの部分に分けた代表的な非線形モデルは，ウィーナーモデルとハマースタインモデルである。前者は，入力側に動的線形ブロックが出力側に静的非線形ブロックがあるモデルであり，後者はその順序が逆のモデルである。

本論文は，プロセス系や生体系のモデリングにハマースタインモデルが良く用いられることに着目して，静的非線形ブロックを多項式展開あるいは既知の関数による展開によって表し，システム同定のための入出力データとして，時間領域，周波数領域およびウェーブレット変換領域の３種の形式を用いたハマースタインモデルの同定法について研究したものであり，下記のような成果を得ている。

著者はまず，時間領域の入出力データを用いて，非線形ブロックの展開係数および動的線形モデルを推定する方法を検討し，ハマースタインモデルの同定を多入力一出力（Multi-Input Single-Output：MISO）線形モデルの同定に帰着させ，部分空間同定法によって状態空間モデルの係数行列を求める方法を提案している。また，この提案手法の有効性を数値シミュレーションにより確認している。

次に著者は，周波数領域の入出力データが直接計測される場合を考慮して，周波数領域のデータを用いるハマースタインモデルの同定手法を提案している。静的非線形ブロックの展開が多項式展開に限定される以外は，基本的には時間領域の手法と同じであるが，雑音の影響によって係数行列の推定値が複素数となるので，実数値の係数行列を得るためにベクトルフィッテイングなどの手法を使うことを提案している。

最後に著者は，さらなる静的非線形ブロックの推定精度向上を目指して，展開の基底関数をウェーブレット関数に選ぶことを提案している。具体的には，入出力データをウェーブレット変換し，この変換後のデータを用いて MISO 線形モデルを同定する手法を提案している。また，この同定手法による非線形ブロックの推定精度の向上を，数値シミュレーションによって確認している。

以上要するに，本論文は同じ同定対象の３種のデータ形式に対応するハマースタインモデルの同定法を提案し，その有効性を数値シミュレーションにて検証し，さらにそれぞれの同定法の特性を明らかにしユーザーに対して同定手法の選択の指針を与えたものであり，制御工学に寄与するところが大きい。よって，本論文は博士（学術）の学位論文に値するものと認める。

氏　　名　　李　　相　根
学 位 記 番 号　　シ情　博甲第 406 号（工学）
学位授与の日付　　平成 22 年 3 月 25 日
学 位 論 文 題 名　　電気伝導物理機構に基づく有機EL 素子アナログ動作モデリング
論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　服　部　励　治
（副　査）　〃　〃　吉　田　啓　二
〃　〃　〃　圓　福　敬　二

論 文 内 容 の 要 旨

有機 EL(Organic Electro-Luminescence)素子を用いたディスプレイは，低電圧駆動が可能であり，広視野角，高速応答，超薄，軽量という特徴を持っている．さらに，バックライトユニットが必要なく，発光型であるためコントラストが高いため次世代ディスプレイとしての高い潜在性を持っている．しかし，有機 EL 素子を用いてディスプレイを商用化するために素子寿命を 2～3 万時間以上もの時間が必要であり，発光効率を上げなければならない問題がある．このような有機 EL の素子性能を向上させるために発光効率が高い物質を開発して，有機 EL 素子の電気伝導特性，即ち有機 EL の電圧－電流式が重要である．しかし，残念なことに，有機 EL の電圧－電流式は，どの教科書や論文を見ても出てこない．

したがって，本論文では有機 EL ディスプレイにおける有機 EL 素子構造による電気伝導特性，即ち有機 EL 素子電圧－電流の 理論式を導出した，有機 EL 素子電圧－電流の理論式を導出するための方法として，二つの方法が考えられる．一般的な方法としては，実験結果と理論式の比較を行う手法がある．この手法においては，素子の膜厚，注入障壁，移動度のような素子パラメータを作成時にそれぞれ単独で変化させなければならない．しかし，一つのパラメータを個別に変化させることは難しいである．一方，デバイスシミュレータによっても電圧－電流特性が得られるが，この場合一つのパラメータを個別に変化させることは容易である．従って，本研究では実験結果ではなくデバイスシミュレータから計算された電圧－電流特性より理論式を導き出すことを試みた．これにより，デバイスシミュレータで使われているモデルのどのパラメータに依存し，またどのパラメータに依存しないかがわかるので，関係するパラメータを全て含んだ有機半導体，2 層有機 EL および 3 層有機 EL 理論式が導き出すことができる．そして，導出した理論式を用いて Verilog-A 言語によって有機 EL の回路シミュレーション(SPICE)モデルの構築を行った．Verilog-A とはロジック記述言語で有名な Verilog-HDL をアナログの世界まで拡張したものである．入出力とその関係を数式で表すことさえできればモデルを構築でき，新しいモデルを組み込むときには非常に便利な言語である．そして SPICE モデルとはアナログ回路シミュレーションを行う際に必要な素子の電気的動作を表すものであるが，そのモデルは電気的特性を正確に表していれば物理的に正

しくなくても回路設計上何ら支障はない．ただ，物理的に忠実なモデルほど温度やデバイス寸法などの広範囲でフィットすることができ，モデル自体もシンプルになるとされている．これが物理に基づくアナログ動作モデルである．最後に，デバイスシミュレーションと理論式から得られたSPICE モデルの電圧－電流特性を比較し，それらがうまく一致することを確かめた．

本論文は,本章を含む 6 章よりなる.以下に概要を記す.

第 2 章では有機 EL における電気伝導特性理論を述べ，有機 EL の電気伝導特性を考察するために有機層に適当と思われる有機半導体の電荷注入と電荷輸送モデルについて説明した．

第 3 章では有機半導体における正確な電圧－電流特性の理論式を説明するために，注入制限電流(J_{ILC})とバルク制限電流(J_{BLC})の両方の電流を考慮した有機半導体の電気伝導特性の理論式を導出した．そして，この理論から Verilog-A という回路モデル構築言語を用いて SPICE モデルを構築した．

第 4 章では，2 層有機 EL 素子における電圧－電流理論式の考察した．電子輸送層と正孔輸送層からなる有機 EL 素子の電圧－電流特性は，内部障壁の高さ，電子輸送層における正孔移動度，正孔輸送層における電子移動度を変化させても特性には影響を及ぼさない．また，理論式を電子注入と正孔注入が等しいという条件下で導き，その式から Verilog-A という回路モデル構築言語を用いて SPICE モデルを構築した．

第 5 章では，3 層有機 EL 素子における電圧－電流理論式の考察を行った．3 層有機 EL 素子における電圧－電流理論式を説明するために，閾値電圧からの電流の立ち上がりの急峻性を決める一つの要因が，素子の多層化であることをデバイスシミュレーションによって示した．3 層有機 EL 素子の電流特性が半導体／金属界面における正孔注入障壁ではなく内部正孔障壁によって律速される時，電流の立ち上がりは内部障壁が高く正孔輸送層の移動度が小さくなる程その急峻性が失われる．そして，電子注入と正孔注入が等しいという条件下で導き出された電圧－電流理論よって有機 EL SPICE モデルの構築した．

第 6 章では本論文での結論を述べる．

論 文 調 査 の 要 旨

有機 EL(Electroluminescence)素子を用いたディスプレイは，低電圧駆動が可能であり，広視野角，高速応答，超薄，軽量という特徴を持っている．さらに，バックライトユニットが必要でなく，発光型であるため，コントラストが高い次世代ディスプレイとして高い潜在性を持っている．しかし，有機 EL 素子を用いてディスプレイを商用化するためには素子寿命を 2～3 万時間以上にする必要であり，さらに発光効率も上げなければならないという問題がある．このような有機 EL 素子の性能を向上させ，高い発光効率の素子を開発するためには，有機 EL 素子の電気伝導特性，即ち有機 EL の電圧－電流式の解明が重要となってくる．しかし，残念なことに，有機 EL 素子の電圧－電流式は未だ正確に与えられておらず，その回路素子モデルも与えられていない．

したがって，本論文では数種の有機 EL 素子構造における電気伝導特性，即ち電圧－電流の理論式を導出した．その理論式を導出するための方法として，二つの方法が考えられる．一つは一般的な方法で，実験結果と理論式の比較を行う手法である．この手法においては，素子の膜厚，注入障壁，移動度のような素子パラメータを作成時にそれぞれ独立で変化させなければならないが，一つのパラメータを個別に変化させることは難しいことである．もう一つはデバイスシミュレータによって得られた電圧－電流特性を用いる方法である．この場合，一つのパラメータを個別に変化させることは極めて容易である．従って，本研究では実験結果ではなくデバイスシミュレータから計算された電圧－電流特性より回路モデルを導き出すことを試みている．その結果，以下の成果を得た．

1. 有機半導体および有機 EL 素子の物理的特性を考慮した電圧－電流特性の理論式を導出した.この導出された理論式では注入制限電流と空間電荷制限電流を同時に考慮している．また，両者が等しいと仮定することで，どの程度，障壁が低ければオーミック接合となるのかを示す値を導出することができた．この式は，注入制限電流と空間電荷制限電流間の臨界点を矛盾なく示した．
2. 導出された理論式により有機 EL 素子の物理が明確になり，有機半導体および有機 EL 素子の動作原理の中でどのような機構が支配的かが理解された．
3. 導出された理論式を用いて Verilog-A 言語によって有機 EL の回路モデルを構築した．即ち，電気伝導物理機構に基づく有機 EL 素子アナログ動作デルを構築した．このモデルは温度やデバイス寸法の広範囲でフィットすることができ，モデル自体もシンプルになる．最後に，デバイスシミュレーションと理論式から得られた回路モデルの電圧－電流特性を比較し，それらがうまく一致することを確かめた．

以上要するに，本論文は，電気伝導物理機構に基づく有機 EL 素子アナログ動作に関して，有機半導体の物理，および,デバイスシミュレーション技術などを使い，新しい有機 EL 素子回路モデルを構築し，有機半導体および有機 EL 素子の電気伝導に関する定量的な分析・評価を可能としたもので，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）の学位論文に値するものと認める．

氏　　名　沈　　昌　勲
学位記番号　シ情　博甲第 407 号（工学）
学位授与の日付　平成 22 年 3 月 25 日
学位論文題名　フレキシブル有機 EL ディスプレイの駆動方法に関する研究

論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　服　部　励　治
（副　査）　〃　　〃　吉　田　啓　二
〃　　〃　　〃　圓　福　敬　二

論 文 内 容 の 要 旨

フレキシブル ディスプレイと言えば曲げたり、畳んだり、巻いたり、着ることができる平板ディスプレイであり、使用用途としては電子新聞、電子書籍、携帯用情報機器、TV、広告看板など幅広く応用できる。フレキシブル ディスプレイは自発光型と反射型に分類できる。自発光型の場合は、暗い所でも見ることができ、ほとんどが十分に動画を表現することができるが、光を自ら生み出さなければならないため電力消費が大きい短所がある。 一方、反射型の場合は、周囲の光を利用するため電力消費がすくないことに加え、電源がなくても画像を維持できる双安定(Bistability)特性を利用することで、書き換えなければ電力消費をゼロとすることができる。また、種類によっては紙のように白く明るい反射特性を持ち、人の目に優しいという長所がある。しかし、双安定性を持つディスプレイで動画を表すのは容易ではなく、また、反射型でのフルカラー化は原理的にどうしても暗くなってしまうのが短所である。こういう多様な形態のディスプレイは各々長所と短所を持っていて、用途により選択しなければならない状況になっている。

フレキシブル ディスプレイの要素技術としては、基板、薄膜トランジスター、電極、ディスプレイメディアなど多様な技術がそれぞれ長短所を持っている。どんな技術がどのように組合せるのかは用途と技術の難易度、コストなどによってそれぞれ違う。しかし、究極的には自由な変形が可能で、低消費電力、高画質のカラー、自然な動画の実現ができるのが最も理想的なフレキシブル ディスプレイだと言える。現在の時点で、この様なディスプレイを実現できる最適の組合せは、プラスチック基板、高分子電極、有機 TFT、有機 EL の組合せと考えられる。まだ、解決しなければならない課題も多いが、最も多く研究されているテーマもこのシステムだと言える。

本論文はフレキシブル ディスプレイの核心である有機 EL ディスプレイと有機 TFT に関する内容であり、有機 EL ディスプレイで重要な問題である駆動回路に関する内容と、有機 TFT で議論されている構造に関する内容で、以下の 4 章から構成される。

第 1 章では、フレキシブルディスプレイの多様な要素技術の長短所と現在の研究状況を紹介し、それぞれの用途にともなう技術の組合せがどのような形態になるのか、究極的なディスプレイの形態はどのような姿になるのかを議論する。そして、このような様々ある技術の中で、有機 EL ディスプレイと有機 TFT についの研究が占める意義と目的について説明する。

第 2 章では、能動型有機 EL ディスプレイ（AMOLED）に使われている駆動方式に対して簡単に紹介する。有機 EL ディスプレイは電流を流して発光させる電流駆動ディスプレイである。したがって AMOLED の場合、各ピクセルに電流源を持っている。ところが、この電流源として使っているトランジスターの特性バラツキのため、ディスプレイの輝度／色の不均一が発生し、これらを改善のために補正回路が必要である。電流駆動ディスプレイの AMOLED で完ぺきに補正するためには電流信号を使う電流プログラム駆動法が最も適していると言えるが、電流信号は配線の寄生容量のため、信号の遅延が発生する。このような信号遅延の問題を根本的に改善するのが本章の研究目的である。本研究では負性容量という概念を最初に導入したが、これは、値は寄生容量と同一で、符号が反対の仮想の素子である。微分回路、反転増幅器、電圧電流変換器を使用して負性容量回路を構成した内容と、回路シミュレーション結果を説明する。この回路の安定性を分析した結果を説明し、PMOLED の実際のパネルに適用した結果を説明する。

第 3 章では、有機 TFT の構造が特性に及ぼす影響を 2 次元デバイス シミュレーションで研究した内容を紹介する。有機 TFT は材料、工程、構造の観点で多くの研究が行なわれて来たが、まだ不明確な部分がたくさん残っている。このような研究の中には各パラメータが混雑して正確な分析が難しい場合があり、定性的な傾向は把握しているが定量的な分析が不十分な場合もある。特に、有機 TFT の構造的な面を見ると、最適な構造がどれなのか、どれぐらい影響を及ぼしているのかが正確に分析されていない。したがって、本研究ではデバイス シミュレーションを利用して有機 TFT の構造と特性の解析をおこなった。スタガーとプラナー、2 つの構造の違いを定量的に分析し、有機物と金属電極の接触抵抗が特性に及ぼす影響を分析した。

第 4 章では、本研究で得られた知見を総括し、本研究の結論を述べる。

論 文 調 査 の 要 旨

フレキシブルディスプレイは、曲げたり、畳んだり、巻

いたり、着たりことができる平板ディスプレイであり、用途としては電子新聞、電子書籍、携帯用情報機器、TV、広告看板など幅広く応用がある。一方、フレキシブルディスプレイの要素技術としては、基板、薄膜トランジスター、電極、ディスプレイメディアなど多様な技術がそれぞれ長短所を持っている。どのような技術がどのように組合せるのかは、用途と技術の難易度、コストなどによってそれぞれ異なる。しかし、究極的には自由に変形が可能で、低い消費電力、高品位のフルカラー、自然な動画を実現できることが最も理想的なフレキシブルディスプレイと言える。現時点で、この様なディスプレイを実現できる最適の組合せは、プラスチック基板、高分子電極、有機 TFT、有機 EL である。まだ、解決しなければならない課題も多いが、最も多く研究されているテーマもこのシステムだと言える。

本研究はフレキシブル ディスプレイの核心である有機 EL ディスプレイと有機 TFT に関する内容であり、有機 EL ディスプレイで重要な問題である駆動回路と、有機 TFT の構造に関する内容について検討を行っている。その結果、以下の成果を得た。

1. 有機 EL ディスプレイには多様な駆動方式があるが、その中で、電流プログラム法は最も有望な方法の一つである。しかし、信号の遅延があるため、書き込み時間の短い高解像度パネルにはほとんど使用できなかった。　電流信号の遅延は配線に存在する寄生容量が原因である。本研究では、これを根本的に解決するために符号が寄生容量と反対で、値が寄生容量と同一である負性容量という仮想の素子を初めて導入した。
2. 負性容量は微分回路、反転増幅器、電圧 - 電流変換器の回路を使って構成でき、回路シミュレーションで検証した。ブレッドボードに単品素子を利用して、負性容量回路が入ったデータ ドライバー回路を構成して、パッシブマトリックス有機 EL パネルに適用した。その結果、低電流信号でもピクセルに信号の遅延がなく、鮮明な中間調が表現できた。大型パネルへの応用に備えて、負性容量回路の安定性を分析した。
3. 有機薄膜トランジスターは他の半導体と違って、金属/半導体の界面に電荷注入障壁による接触抵抗が大きいため構造が重要になる。 今まで多くの研究が行われてきたが、様々なパラメータが混在されて、正確な解析が難しくなってきた。　本研究では 2D デバイス シミュレーターを利用して、有機薄膜トランジスターの構造にともなう特性を定量的に調査した。その結果、ゲートとソース/ドレーンが反対側に位置しているスタガー構造と同じ方向に位置するプラナー構造を比較した結果、スタガー構造の電流量が大きいことを示した．電流密度分布でソース電極の全面から電流が注入されるスタガー構造が、ソースの角から電流が供給されるプラナー構造より電流の供給能力が大きいというのを確認した。金属/半導体の正孔の注入障壁が 0.3eV 未満では二つの構造の電気的特性の差がないが、0.3eV 以上になるとスタガー構造が有利になることが判った。

以上要するに、本論文は、フレキシブルディスプレイの核心要素技術である有機 EL ディスプレイの駆動方法と有機薄膜トランジスターの構造に関して、回路技術、回路解析、デバイスシミュレーション技術などを使い、新しい回路を提案し，その有効性を実証したものであり、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）の学位論文に値するものと認める。

氏　　名	高　橋　健　司
学 位 記 番 号	シ情　博甲第 408 号（工学）
学位授与の日付	平成 22 年 3 月 25 日
学 位 論 文 題 名	貫通電極による LSI 集積化技術に関する研究

論文調査委員

（主　査）	九州大学	教　授	浅　野　種　正
（副　査）	〃	〃	白　谷　正　治
〃	〃	〃	土　肥　俊　郎

論 文 内 容 の 要 旨

情報通信機器等の電子情報システムの性能は、LSI(Large Scale Integrated Circuit)内の素子微細化による高速・低消費電力化によって向上されてきた。しかし、LSI 内部での信号処理速度は向上に比べて、LSI チップを実装する半導体パッケージやプリント基板での速度向上に関わる技術開発は進んでいるとは言い難く、実際、パッケージや実装基板での信号伝達遅延がデータ転送速度のボトルネックになってきている。これを解決するための方策として、LSI チップを従来のワイヤボンディングや実装基板上の配線で接続するのではなく、LSI の半導体基板に作製した貫通電極を用いて極めて短距離で接続することが望まれている。これにより、信号伝達遅延を大幅に短縮化できるとともに、消費電力を低減することも可能になる。

貫通電極型 LSI は、アイディアとしては古くから存在するものであるが、貫通孔の形成、半導体ウェーハの薄型化など技術的に高い障壁があり未だに実現されていない。特に、貫通孔に導電材料を埋め込んで電極とする技術と、ウェーハを薄く加工し実装するまでハンドリングする技術の難易度が高い。

本論文は、この貫通電極型 LSI の実現に向けたこれらの

課題を克服するために、貫通電極型 LSI の製造プロセスの根幹をなす貫通電極の形成技術の研究開発、およびそれを実デバイスへ応用するための集積化技術に関する研究をまとめたものである。本研究では、銅めっき技術を用いてサイズ 10 μm、深さ 70 μm の貫通孔に銅を埋め込んで貫通電極を形成する技術の研究開発、および生産用の直径 8 インチのシリコンウェーハに機械的・電気的損傷を与えることなくウェーハの厚さ 50 μm まで薄くし、そのウェーハを LSI 実装までハンドリングする技術の研究開発を行い、貫通電極型 LSI の実用的な集積化技術の確立を図ることを目的として実施したものである。

得られた成果は、以下の 3 点に集約できる。

1. 貫通孔へ電解メッキ法で Cu の埋め込みを行って貫通電極を形成する技術開発において、めっき液組成の最適化を行いその指針を提示するとともに、電流の印加方法、酸素置換によるメッキ液内の溶存酸素濃度の制御などの技術を用い、目的とする大きさの貫通孔に空孔を発生させることなく、かつ LSI 製造に要求される生産性を満足する処理速度で銅を埋め込む技術を開発した。
2. 薄形化した脆弱なウェーハのハンドリング方法として、両面に UV 硬化型の粘着層を形成したテープを用いガラス支持基板にウェーハを貼り付けて薄型化加工を行う方法を提案し、これを実現するためのウェーハと支持用ガラス基板の貼合装置の開発と、薄くしたウェハをガラス基板から剥離する新たな技術を開発した。
3. 開発した貫通電極形成技術を実製品ウェーハに適用した。製品は CCD イメージセンサーで、貫通電極を用いてチップ裏面に配線を引き出すことを可能にし、その配線にはんだボールを搭載して外部電極としたカメラモジュールを試作した。そのカメラモジュールからは通常構造の製品と同等の画質をもつ画像が出力できることを実証するとともに、十分な耐環境性と信頼性を有することを確認した。

論 文 調 査 の 要 旨

情報通信機器等の電子情報システムの性能は、LSI(Large Scale Integrated Circuit)内の素子の微細化による高速・低消費電力化によって向上されてきた。しかし、LSI 内部での信号処理速度の向上に比べて、LSI チップを実装する半導体パッケージやプリント基板での速度向上に関わる技術開発が進んでおらず、パッケージや実装基板での信号伝達遅延がデータ伝送速度の決定要因になってきている。これを解決するための方策として、LSI チップを従来のワイヤボンディングや実装基板上の配線で接続するのではなく、LSI の半導体基板に作製した貫通電極を用いて極めて短距離で接続することが注目される。これにより、消費電力を低減することも期待できる。

貫通電極をもつ LSI は、アイディアとしては古くから存在するものであるが、貫通孔の形成、半導体ウェーハの薄型化など技術的に高い障壁があり未だに実現されていない。特に、貫通孔に導電材料を埋め込んで電極とする技術と、ウェーハを薄く加工し実装するまでハンドリングする技術の難易度が高い。

本論文は、貫通電極型 LSI の実現に向けたこれらの課題を克服するために、貫通電極の形成技術の研究開発、およびそれを実デバイスへ応用するための集積化プロセス技術に関する研究をまとめたものである。本研究では、めっき技術を用いて、開口径 10 μm、深さ 70 μm の貫通孔に空孔を発生させることなく銅を充填して貫通電極を形成する技術の開発、および生産用の直径 8 インチのシリコンウェーハに機械的・電気的損傷を与えることなくウェーハの厚さを 50 μm まで薄くし、そのウェーハを LSI 実装までハンドリングする技術の開発を目標として実施したものである。得られた成果のうち特に以下の 3 点が高く評価できる。

1. 電解メッキ法で貫通孔に銅を充填して貫通電極を形成する技術開発において、めっき液組成の最適化を行いその指針を提示するとともに、電流の印加方法、酸素置換によるメッキ液内の溶存酸素濃度の制御などの技術を用い、目的とする深さ/径比をもつ貫通孔に空孔を発生させることなく、かつ LSI 製造に要求される生産性を満足する処理速度で銅を埋め込む技術を開発した。
2. 薄形化した脆弱なウェーハのハンドリング方法として、両面に紫外線硬化型の粘着層を形成したテープを用い、ガラス支持基板にウェーハを貼り付けて薄型化加工を行う方法を提案し、これを実現するためのウェーハと支持用ガラス基板の貼合装置を開発した。また、材料力学的な検討から得た知見を元に、薄くしたウェーハを破壊せずにガラス支持基板から剥離する新たな技術を開発した。
3. 開発した貫通電極形成技術を世界で初めて CCD イメージセンサーに適用した。貫通電極を用いてチップ裏面に配線を引き出して外部電極との接続を可能にしたカメラモジュールを試作した。試作したカメラからは通常構造の製品と同等の画質をもつ画像が出力できることを実証するとともに、十分な耐環境性と信頼性を有することを確認した。この構造によりカメラモジュールの構造を大幅に簡素化、小型化できることが評価され、実用に至った。

以上要するに本論文は、回路を形成したシリコンウェーハに貫通電極を形成し、チップを積層して実装、集積化するプロセス技術を新たに開発し、LSI の信号伝送速度および機能を飛躍的に向上できる技術を創出したものであり、電子デバイス工学上の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　OLEG　NIZHNIK
学 位 記 番 号　シ情　博甲第 409 号（工学）
学位授与の日付　平成 22 年 3 月 25 日
学位論文題名　Design of the RF front-end for 2.4/5.2 GHz wireless communications
（2.4/5.2 GHz 帯無線通信用 RF フロントエンドの設計に関する研究）
論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　吉　田　啓　二
（副　査）　〃　〃　浅　野　種　正
〃　〃　〃　庄　山　正　仁

論 文 内 容 の 要 旨

As evidence from the recent and rapid growth of 3G cellular phones, wireless LAN, RFID tags, ETC (ETC: Electronic-Toll Collection) systems and so on, there are ever increasing demands of high performance, small size, and high speed microwave devices, circuits, components to meet the existing and future demands of wireless communication systems. Many wireless standards are emerging recently, and the seamless flow of the data needs multi-band multi-standard wireless transceiver in deep submicron CMOS technology in the future. Design of the wireless transceiver is extremely important because of the ubiquitous nature of the wireless communication in the modern work, and on the other hand, it is extremely challenging because many trade-offs between power consumption, cost, noise, gain, linearity and so on need to be considered in the design flow diagram. In this thesis, a new design methodology of the sub-circuits that can be integrated to realize a multiband or ultra-wideband wireless transceiver are proposed, implemented in 0.18 um CMOS technology and a few of them are successfully tested.

One of the major challenges in realizing a multiband transceiver is to implement a local oscillator that generates the frequencies from GSM band (0.9 GHz) to IEEE 802.11a band (5.2 GHz). A local frequency is necessary in a wireless transceiver for mixing operation with a carrier frequency in down conversion operation so that an analog to digital converter (ADC) can perform analog processing efficiently. So far, an inductor-capacitor (LC)-tank oscillator has widely been used in multi-GHz frequency wireless transceiver because it has better power consumption at narrow band operation. However, it is worthless to mention that the same architecture can not be implemented in multiband or wideband systems because an inductor (L) is inherent in an LC-oscillator, and such architecture demands a several numbers of on-chip spiral inductors in expensive silicon substrate for multiband or wideband operation which is not favorable for industrial and research purposes.

On the other hand, a ring oscillator has been used in low frequency operation in digital processing such as to generate a clock frequency of a few KHz to several MHz. One of the advantages of the ring oscillator is that it does not need an inductor that takes a large on-chip area in silicon substrate which usually degrades the performance of a LC-tank resonator. However, maximal operation frequency of the ring oscillators is limited, and it suffers from high phase noise and high power consumption, so that it could not draw the attention of researchers and engineers for many decades for high frequency applications and had been neglected in GHz band applications. The main objective of this thesis is therefore concentrated to realize a low phase noise, low power CMOS ring oscillator that can be used in multiband or ultra-wideband applications from a few hundreds MHz to several GHz band, and this objective was successfully achieved in this thesis by realizing a ring oscillator in 0.18 CMOS technology from 1.7 GHz to 5.5 GHz range having figure of merit (FOM) to be 162 dBc/Hz. The FOM realized in this thesis was 8dB improvement over the existing ring oscillators of this class so far reported in the open literatures. The proposed design consists of a digital inverter and an additional pair of transition-assistance transistors where one is an over-sized n-channel and another one is a small p-channel transistor. The proposed design exploits the merit of conventional high tuning range oscillators and high frequency oscillators, respectively and solves the existing problems of high phase noise and high power consumption successfully.

Furthermore, another existing problem to realize a dual-band transceiver is to implement a microwave amplifier in CMOS technology having a high common mode rejection ratio (CMRR). To realize a high CMRR amplifier, ideal current sources are necessary in deep submicron CMOS technology, and the conventional tail-current sources suffer from the low impedance for the short-channel MOSFET devices which usually degrades its CMRR performance. No successful attempts were reported so far for in deep submicron CMOS technology. We successfully solved such problems proposing an ideal current source having a very high differential resistance. The proposed architecture consists of the optimized size of the transistors in a new topology of self-biasing circuit and load resistors so that the measured CMRR of -15 dB was possible to be realized in 0.18

um CMOS technology. A new name as “Split-Tail Differential Amplifier with High Resistance (STDAR)” was given for this newly proposed architecture and it is inferred that the proposed STDAR has potential to replace all types of conventional amplifiers which suffers from low CMRR in deep submicron CMOS technology and finds its place for the system-on chip (SoC) implementation where true differential amplifier with the high CMRR at microwave frequencies is required.

Rest of the chapters deals with the design of other sub-circuits for the implementation of a dual-band transceiver in CMOS technology. For example, Chapter 3 describes the design of the down-conversion mixers. Two different architectures of the mixers were investigated, and it was found that resistive ring mixers are suitable for the high-performance mixer chip, but performance of the low-power and integrated versions are below minimal requirements due to the process variations and the transistors mismatch. To solve these problems, a new type of sampling mixer was proposed which is under the fabrication. Similarly, other sub-circuits such as a novel modulator, pre-amplifier, power amplifier, and wideband antenna design were proposed in Chapter 4 and an example to integrate all these wideband sub-circuits which covers IEEE 802.11a and IEEE 802.11b standard for a dual-band wireless LAN application was attempted in Chapter 6. Issues of the impedance matching, EM compatibility and new models for package simulation are also explained in detail.

Finally, it has been certain that the proposed transceiver architecture for dual-band (2.4/5.2 GHz) wireless communication system and its sub-circuits especially the low phase noise, low power wideband ring oscillator and wideband STDAR with high CMRR proposed in this thesis have the potential to speed up the implementation of a compact size, low cost, high speed dual-band wireless system in deep submicron CMOS technology in the near future.

論 文 調 査 の 要 旨

携帯電話、無線 LAN、テレビ放送、衛星放送等の無線通信では複数の周波数の無線システムが並存する状態となっており、多数のアプリケーションに対応する無線端末の開発が求められている。例えば無線 LAN(IEEE802.11h)の規格では 2.4GHz 帯および 5.2GHz 帯の周波数が用いられておりデュアルバンド・トランシーバが必要とされる。これらの無線端末に用いられる LSI チップは、高いキャリア周波数で動作する低雑音増幅器（LNA）、電力増幅器（PA）、ミキサー、電圧制御発振器（VCO）、位相同期回路(PLL)、各種フィルタ、インピーダンス整合回路等の高周波アナログ回路、およびアナログ・デジタル回路が混在するアナログ・デジタル変換器(ADC)などのミックストシグナル回路より構成され、これらのシステムは RF フロントエンドと呼ばれる。

本論文では RF フロントエンドを構成する各種高周波アナログ回路を１チップ化することにより高性能化・低コスト化することを目指し、高性能 LNA, ダウンコンバージョンミキサー、各種発振器、および高性能 PA を、回路シミュレータおよび電磁界シミュレータを用いて設計し、ファウンドリにより試作したチップを計測・評価することによりこれらの回路を実現し、システム的検討を行っている。本論文ではとりわけ以下の２点で評価できる。

第１に、マルチバンドＲＦフロントエンド実現において不可欠な、複数の周波数バンドをカバーする超広帯域 VCO を開発している。従来の LC-VCO では、複数のオンチップインダクタ（Ｌ）や微小電気機械システム（MEMS）スイッチを用いてＬを可変とするという手法が報告されているが、インダクタをチップ内に搭載することが不可欠であるためチップ面積が大きくなるという欠点があった。またリング型 VCO は､インダクタを使用しないので LC-VCO より 1/20 程度に小型化が可能であるが、周波数の上昇により、消費電力が急激に増加するため、これまで GHz 帯域用リング型 VCO の例は報告されていなかった。

本研究では、位相雑音・周波数可変範囲を改善するため CMOS(Complimentary Metal Oxide Semiconductor)インバータに発振波形整形用の回路を付加した新しいインバータ回路を用いたリング型 VCO を提案・設計し、0.18 ミクロンルール CMOS プロセスにより試作・評価を行った。その結果、1.7GHz から 5.5GHz の周波数帯域で動作可能な超広帯域・低位相雑音 VCO の開発に成功し、性能指数(FOM)で従来型より約 8dBc/Hz 改善した 162 dBc/Hz という非常に優れた値を実現した。この結果は今後必要とされる小型・低コストのデュアルバンドＲＦフロントエンドの実現に大きく寄与することが期待される。

第２に、デュアルバンド・トランシーバに必要な高コモンモード除去比（CMRR）を有するマイクロ波帯用低雑音増幅器の開発を行った。高 CMRR を有する増幅器の実現には、高周波で動作する理想的な電流源が不可欠であるが、CMOS の微細化により MOSFET デバイスの出力インピーダンスが低下してしまい、最先端 CMOS プロセスでは理想的な電流源の設計が困難であった。

本研究では、新たなバイアス回路及び負荷回路を考案し、高周波において高内部インピーダンスを有する電流源（スプリットテール電流源）を開発した。その結果 -15dB という優れた CMRR 値を有するスプリットテール差動増幅器を実現することができた。本成果は今後システム・オンチップ（SoC)の実現に大きく貢献することが期待される。

以上要するに，本研究は，2.4GHz 帯および 5.2GHz 帯デ

ュアルバンド・トランシーバ用 RF フロントエンドを高性能化するために必要な超広帯域リング型 VCO および高コモンモード除去比を有する高性能差動増幅器を開発したものであり，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	田　上　敦　士
学 位 記 番 号	シ情　博甲第 410 号（工学）
学位授与の日付	平成 22 年 3 月 25 日
学 位 論 文 題 名	大規模ネットワークサービスのための通信基盤と通信品質把握に関する研究

論文調査委員

（主　査）	九州大学	准教授	冨　浦　洋　一
（副　査）	〃	教　授	横　尾　　真
〃	〃	〃	荒　木　啓二郎
〃	〃	准教授	堀　　良　彰

論 文 内 容 の 要 旨

インターネットは当初の学術研究目的のネットワークから，広く一般的な情報基盤として社会に浸透しつつある．接続される端末も PC やワークステーションだけでなく，モバイル端末，携帯電話，家電と身近な端末まで裾野が広がっている．端末が身近になるに伴い利用者数も増え，インターネットは日本国内だけでも 9,000 万人以上が利用する大規模ネットワークとなっている．

利用者数の増加に伴い，インターネット上で提供されるサービスも大規模化が進んでいる．例えば，映像配信サービスや動画共有サービス，アンケートサービスなど数千から数万ユーザ以上が同時に利用するサービスが次々と提供されている．これらの大規模ネットワークサービスを提供するためのデータ通信は，情報を多くのユーザに送信するデータ配信と多くのユーザから情報を受信するデータ収集の 2 つに大きく分類できる．これらのデータ通信はどちらか片方だけでサービスを提供するのではなく，IP 放送とその視聴率調査の様に双方を組み合わせて 1 つのサービスを構成する事もある．

大規模化ネットワーク上でのデータ通信はそれぞれ，大規模ゆえに様々なスケーラビリティの問題が生じる．データ配信の場合，ユーザに情報を送信する際のトラヒック量やサーバ負荷の増大が問題となる．また，データ収集の場合は，個人情報を保護しつつデータを収集する手法が問題の一つとなる．さらに，これらのデータ通信の品質を確保するためには，ネットワークの状況を常時把握する必要も生じる．しかしながら大規模ネットワークの状況を常時把握することもスケーラビリティの問題が生じる．

これらの背景を考慮し，筆者は大規模ネットワークにおけるデータ通信のスケーラビリティに関する研究開発を行ってきた．本稿ではその研究成果について述べる．

まず 1 章では，本研究の背景について述べる．2 章では，関連研究に関して述べる．

3, 4 章では，データ配信における問題について述べる．まず，3 章では，P2P ファイル共有アプリケーションが生成するトラヒック量を制御する技術について述べる．P2P ファイル共有アプリケーションは，取り扱うファイルサイズが大きいため，発生するトラヒック量が多くネットワークへの負荷が大きい．特にネットワーク間のトラヒックは増設が難しく，軽減する制御が求められている．これに対して，アプリケーションには手を加えず，キャッシュサーバを P2P ネットワーク上に構築する技術を提案する．キャッシュサーバにより，ネットワーク間のトラヒック量を軽減する制御を実現できる．

4 章ではユーザの位置に応じた情報を配信する際のサーバの負荷を軽減する技術について述べる．周辺情報の検索や，特定のエリアのユーザに対する情報通知を実現するサービスでは，サーバが端末の位置をすべて把握する必要があり数千，数万のユーザが同時に利用した場合，スケーラビリティに問題がある．このため，端末間で P2P ネットワークを構築し，その中で位置情報のやりとりをする事により，サーバは端末の位置をすべて把握する必要がなくなる．

5 章では，データ収集における問題について述べる．大規模にユーザから情報を収集する時には，個人情報を保護する事が重要である．ユーザから収集する情報によっては，鍵暗号等を用いた通信路の秘密性だけでなく，収集者でさえ情報と情報発信者が結びつけられない匿名性が求められる．例えば，視聴率調査や支持政党調査などが考えられる．これに対して，大規模ネットワーク上で匿名性を確保可能な簡易な手法を提案した．これにより，回答者は確率変換を行い，収集者は収集した情報を加算するだけで，必要な情報を収集可能となる．

6 章では，双方のデータ通信の品質を担保するために必要な大規模ネットワークの品質把握手法について述べる．大規模ネットワーク上で通信品質を把握する場合，計測を行う通信パスの選択，計測結果の保持ならびに解析のための検索に関してスケーラブルな方法が求められる．これに対して，計測端末間で P2P ネットワークを構築し，計測結果の保持ならびに検索を大規模に行う事を実現する．さらに，P2P ネットワークの構造を元に計測を行う通信パスを選択する事により，自律分散的に通信パスを決定すると共に，P2P ネットワークの制御メッセージを計測のための計測パケットに重畳させる事により，ネットワークへの負荷を軽減する．これにより，大規模ネットワークの常時計測をネットワークの負荷を最小限にして実現できる．

最後に 7 章で，これまでの研究をまとめる．

論 文 調 査 の 要 旨

インターネットは日本国内だけでも 9,000 万人以上が利用する大規模ネットワークとなった．そして，その利用者の増加に伴い，インターネット上で提供されるサービスも大規模化が進んでいる．例えば，映像配信サービスや動画共有サービス，アンケートサービスなど数千から数万ユーザ以上が同時に利用するサービスが次々と登場している．サービスを提供するためのデータ通信には，情報をユーザに送信する情報配信と，ユーザから情報を受信する情報収集とがある．情報配信の場合は，サービスの大規模化に伴うサーバの負荷およびネットワーク上のトラヒック量の増大が問題となる．また，データ収集の場合は，第３者はもとより情報収集者にも情報が漏洩しないという匿名性を保証してデータを収集する必要がある．さらに，これらのデータ通信の品質を確保するためのネットワークの状況把握においても，ネットワークの大規模化に伴うネットワークへの負荷が問題となる．本論文は，これらの問題に取り組んだもので，以下の点で評価できる．

第一に，P2P（peer to peer）ファイル共有アプリケーションが生成するトラヒック量を制御する技術を開発した点である．P2P ファイル共有は，サービスの大規模化に伴うサーバの負荷を軽減する技術の一つであるが，これによるトラヒックの増加に起因するネットワークへの負荷が大きい．特に，ネットワーク間の通信路は増設が難しいため，ネットワーク間の負荷増大は深刻な問題である．これに対して，アプリケーションには手を加えずにキャッシュサーバを P2P ネットワーク上に構築することで，ネットワーク間のトラヒック量を軽減する制御技術を提案し，シミュレーションによりその有効性を示している．

第二は，ユーザの位置に応じた情報を配信する際のサーバ負荷を軽減する手法を開発した点である．携帯端末による周辺情報の検索や，特定エリアの情報をユーザが持つ携帯端末に通知するサービスでは，サーバがすべての端末の位置を把握し，必要な情報を配信する必要がある．このため，数千，数万のユーザが同時に利用した場合，スケーラビリティの問題が発生する．これに対して，端末間で P2P ネットワークを構築し，位置情報管理および大部分の情報（コンテンツ）配信に端末間通信を利用することにより，サーバの負荷を軽減させスケーラビリティを向上させる手法を提案し，シミュレーションによりその有効性を示している．

第三は，ネットワーク上での匿名性を保証するアンケート調査手法として，大規模情報収集であることを生かした，可否回答の割合を近似的に推定する簡便な情報収集手法を開発した点である．視聴率調査や政党支持率調査では厳密な値は要求されないが，これらの調査には個人情報保護の観点から匿名性が要求される．提案手法では，回答を確率的に変換した値を送信し，収集者は可否回答の割合を受信した値の標本平均として推定する．調査人数と推定値の許容誤差および信頼度が与えられると，これらの条件を満たすための確率変換の分散の上限が一意に定まること，および，同一分散の確率変換における匿名性の観点で最良の確率変換が理論的に示されている．

第四は，大規模ネットワークの品質把握のための効率的なアクティブ計測手法を開発した点である．大規模ネットワーク上でアクティブ計測を行う場合，計測を行う通信パスのランダムな選択，計測結果の保持ならびに解析のための検索に関して，スケーラブルな方法が求められる．これに対して，計測端末間で P2P ネットワークを構築し，P2P ネットワークの構造を元にした計測通信パスの選択，P2P ネットワーク上での計測結果の保持・検索を効率的に行う手法を提案し，シミュレーションにより有効性を確認している．

以上要するに，本研究は，インターネットの大規模化に伴う情報配信時のサーバ負荷およびトラヒック量の軽減のための技術，インターネットを利用した大規模な情報収集において匿名性を保証するための技術，大規模なネットワークにおける通信品質を把握するためのアクティブ計測技術の提案を行い，理論的解析およびシミュレーションによりその有効性を示したものであり，情報通信工学上価値ある業績である．よって，本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認める．

氏　　名　曽 我 武 史
学 位 記 番 号　シ情　博甲第 411 号（工学）
学位授与の日付　平成 22 年 3 月 26 日
学 位 論 文 題 名　並列プログラムにおける集団的通信の動的最適化

論文調査委員

（主　査）	九州大学	教　授	村 上 和 彰
（副　査）	〃	〃	青 柳 　 睦
〃	〃	准教授	南 里 豪 志
〃	〃	〃	井 上 弘 士

論 文 内 容 の 要 旨

近年のスーパーコンピュータにおける飛躍的なノード数の増加により、全処理時間に占める通信時間の割合が高まることから、通信性能改善の重要性は高まっている。また、ノード数増加によりチューニングに必要な情報量は膨大なものとなることから、チューニング作業の効率化に対する期待も高まっている。チューニング作業は、その作業をプログラム実行前に完了させておく静的最適化とプロ

グラム実行中に行う動的最適化の 2 つに分類することができるが、動的最適化については、実行中の環境に対応した適応的な最適化の実施、という静的最適化には実現し得ない特徴を持つにもかかわらず、プログラム実行中に発生する動的最適化実施に伴うコストがその実用化を阻害している。動的最適化におけるコストを過大視した場合には、静的最適化の対応範囲内で比較した場合には最適化効率が低下することや、動的最適化は研究開発においてコンセプト上チューニングの全作業を扱う必要があることも相まって、動的最適化の採用には消極的にならざるを得ない。しかしながら、動的最適化の実用化を阻害している最大の要因であるコストを十分低減できた場合には、静的最適化の対応範囲を無限大視しない限り動的最適化の有効性は明らかであり、動的最適化は広く採用される手法と成り得る。

本研究では、動的最適化による通信経路最適化の手法により、通信時間の短縮を図ると共に、動的最適化によるオーバーヘッドを極少化することで、動的最適化による自動チューニングの実用性を示すことを企図している。

通信最適化の対象として、チューニングの対象となることも多い負荷バランスの問題に着目した。木構造に従い集団的に行われる通信が持つ性質を利用すると、ノード間の負荷バランスのばらつきを吸収できる場合がある。この性質を利用した通信性能の改善を、木構造に従い集団的に行われる通信の中でも典型的なものの一つである、二項木によるブロードキャスト通信に適用した。二項木によるブロードキャスト通信について、木構造内のノード位置と物理的なノードの関係をプログラム実行中に変更することにより、負荷バランスの状態に合わせた最適な通信経路選択を行えるようにした。また、この通信経路選択を通信待ち時間を用いて実施することで動的最適化を可能にした。さらに、影響の大きい順に漸進的・発見的に動的最適化を進めていくことにより、極少コストでの動的最適化による通信性能改善を企図している。

この動的最適化機構は MPI ライブラリを用いて実装され、2 種の検証実験を行い極少コストでの性能改善という目的を達していることを確かめた。また、通信経路最適化の効果は簡易的な通信モデルを用いても行われ、ノード数が増加するほど通信経路最適化の効果が高くなることを確かめた。この簡易モデルの精度については通信時間測定実験を通じて考察を行い、その妥当性を確認した。本動的最適化機構は、MPI ライブラリ内に動的最適化の全機能を実装することが可能であり、ユーザープログラム変更等、ユーザ側の対応を必要としない構造になっている。

MPI ライブラリを用いた実装の際には、実装時に考慮すべき問題として、実測において現れる測定値のばらつきについて調査と分析を行った。分析によって、ばらつきは、数が少ないが大きく他の測定値と異なる値をとる測定値と、数が多く比較的他の測定値と近い値をとる測定値という 2 種の測定値を生み出すこと、また、測定値分布は、ばらつきによって多様であることがわかった。そして、正確かつ高速な最適化のためには、多様な分布をみせる測定値に対して、各測定値が特異的か定常的かを見極めることが重要であるとの知見を得るに至った。この分析結果に鑑み、動的最適化に必要な測定期間を代表する評価値の正確かつ高速な検出を可能にするための 2 手法を提案した。一つは、特異的な外乱の影響を排除し、定常的な外乱の影響を取り込むために用いる差分平均による特異点排除手法で、もう一つは、ばらついた測定値から代表値を得ると共に、入力データの変化等による代表値の変化に機敏に追従することを可能にするための加重平均による評価値算出手法である。さらに、この 2 手法の有効性について実験によってその効果を確かめた。

本研究で行われた通信経路最適化手法および待ち時間を用いた動的最適化手法は、木構造を含むアルゴリズムに従って集団間の通信を行う通信手法全般に有効な手法である。また、MPI ライブラリ内での動的最適化手法として、片側通信によるプロファイル結果の送信、グループ内に置かれた制御プロセスによる最適化及び、ブロードキャスト通信による同期的な再構成という概念は、MPI を使用した動的最適化一般に適用可能である。

論 文 調 査 の 要 旨

スーパーコンピュータの性能は留まることを知らない勢いで向上し続けているが，その伸びは計算ノード単体の動作周波数向上よりも計算ノード数の飛躍的な増加に負っている．この計算ノード数増加に伴いプログラム実行時間に占める通信時間の割合が高まってきており，通信性能の改善が重要な課題となっている．また，計算ノード数増加により性能チューニングに要するデータ量，時間コストが膨大となることから，性能チューニングの作業効率化に対する期待も高まっている．

性能チューニングは，それをプログラム実行前に完了させておく「静的最適化」とプログラム実行中に行う「動的最適化」の 2 つに分類される．動的最適化は，プログラムの実行時の動的振舞いに応じて適応的な最適化を実施できるという特長を有する一方，動的最適化のために実行オーバヘッドが生じるという課題も抱える．本研究は，複数かつ多数の計算ノードが参画する集団的通信を対象に，その通信経路選択を動的に最適化する「動的通信経路最適化」方式を提案し，通信時間の短縮を図ると同時にその最適化に要する実行オーバヘッドを削減し，動的最適化による自動性能チューニングの実用性を示したもので，以下の点で評価できる．

まず，通信時間を動的に最適化する際に監視すべき事象として，各計算ノードにおける計算負荷に着目した．一般

的に集団的通信は，各計算ノード間の通信を木構造に従ったある順序に基づいて実施することで行われる．このとき各計算ノードの計算負荷にばらつきがある場合，計算負荷の大きい計算ノードが関与する通信を後回しにすることで全体の通信時間を削減することが可能となる．この性質を活用して，二項木に従ったブロードキャスト通信を対象に，木構造内のノード位置と物理的な計算ノードとの対応関係をプログラム実行中に変更することで，計算負荷のばらつきに応じて最適な通信経路選択を行う方式を考案した．このとき，通信経路選択に要する処理を通信待ち時間内に実施することで，実行オーバヘッドを隠蔽することを可能にした．さらに，性能に与える影響が大きい順に漸進的かつ発見的に動的最適化を適用して行くことで，可能な限り小さなコストで動的最適化による通信性能改善を可能とした．

次に，提案方式を MPI（Message Passing Interface）ライブラリ内に実装し，2 種類の検証実験を行い低コストでの性能改善という目的を達していることを確かめた．また，通信経路最適化の効果を簡易な通信モデルを用いて検証し，ノード数が増加するほど通信経路最適化の効果が高くなることを確かめた．本提案方式は MPI ライブラリ内に全機能を実装することが可能であり，ユーザープログラム変更等のユーザの負担を必要としない点が評価できる．

最後に，MPI ライブラリを用いた実装の際に課題となった通信時間の測定値ばらつきについて調査と分析を行った．その結果，出現数は少ないが他の測定値と大きく異なる値をとる測定値，および，出現数が多く比較的他の測定値と近い値をとる測定値という 2 種類の測定値ばらつきが生じることが判明した．また，測定値分布はばらつきによって多様であることがわかった．そして，正確かつ高速な動的最適化のためには，多様な分布をみせる測定値に対して各測定値が特異的なものかあるいは定常的なものかを判別することが重要であることが明らかになった．この結果に鑑み，動的最適化に必要となる測定期間を代表する評価値の正確かつ高速な検出のための手法を 2 種類考案した．一つは特異的な外乱の影響を排除し，定常的な外乱の影響を取り込むことを目的とした「差分平均による特異点排除」手法，もう一つはばらついた測定値から代表値を得ると共に入力データの変化等による代表値の変化に機敏に追従することを可能とする「加重平均による評価値算出」手法である．この 2 手法の有効性について実験によってその効果を確かめた．

以上を要約すると，本研究は計算負荷のばらつきに着目した動的通信経路最適化手法を提案し，かつ，MPI ライブラリ内に実装し，その有効性を示したものである．本研究で得られた知見は情報科学の分野，特にアーキテクチャの研究分野に対して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　　吉　松　則　文
学 位 記 番 号　　シ情　博甲第 412 号（情報科学）
学位授与の日付　　平成 22 年 3 月 26 日
学位論文題名　　システム LSI の性能および消費電力の動的最適化に関する研究
論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　村　上　和　彰
（副　査）　〃　　〃　　青　柳　　睦
〃　　〃　　准教授　井　上　弘　士
〃　　〃　　〃　　石　原　　亨

論 文 内 容 の 要 旨

家電製品や自動車をはじめとする機械製品などの組込みシステムの高性能化は目覚ましく，低価格で利便性の高い様々な組込み機器が実現されている．組込みシステムでは，コンピュータを搭載することによりこれら製品に求められる機能や性能を向上し，より利便性の高い製品の実現が可能となる．組込みシステムにおける機能は通常，システム LSI とシステム LSI 上のプロセッサにより実行されるソフトウエア（組込みソフトウエア）により実現される．組込みシステムの高性能化と低消費電力化の要求に従い，組込みシステムに用いられるシステム LSI においても高性能化と低消費電力化が求められている．

システム LSI を用いてアプリケーションを実現する場合，所望の性能や消費電力を達成するために高性能化や低消費電力化のための設計が行われる．システム LSI 上で実行されるプログラムについて，プログラムの実行時間の 9 割は 1 割のプログラム箇所の実行に費やされているというプログラム実行における局所性の経験則が知られている．実行時間の当該経験則に従うと，1 割のプログラム箇所について高性能化や消費電力化のための設計を適用することで 9 割の実行時間部分に対して当該設計による効果を期待することができる．

プログラムの高性能化や低消費電力化のための設計をプログラムの実行時に適用することで，プログラム実行における局所性の経験則として現れる実行時間の大半を費やすプログラム箇所が変化する場合においても当該変化に応じて高性能化や低消費電力化が可能となる．プログラムの実行時に高性能化や低消費電力化設計を適用するためには，プログラム実行において実行時間の多くを費やすプログラム箇所をどのように発見するか，また発見した当該プログラム箇所をどのように高速に実行するか，あるいはどのように低消費電力化に用いるかが課題となる．本研究ではプログラムの実行時にも適用可能な高性能化や低消費電力化のためにプログラムの実行時のプロファイル

を対象にした高性能化と低消費電力化の手法について研究を行った．

プログラム実行の高性能化や低消費電力化のためにホットパスと呼ぶ高い頻度で実行される命令列を対象とし，当該ホットパスを用いた高性能化および低消費電力化について手法の検討と評価を行った．

まずプログラムの実行後にホットパスのプロファイルを行った結果として得られるホットパスについて，ホットパスの数や実行回数などプログラム実行により得られるホットパスの特徴について評価を行った．次に，プロファイルを用いプログラムの実行中にも高性能化を適用可能とするシステム LSI の性能の動的最適化について手法の提案を行った．高性能化の適用対象としホットパスを用い，またシステム LSI の構成として汎用プロセッサと専用エンジンによる構成を用いた．プログラムの実行中のホットパスの推定において性能オーバヘッドの無い専用ハードウエアによるホットパス・プロファイラを用いた．プログラムの実行中にホットパス・プロファイラにより推定したホットパス命令列に対し，システム LSI 上で最適化ソフトウエアを適用することで専用エンジンにて実行可能な形式に変換する．ホットパス命令列を専用エンジンにより加速実行を行うことで性能の向上を行う．シミュレーションを用いた評価の結果，本手法の適用により 20%以上の性能向上が得られることが分かった．

またプロセッサの中の命令キャッシュを対象としてプログラムの実行時に適用可能なシステム LSI の消費電力の動的最適化について手法を提案した．命令キャッシュでの消費エネルギーの削減に関して命令キャッシュに対し容量が小さく読み出しや書き込みに要する消費エネルギーの小さな小容量の命令メモリを用いる方法が提案されている．本提案ではホットパスを保持する対象とするホットパス・キャッシュと呼ぶ小容量の命令メモリを用い当該ホットパス・キャッシュに保持するホットパスの命令列をプログラムの振る舞いに応じて実行時に推定し更新することで命令キャッシュの低消費電力化を実現する．シミュレーションによる評価により，本提案手法を用いることで性能オーバヘッドが 0.6%と極めて小さくかつ命令キャッシュに関する消費エネルギーを 40%以上削減できことが分かった．

本研究ではプログラムの実行時の振る舞いに応じた高性能化設計や低消費電力化設計を適用するための手法として，プログラム実行におけるプロファイルを用い実行時間の多くを費やすプログラム箇所の推定手法および推定されたプログラム箇所を用いて高性能化設計や低消費電力化設計の適用を可能とするシステム LSI の構成方法を提案するとともに，提案手法についてシミュレーションを用いた評価を行い一定の効果があることを明らかにした．

論 文 調 査 の 要 旨

今日，コンピュータを搭載した組込みシステムは家電製品，自動車をはじめとする様々な製品に用いられている．組込みシステムは，システム LSI およびシステム LSI 内のプロセッサで実行されるソフトウエア（組込みソフトウエア）の双方により構成される．組込みシステムに対する高性能化と低消費電力化の要求増加に伴い，そこに用いられるシステム LSI に対する高性能化と低消費電力化の要求も高まってきている．本研究では，この高性能化と低消費電力化に対する要求を同時に満たすことを目標とする．

一般に，プログラムの実行に関して，その実行時間の 9 割は 1 割のプログラム箇所の実行に費やされているという「プログラム実行に関する局所性：9 対 1 のルール」が知られている．この経験則に従うと，1 割のプログラム箇所について高性能化や低消費電力化のための対策を適用することで 9 割の実行時間部分に対して当該対策による効果を期待することができる．これらの対策はプログラム実行前に静的に適用することも，あるいはプログラム実行時に動的に適用することも可能である．しかしながら，プログラム実行の動的振舞いが実行前に既知でない場合，または動的振舞いが実行中に変化する場合においては静的な適用は有効でなく，動的な適用が期待される．このような動的な適用を実現するには，プログラム実行時間の多くを費やすプログラム箇所を動的にどのように検出するか，さらには検出した当該プログラム箇所に対してどのように高性能化あるいは低消費電力化の対策を適用するかが課題となる．本研究は「ホットパス」と呼ぶ高い頻度で実行される実行命令列を対象にその動的推定法である「オンラインホットパスプロファイリング」を提案し，さらに推定したホットパスに対して高性能化および低消費電力化の対策を動的に適用する手法を考案してその有効性を検証したものであり，以下の点で評価できる．

まず，オンラインホットパスプロファイリング手法として，実行された分岐命令の履歴情報のみを用いる「分岐履歴法」を考案した．そして，従来手法の 1 つである「NET（Next Execution Tail）法」と比較して実現コストを低く抑えながらも，推定精度（推定したホットパスの中に真のホットパスがどれだけ含まれているかの割合）について 80%以上と NET 法と同程度の精度を達成することを確認した．

次に，汎用プロセッサとアクセラレータを組み合わせた構成を持つシステム LSI を対象に，上記で推定したホットパスの実行を汎用プロセッサからアクセラレータにプログラム実行中に動的にオフロードさせることで高性能化を達成する方式を提案した．シミュレーションによる性能評価の結果， 20%以上の性能向上が得られることが分かった．

最後に，プロセッサ内の命令キャッシュの低消費エネル

ギー化を目的に，「ホットパスキャッシュ」と呼ぶ方式を提案した．ホットパスキャッシュとは命令キャッシュとは別に設けるもので，命令キャッシュよりも小容量とすることでキャッシュアクセスに要する消費エネルギーを小さくしたものである．そして，オンラインホットパスプロファイリングで推定したホットパスを構成する命令列を本ホットパスキャッシュに格納する．当該ホットパスを実行中は通常の命令キャッシュではなく本ホットパスキャッシュから命令フェッチすることで，命令フェッチに要する消費エネルギーを削減する．シミュレーションによる消費エネルギー評価の結果，性能オーバヘッドを 0.6%と極めて小さく抑えつつ，消費エネルギーを 40%以上削減できることが分かった．

以上を要約すると，本研究はプログラムの実行時の動的振舞いに応じて動的に高性能化および低消費電力化の対策を適用する「動的最適化」技術に着目し，プログラム実行において実行時間の多くを費やすプログラム箇所であるホットパスの動的推定手法，および，推定したホットパスを対象にアクセラレータによる高性能化やホットパスキャッシュによる低消費電力化の方式を提案し，その有効性を示したものである．本研究で得られた知見は情報科学の分野，特にアーキテクチャの研究分野に対して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	久　原　重　英
学 位 記 番 号	シ情　博甲第 413 号（工学）
学位授与の日付	平成 22 年 3 月 26 日
学 位 論 文 題 名	超高速 MRI の画像再構成法と実時間 MRI システムとしての実用化に関する研究

論文調査委員

（主　査）	九州大学	教　授	香　田　　徹
（副　査）	〃	〃	竹　内　純一
〃	〃	〃	伊良皆　啓治
〃	〃	准教授	實　松　　豊

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、MRI の撮像時間を飛躍的に短縮できる超高速 MRI の実用化に際して、最大の課題であった「偽像」を除去する基本画像化手法の研究開発，ならびに実験室内小型システムから人体商用システム実現のための周辺技術の研究開発、さらに、そのシステムパフォーマンスを生かす、実時間 MRI システムとしての実用化に関する研究について述べたものである。

1973 年に Lauterbur が MRI の原理（である線形傾斜磁場）を発明してから，人体撮像における課題の一つは撮像時間が長いという点であったが、これに対し 1977 年に英国ノッチンガム大の Mansfield によって、撮像時間を飛躍的に短縮できる超高速 MRI（EPI : Echo Planar Imaging 法、Mansfield は 2003 年にノーベル賞受賞）が提案された。しかし基本的に撮像原理の提案のみであり、また原理的に非常に偽像を生じ易いために、実用化は極めて困難なものであった。この問題に対し我々は、その偽像の発生機序について解析し、偽像発生の主要因は、装置及び人体由来の静磁場不均一性等の理想状態からのずれによって、信号発生時刻がずれるためであることを明らかにした。さらにその偽像の除去手段として、プリスキャンにより事前に信号位置情報を取得した後、その情報を用いて信号位置を補正して再構成するプリスキャン方式を提案した。これによって EPI 法は実用化に大きく前進することとなった。本技術に関する特許は、2007 年に全国発明表彰、2008 年に文部科学大臣賞を拝受している。しかし、このプリスキャン法を用いても、原理的には僅かに偽像が残るため、装置及び人体由来の理想状態からのずれの程度によっては、実用上偽像が問題となる場合があった。そこで、このプリスキャン法でも僅かに残る偽像に関して、さらに解析を行い、基本的に EPI 法では正負両極性の傾斜磁場を用いるため、極性が一定である静磁場不均一性等の影響が、傾斜磁場の極性反転毎に、和もしくは差として反映され、データの一ライン毎の違いとなるために偽像が発生する事を明かにした。従って、傾斜磁場の片側極性のみのデータを用いれば偽像は発生しないが、そのままではナイキストの条件を満たさず、折り返しが発生して正しい画像は得られない。そこで、我々はこの問題を解決する手段として、マルチ RF コイルの感度分布をもちいて、単独のコイルではナイキストの条件を満たさないデータに関しても、複数のコイルからのデータを用いて折り返しを除去できる、Ra、Lim らによるパラレルイメージングの手法を応用する方法を提案した。この方法により、傾斜磁場の片側極性からのデータのみから画像を再構成することが可能となり、原理的に完全に偽像を除去する手法を確立した。

本論文では、さらに、上記諸研究により実用化が可能となった EPI システムのパフォーマンスを生かす、Real-time Interactive MRI システムの実現のため、Real-time Interactive Locate に関する研究、及び Real-time Motion Correction 技術を用いた Whole Heart MR Coronary Angiography 撮像技術に関する研究を行い、新しい手法を提案した。上記一連の諸研究により、EPI 法ならびにその実時間 MRI システムとしての実用化が可能となり、現在では、脳梗塞の診断から高次脳機能の研究用ツールとしてまで、医療分野だけでなく、脳科学研究の不可欠な手法となるなど、その応用分野は大きく広がり、大きな社会貢献を果たしている。

論 文 調 査 の 要 旨

磁気共鳴診断装置(MRI: Magnetic Resonance Imaging)は，放射線の被曝がなく，また造影剤の使用無しに，電気的パラメータの変更だけで任意断面の撮像可能な，低侵襲性，高診断性を有する医療分野に不可欠な画像診断装置である．1945 年 Bloch and Purcell によって発見された核磁気共鳴(NMR: Nuclear Magnetic Resonance)現象に依拠する MRI の原理である線形傾斜磁場の利用方式を 1973 年に Lauterbur（ノーベル賞受賞者）が発明してから，人体撮像に関わる課題の一つは撮像時間が長いという点であった．これに対し 1977 年に Mansfield（ノーベル賞受賞者）は，撮像時間を飛躍的に短縮（数十ミリ秒）できる超高速 MRI（EPI：Echo Planar Imaging ）法を提案した．しかしこれは基本的に撮像原理の提案のみであり，また原理的に偽像が生じ易いために，その実用化は極めて困難であった．特に MRI が商用化され始めた 1980 年代の当初においてはこれらの諸問題の解決が最大の課題であった．従って，動く臓器の撮像などは困難であり，今日広く普及している診断装置が有する診断能とは程遠かった．本論文は，MRI の撮像時間を飛躍的に短縮できる超高速 MRI の実用化に際して，最大の課題であった偽像を除去する基本画像化手法の研究開発，ならびに実験室内小型システムから人体商用システム実現のための周辺技術の研究開発，さらに，そのシステムパフォーマンスを生かす，実時間 MRI システムとしての実用化に関する研究について纏めたものである．

第一に著者は偽像の発生機序について解析し，偽像発生の主因は，装置及び人体由来の静磁場不均一性等の理想状態からのずれに伴う信号発生時刻のずれであることを明らかにした．さらにその偽像の除去手段として，事前に取得した信号位置情報を用いて信号位置を補正して再構成するプリスキャン方式を提案した．これによって EPI 法は実用化に大きく前進することとなった．

第二に著者はこのプリスキャン法でも僅かに残る偽像に関して解析を行い，EPI 法で必須の正負の極性の傾斜磁場では，極性が一定である静磁場不均一性の影響が，傾斜磁場の極性反転毎に，和もしくは差として反映され，データの一ライン毎の違いとなるために偽像が発生する事を明かにした．

第三に著者は傾斜磁場の単一極性からのデータは偽像が発生しない反面，ナイキスト条件の不成立による折り返しで正しい画像の復元不能という新たな課題が生じるが，マルチ RF コイルの感度分布を用いた折り返し除去法である，Ra，Rim らによるパラレルイメージング法による解決法を提案し，原理的に完全に偽像を除去する手法を確立した．

第四に著者は，上記諸研究により実用化が可能となった EPI システムのパフォーマンスを向上させるために，従来撮像前に設定したスキャンパラメータはスキャン終了まで変更できなかったが，撮像途中でも操作者（または装置自身）が Real-time かつ Interactive に撮像断面の方向，分解能，コントラスト等のスキャンパラメータを変更できる MRI システム及び Real-time Interactive システムのための制御システム，インターフェース技術として開発した 3D Locator 技術や Real-time Interactive Imaging 法を開発した．

最後に著者は，NMR 信号から横隔膜の位置情報を Real-time に取得しつつこれを用いて心臓を撮像するスラブの位置を動かしながら撮像することで，自然呼吸下でも呼吸動の影響を受けずに良好な画像化を可能とする Motion Correction 技術とマルチブレスホールド法を用いた Whole Heart MR Coronary Angiography(冠動脈造影法)に関する新しい手法を提案した．Whole Heart MR Coronary Angiography は，造影剤を用いずに心臓全体にわたる冠動脈の走行の画像化を可能とした．

以上，要するに，本論文は，超高速 MRI 法における偽像の発生機構を解明し，
プリスキャン方式，およびパラレルイメージング法の援用で，偽像の完全除去を実現し，さらに EPI システムの動体への適用手法を提案し，Whole Heart MR Coronary Angiography の実用化に関する研究を纏めたものであり，情報工学上価値ある業績である．よって本論文は博士（工学）の学位論文に値すると認める．

氏　　名	渡　邊　由起子
学 位 記 番 号	シ情　博乙第 99 号（学術）
学位授与の日付	平成 22 年 3 月 25 日
学 位 論 文 題 名	ハイブリッド環境下の大学図書館における学術情報サービスの構築

論文調査委員

（主　査）	九州大学	教　授	荒　木　啓二郎
（副　査）	〃	〃	谷　口　倫一郎
〃	〃	〃	竹　田　正　幸
〃	〃	准教授	池　田　大　輔
〃	〃	〃	岡　崎　　敦

論 文 内 容 の 要 旨

大学図書館を取り巻く環境が，電子ジャーナルに代表される学術情報の電子媒体化，利用者ニーズの高度化・多様化，国立大学法人化などにより，大きく変化している。一方，伝統的な紙媒体資料の保存と提供は継続しており，現在の大学図書館は，様々なレベルで多種多様な情報が混在するハイブリッド環境下に置かれている。図書館がこれらの変化に対応し，大学の学習・教育・研究を支える学術情

報基盤として機能するためには，新しい形で学術情報サービスを構築していく必要がある。本論文では，学術情報基盤としての大学図書館の機能や活動を，利用者と情報を有機的につなぐ，人，組織，システム，場の視点からとらえ，ハイブリッド環境下の大学図書館が，どのように学術情報サービスを構築し展開していくべきかについて，大規模国立大学である九州大学附属図書館における実践例を基に，実証的に研究した。

システムの面からは，増大する電子リソースの学術情報サービスを効果的に提供するための利用環境整備について議論した。図書館の情報検索サービスにおいては，二次資料データベース等の検索結果から一次資料を入手するまでの手順が非常に複雑であるという問題があった。さらに，従来の蔵書検索システム OPAC や図書館独自の電子ジャーナル集では，維持管理に多大な労力がかかる上，利用者へのアクセス情報の提供が不十分であった。そこで，電子ジャーナル管理システム，OpenURL リンクリゾルバなどの新しい技術を活用し，既存システムの OPAC 等と相互連携させる電子的サービスを提案し，九州大学の具体例を用いて，提案の方法が図書館業務の省力化と電子ジャーナルの利用促進に有効であることを示した。まず，電子ジャーナル管理システムを導入し電子ジャーナル集を充実させることで，利用者への網羅的かつ正確なアクセス情報提供が可能になるとともに，図書館側の管理業務が省力化できる。また，リンクリゾルバを用いて情報検索の流れを整理することで，利用者が一次資料を入手するまでの手順を劇的に改善した。さらに，OPAC に電子ジャーナル集のデータを登録し，リンクリゾルバを実装することにより，電子媒体と紙媒体資料のシームレスな同時検索を実現した。

組織の面からは，従来型の図書館組織のままでは，大学図書館が新しい業務とサービスに十分な対応ができなくなっているため，電子リソース関連業務の運用に適した組織体制について議論した。まず，電子ジャーナル導入による図書館業務の変化を分析し，従来型の管理系業務とサービス系業務，図書業務と雑誌業務という区分による組織体制から脱却し，電子リソースに関連する管理業務とサービス業務を一体化する組織改革を提案した。この組織改革により，電子リソースの契約とサービス窓口の一本化，迅速な意思決定と機動性の確保，全学共通経費である多額予算を管理・執行する責任体制の整備，出版社等との交渉力強化，図書館資料の印刷版から電子媒体への移行促進などを実現した。また，契約とサービスの担当者を一箇所に配置したことで，情報共有の向上と意見交換の活性化が行われ，均質で高度なサービスの提供が可能となり，図書館員の人材育成と新しい電子リソースや技術に柔軟に即応できるようになった。さらに，学内に分散する利用者サービスの担当者や全学のシステム系部署と連携する体制を整えることで，全学的な電子リソース利用支援体制が強化できる方法を提案し，それらの組織改革を実現し，有効性を示した。

人の面からは，ハイブリッド環境下の大学図書館は，電子リソースの利用を促進する新しい電子的サービスを展開する一方で，図書館が収集・所蔵している伝統的な紙媒体資料の利用度を高めるためのサービスも充実させる必要があることから，図書館サービスを支える図書館員の専門的な知識と技術を向上させる人材育成の方法について議論した。図書館の職員研修に注目し，伝統的な紙媒体資料に対する専門性を育成する研修方法を，九州大学附属図書館「ラテン語古刊本書誌作成研修会」の実施によって得られた知見を基に具体的に提示した。この研修方法は主に古典籍資料に対応するものであるが，図書館員の知的関心の拡大，古刊本を取り扱う際の調査手法の習得，図書館が所蔵する貴重資料の再評価，研修内容の蓄積と共有に実効性があることを，九州大学の研修活動に対する全国的な評価と学内における波及効果から示した。

本論文では，以上 3 つの側面から，ハイブリッド環境下の大学図書館が効果的に学術情報サービスを構築し展開する方法を考察し，新しい技術を活用した電子的サービスの相互連携による電子リソース利用環境の向上，従来型組織の枠組みを超えた図書館組織改革による電子リソース関連業務運用体制の整備，伝統的紙媒体資料に対する図書館員の専門性を育成する研修方法を提案し，実際に九州大学附属図書館で実現した結果から，それらの有効性を示した。

論 文 調 査 の 要 旨

近年、情報化が社会の隅々にまで浸透し、日常社会生活や各種業務に大きな影響を与えている。大学図書館においても、従来印刷媒体の形で提供されていた学術雑誌や書籍が電子ジャーナルや電子ブックという電子媒体によってインターネットを介して提供されるようになった。これに伴って、大学図書館利用者の利用形態、ならびに、大学図書館が提供する学術情報サービスおよび業務内容が大きく変化してきている。図書館におけるこのような電子化が進む一方で、従来の紙媒体の図書資料の管理と提供も相変わらず図書館の重要な役割である。

本論文では、情報化の中におかれた大学図書館の現状を分析して課題を整理し、大学図書館の役割を再検討した。本論文は、九州大学附属図書館における具体的実践事例を基にして、高度情報通信ネットワーク社会におけるこれからの大学図書館の在り方について考察した結果をまとめたものであり、以下の点で評価できる。

第一に、この数年間で急激に増加した電子ジャーナルを大学図書館として利用者に提供する際の利便性を高める方式を提案して実現した。すなわち、図書館所蔵の図書資料を閲覧貸出する際に利用者が検索する基本データであ

るオンライン目録は従来の印刷媒体の図書資料に対する目録カードを電子化オンライン化したものであり、新規に現れた電子ジャーナルのことを考慮していなかった。そのため、図書館では当初少数であった電子ジャーナルに対して別種の目録を作成していたが、電子ジャーナルの増加に目録整備や電子ジャーナル集構築が追いつかず、十分な利用支援環境を提供することができないために、せっかく導入した電子ジャーナルの利用が進まないという問題が生じた。この問題を解決するために、印刷媒体の図書資料と電子媒体の図書資料との目録を統一的に作成管理し、一元化して利用者に提供するとともに、web 上の各種の検索ツールとの連携をとって、電子ジャーナルの本文へのアクセスを容易にした。これにより、利用者の電子ジャーナルの利用に関する利便性が大幅に向上し、その結果、電子ジャーナルの利用が増大した。この効果的な方式は、国内の図書館から注目され、他の多くの図書館で採用されている。

第二に、電子ジャーナルの利用のみならず、図書館が従来から所蔵し利用に供している印刷媒体の図書資料のオンライン目録情報を充実させることにより、所蔵物の利用度を高めることを支援する手法を考案して、九州大学附属図書館のラテン語古刊本を対象として実施した。これらラテン語古刊本のオンライン目録に掲載する書誌データを充実させるためには、個々の書物のタイトルページを精読して、そこから各種の有用な情報を読み取る必要がある。そのために、図書館員の専門性を高める研修を計画して実施した。その結果として、オンライン目録中の書誌情報を充実させて利用者に提示することができ、それが所蔵物の利用を促進する効果があることが明らかとなった。これはラテン語古刊本のみならず図書館所蔵の図書資料に一般的に有効である。この成果は、広く国内の図書館等に公表されて大いに関心を得て、国立大学図書館協会で高く評価されて表彰をうけた。

第三に、電子ジャーナルと従来からの印刷媒体の図書資料とを並行して管理し提供するための大学図書館業務ならびに組織について考察し、情報化が進行する現状に適した業務体系と組織体系を提案した。この提案は、九州大学附属図書館において業務改革および組織改革として実現された。これは、情報化を契機に大学図書館の学術情報基盤提供という本来の役割を再認識し、IT を利活用してその役割を達成する方法や図書館員の人材育成の方法を具現化するもので、高度情報通信ネットワーク社会を大学図書館として学術情報基盤構築という面で実現する先進的な実例として評価できる。

以上、本論文は、電子化によって学術情報の提供媒体や流通方法が急激に変化し、利用者の利用形態が多様化し、また、図書館組織運営も大きく影響を受けて、激動のさなかにある大学図書館において、学術情報基盤としての図書資料の利活用促進方法、専門性を有する図書館員の育成方法、図書館組織の在り方について九州大学附属図書館の事例を通して具体的な方法と展望を示したものであり、図書館情報学上寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（学術）に値するものと認める。

氏　　名　成　田　　薫
学位記番号　シ情　博乙第 100 号（工学）
学位授与の日付　平成 22 年 3 月 23 日
学位論文題名　多層プリント配線板上の LSI チップ間高速伝送線路とモデル化に関する研究
論文調査委員
（主　査）　九州大学　准教授　吉　富　邦　明
（副　査）　〃　教　授　吉　田　啓　二
〃　〃　〃　浅　野　種　正
〃　〃　准教授　藤　崎　清　孝

論文内容の要旨

近年、電子機器、特にディジタル電子機器の高速、高密度化の進展が著しい。最近の超高密度ともいえる集積技術は、主として CMOSLSI に代表されるシリコンチップ上の集積回路技術と、チップ間を電気的に接続し物理的に限られた空間のなかにパッケージングする実装技術とによって実現されている。特に実装技術の中心的な役割を担うプリント配線板では、数千本の配線を一枚のボード上に集積するため、導体層を数十層にも堆積する多層化の推進がなされている。昨今の電子機器は高密度化に加え、高速化の進展も著しい。LSI チップ内の動作速度は数 GHz に達し、そこで処理された多量のデータを別の LSI に伝送する必要が生じるが、その際のデータ伝送方式として、配線数を減らすことのできるシリアル伝送方式が多く用いられるようになってきた。この際、パラレル伝送に比べ 1 チャンネルあたりの伝送速度は必然的に高速となる。最近のハイエンドのコンピュータや通信機器等で使用される回路では、1 チャンネル（1 伝送線路）あたり 1 秒間に 10G ビット（10Gb/s）以上のデータ伝送速度が要求されている。このように、電子機器の高速、高密度化実現のためには、多層プリント配線板上における LSI チップ間の高速電気伝送がますます重要な技術となってきているが、実現のためにはいくつかの課題が存在する。高速信号は、LSI の出力バッファから別の LSI の入力バッファにいたるボード上の一連のパスを経由し、その伝送線路は、物理的な構造が異なるいくつかの部分で構成されることになるが、その高周波特性は必ずしも良好とはいえない。また、伝送線路構造が複雑なため、シミュレーション用のモデル化が困難であるという問題がある。つまり、伝送線路構造や出力バッファ素

子を改良し高周波特性を改善するともに、それらを高精度でモデリング、キャラクタリゼーションするための技術を確立することが急務となっている。本論文は、多層プリント配線板上でLSIチップ間の高速電気伝送を実現するため、多層プリント配線板上の伝送線路や高速素子を高精度で測定、キャラクタリゼーションする方法について、また、垂直方向伝送線路（ビアホール）やLSI内部の静電保護回路の構造を改良し、高周波特性を改善する方法についての研究結果をまとめたものであり、7章で構成されている。

第1章では、序論として研究の背景と目的を述べた。

第2章では、長さの異なる二線路を用いた数学的な誤差除去方法と、不要結合を最小にする高性能ビア構造を用いることにより、接続の不連続点や不要結合に起因する誤差を効果的に取り除き、多層プリント配線板上に形成されたストリップラインの伝播定数と特性インピーダンスを精度良く測定する方法を述べた。結果として、ストリップラインの分布定数パラメータ、挿入損失、信号伝播速度などのパラメータとその周波数依存性が広い周波数領域で明確となり、伝送線路の高精度キャラクタリゼーションが実現できた。

第3章では、側壁をグランドビア列で形成した共振器を多層プリント配線板上に実装し、プリント配線板の誘電材料の実効的な複素誘電率（比誘電率と誘電正接）を高精度で測定する方法を述べた。グランドビア間隔（Lgr）とグランドビア側壁の実効的な境界との関係を実測とシミュレーションにより明らかにすることで、共振器のサイズを補正し、共振周波数から精度よく誘電体の比誘電率を求める方法を確立した。また、Lgr がある程度小さいと、放射による漏れ損失が無視できることを明らかにし、共振のQファクターから誘電正接を求める方法を確立した。これらの方法によって、3GHz から 20GHz にいたる広い周波数範囲でプリント配線板の誘電材料のキャラクタリゼーションに成功し、伝送線路シミュレーションの高精度化に寄与できた。

第4章では、多層プリント配線板上の垂直伝送線路とりわけスルーホールビアに高速信号を伝送させる場合の問題点をシミュレーション解析と実測によって明らかにし、新規構造によって問題点を克服する方法を提案した。スルーホールビアの主な問題点の一つであるスタブ効果は、ビアに付加されたスタブが共振することによって、反射損失と挿入損失がその共振周波数において増加する現象であり、伝送特性を著しく悪化させることを明らかにした。また、スルーホールビアのもう一つの主な問題点は漏れ損失が大きいことであり、これによって漏洩したエネルギーが平行平板共振を励振し、伝送特性が悪化したりクロストークが増幅されることをみた。これらを克服するための構造として、信号ビアをグランドビアで取り囲んだシールド型ビアの提案を行い、シミュレーション解析と実測によって効果を実証し、良好な高周波特性が得られることを確認した。

第5章では、新規に考案した共通放電線（CDL）を用いた高速 LSI 用オンチップ静電保護について述べた。チップ上の任意のパッド間に正極、負極のどちらの ESD パルスが印加された場合でも低インピーダンスの放電パスが形成されるように、バイポーラ素子とダイオードの並列接続で形成される保護素子によって全てのパッドを CDL に接続した。さらに、大部分の放電電流が被保護デバイスである出力トランジスタではなく確実に保護素子と CDL を経由して流れるように、構造上の工夫を行った。その結果、ESD 耐圧の向上と I/O 容量の削減を両立することが可能となった。CDL 型保護を低容量 I/O ピンを有する高速DRAM の実機に搭載し評価することで、従来よりも大幅にESD 耐圧が改善できること、またチップ間電気伝送の高速性能向上が実証された。

第6章では、将来の高速LSI内部素子として期待されているカーボンナノチューブトランジスタ（CNTFET）の高周波特性の測定、及びモデル化について述べた。ネットワークアナライザによってデバイスを直接測定するため、チャネルに CNT が高密度で存在するマルチチャネル型CNTFET 構造を開発し、通常のシングルチャネル型CNTFET に比べて出力インピーダンスを大幅に低下させた。また、高インピーダンスデバイスのSパラメータ測定値に付随する誤差を校正パタンを用いてディエンベディングし、高精度でデバイス部分のSパラメータを抽出する方法をとった。その結果、遮断周波数(f_T) として 10.3 GHz、最高発振周波数(f_{max}) として 3.5 GHz という値を得た。さらに、CNTFET に適合する RF 等価回路モデルを提案し、測定値を高精度で説明できることを確認した。回路モデル解析の結果、電極間の寄生容量と CNT の寄生抵抗を減らすことによって、CNTFET の高周波特性を大きく改善できることが明らかとなった。

最後に第7章で本研究の結論と今後の展開について述べた。

論 文 調 査 の 要 旨

近年、ディジタル電子機器の小型化と信号処理速度の高速化が著しく進展している。これらの性能向上は、シリコンチップ上の集積回路(LSI)技術と、LSI チップを物理的に限られた空間の中にパッケージングして電気接続する実装技術の進歩によって実現されている。この内、実装に用いるプリント配線板では、数千本の配線を一枚のボード上に高密度集積するために数十層にも多層化した配線層の増加を抑制するために、LSI 内部ではパラレル伝送されていた信号をシリアル信号に変換して伝送線路の数を減らす方式がとられるようになってきた。その結果、パラレル伝送に比べ1伝送線路あたりの伝送速度は必然的に高速

となる。最近のハイエンドのコンピュータや通信機器等で使用される回路では、1 伝送線路あたり 1 秒間に 10G ビット以上のデータ伝送速度が要求されている。今後、社会における情報処理量の増大を予想すると、LSI チップ間の電気信号伝送をさらに高速化する技術を開発することが必要となるが、それを実現するためにはいくつかの課題が存在する。高速信号は、LSI の出力バッファから別の LSI の入力バッファにいたる基板上の伝送線路を伝搬するが、その線路は物理的に構造の異なるいくつかの部分で構成されるために高周波信号の伝送特性は良好ではない。したがって、伝送線路構造や出力バッファ素子を改良し高周波特性を改善するとともに、シミュレーションを用いて設計するために、それらの電気特性を高精度でモデリング、キャラクタリゼーションするための技術を確立することが重要である。

本論文は、多層プリント配線板上で LSI チップ間の高速電気信号伝送を実現するため、多層プリント配線板上の伝送線路の特性パラメータ抽出、キャラクタリゼーション法、垂直方向伝送線路（ビア配線）や LSI 内部の静電保護回路の構造の高周波化のための改良、カーボンナノチューブトランジスタの高周波特性の測定とモデル化についての研究成果をまとめたものであり、以下の点が評価できる。

(1) 伝送線路理論による数学的モデルに基づいて、多層プリント配線板上の伝送線路に及ぼすコネクタの影響を除去し、伝送線路の特性パラメータを精度良く抽出する方法を提案し、その有効性を検証した。
(2) 伝送線路の特性パラメータ抽出法を利用して、プリント配線板の電気定数の高精度測定を行うとともに、高周波特性の優れたシールドビア配線構造を提案し、性能を実証した。
(3) 高速 DRAM 用静電保護回路の開発を行った。
(4) 高速 LSI 内部素子として期待されるカーボンナノチューブトランジスタの高周波特性を高精度に測定し、カーボンナノチューブトランジスタのモデル化に成功した。

以上要するに、本論文は、多層プリント配線板上の LSI チップ間における高速通信を行うための技術指針となる伝送線路の特性パラメータの抽出とモデル化、およびナノ構造を用いた新しい LSI 素子のモデル化について重要な知見を創出したものであり、電気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）の学位論文に値するものと認める。