

学位論文審査報告

山中, 克利

由井, 俊太郎

Othman, M. M. Othman

吉永, 諭史

他

<https://hdl.handle.net/2324/1564295>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 19 (2), pp.47-86, 2014-09-26. 九州大学大学院システム情報科学研究所

バージョン :

権利関係 :

学位論文審査報告

氏 名 山中 克利
学位記番号 シ情 博甲第 520 号 (工学)
学位授与の日付 平成 26 年 1 月 31 日
学位論文題名 双方向に昇降圧変換可能な結合インダクタを用いた直接方式電力変換装置に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 庄山 正仁
(副 査) " " 村田 純一
" " " 岩熊 成卓

論文内容の要旨

近年, 化石燃料の枯渇や地球温暖化対策を目的とした二酸化炭素 (CO₂) 削減のために, 化石燃料消費を削減させ, 二酸化炭素を排出せず, 環境負荷の低減が期待できる再生可能エネルギーの利用研究が推進されている. 再生可能エネルギーの発電装置は様々な国や場所に設置され, 発電電力量が安定でない太陽光発電・風力発電などが入力となり, 電力変換装置 (コンバータ) を用いて, 電力を負荷に必要な電圧・周波数へ変換するため, 直流 (DC) 電源・交流 (AC) 電源の広い電圧範囲に対応し, 低ノイズで環境にやさしく, 発電電力を効率良く変換できる電力変換装置が必要とされている. また, 余剰電力をバッテリーなどへ蓄電し, 負荷電力よりも発電電力が不足する場合には蓄電池から電力を供給することで, 負荷への電力供給の平準化も行われており, バッテリーを充放電する電力変換装置の効率化も求められている. これらの要求に対して直接形マトリクスコンバータを高効率で求められる再生可能エネルギーの電力変換装置に応用しようという研究・開発・製品化が進んでいる. 直接形マトリクスコンバータは入出力間を双方向スイッチで直接接続し, 高効率で双方向に電力を変換する直接方式の電力変換装置である. 本論文では, 入出力間を原理上一つのスイッチで直接接続し電力変換を行う方式を直接方式ということとする. マトリクスコンバータは直流母線と大容量のコンデンサを持たないので, 他の双方向電力変換回路に比べて小形化を実現できる. しかし, マトリクスコンバータは歪みなく出力できる電圧が入力交流電源電圧よりも低いという問題をもっており, この対策としてマトリクスコンバータとインダクタを組み合わせることで電流形の変換動作を行い, 低圧のバッテリーへ充放電を行う電力変換装置や双方向の昇降圧変換を行う電力変換装置が提案されている. しかし, これらの提案されている変換装置は, 電力変換方向を反転させる応答が遅いという

問題や, 昇圧動作・降圧動作を切り替える際に回路自体を切り替えなければならないという問題をもっており, 高速な応答が必要とされるような装置への適用には十分ではない.

本研究では, 直接形マトリクスコンバータとインダクタを組み合わせることで双方向に昇圧・降圧の電力変換を行う装置の問題を解決し, 高効率で, 低ノイズで環境にやさしく, 多種の電源へ対応できる変換装置を実現するために, 結合インダクタとマトリクスコンバータ回路および電流形の電力変換方法を用いた新しい直接方式の電流形電力変換装置を提案する. そして, 提案する回路方式, 動作を解説し, シミュレーションおよび実験で確認を行い, その有効性を明らかにすることを目的とする. 提案する新しい回路は再生可能エネルギーへの適用のみでなく, 昇圧動作と降圧動作および力行・回生動作の高速な切り替えが必要とされるモータ駆動へも十分適用することができるので, シミュレーションおよび実験はモータを駆動する条件にて確認を行った.

本論文は, 以下の 6 章で構成されている.

第 1 章は序論であり, 再生可能エネルギーの利用において求められる電力変換装置と電力変換装置の技術動向について解説し, さらに, 本研究が対処しようとする問題点と, 本研究の課題を明確にし, 研究の目的を述べた.

第 2 章は, 電力変換装置の基本的な回路と PWM 方式について解説し, 更にインバータが出力するコモンモード電圧について解説した. 次に, 提案されているマトリクスコンバータとインダクタを組み合わせることで双方向に昇圧・降圧の電力変換ができる装置について解説し, その問題点を明らかにした.

第 3 章では, 結合インダクタ巻線間の電流移動 (転流) における電流の転流速度と転流前後の電流値について解析を行い, インダクタ巻線電流を高速に反転させる方法として, 結合インダクタの巻線間の転流が利用できることを明らかにした.

第 4 章では, 結合インダクタとマトリクスコンバータ回路および電流形の電力変換方法を用いて, 双方向に昇圧・降圧変換を行い, 更に電力変換方向を瞬時に切り替えることができる新しい直接方式の DC-AC 電流形電力変換装置を提案した. そして, 提案する回路と動作について解説し, 提案回路の動作をシミュレーションおよび実験で確認し, 提案回路は従来できなかった運転中の電力変換方向切り替えが高速にできることを確認し, その有効性を明らかにした.

第 5 章では, 結合インダクタとマトリクスコンバータ回路および電流形の電力変換方法を用いて, 運転動作中に双方向に昇圧・降圧変換を行い, 更に電力変換方向を切り替えることができる新しい直接方式の AC-AC 電流形電力変換装置を提案した. そして, 提案する回路の導出と動作に

ついて解説し、提案回路の動作をシミュレーションおよび試験で確認し、提案回路が従来できなかった昇圧動作と降圧動作のスムーズな切り替えと電力変換方向の切り替え動作が運転中にできることを確認し、その有効性を明らかにした。

第 6 章は結論であり、本研究で得られた結果をまとめた。

論文調査の要旨

近年、化石燃料の枯渇や地球温暖化対策を目的とした二酸化炭素削減のために、再生可能エネルギーの利用研究が推進されている。発電電力が頻繁に変化する太陽光発電・風力発電などの再生可能エネルギーの利用では、発電されたエネルギーを負荷に必要な電圧・周波数へ効率良く変換できる電力変換装置が必要である。また、発電電力が負荷電力を上回る場合は余剰電力をバッテリーなどへ蓄電し、逆の場合はバッテリーから電力を供給することで電力供給の平準化が行われており、バッテリーの充放電に用いられる電力変換装置の高効率や高速応答が求められている。さらに、エレベータなどのモータ駆動においては力行・回生動作が頻繁に繰り返されるため、これに適用できる高効率で高速応答可能な電力変換装置が必要である。

直接方式マトリクスコンバータは入出力間を双方向スイッチで直接接続する方式で、等価的に直列に接続されるスイッチの個数が少ないため、他の双方向電力変換回路に比べて高効率であり、しかも大容量のコンデンサが不要で小形化しやすい特長を持つが、歪みなく出力できる電圧が入力電源電圧よりも低いという問題が存在する。その対策として、マトリクスコンバータとインダクタを組み合わせた電流形の電力変換方法を用いて双方向の昇降圧変換を可能とした電力変換装置がこれまでに提案されている。しかし、これらの電力変換装置は、電力変換方向を反転させる応答が遅いという問題や、昇圧動作・降圧動作を切り替える際、用意した 2 つの回路を切り替えなければならないという問題があり、高速な応答が必要とされる装置への適用には不十分であった。

本研究は、双方向に昇降圧変換を行う電力装置に関する上記の問題を解決し、各種の用途に対応できる変換装置を実現するため、結合インダクタとマトリクスコンバータ回路および電流形の電力変換方法を用いた新しい直接方式の電流形電力変換装置を提案し、その有効性を明らかにしたもので、次の諸点で評価できる。

(1) 双方向電力変換装置において電力変換方向を瞬時に切り替えるために、2 巻線構造を持つ結合インダクタを用いることを提案し、基本回路において、結合インダクタの巻線間の電流移動(転流)における転流速度と転流前後の電流値について詳細な解析を行っている。これにより、インダクタ巻線電流を高速に反転させる方法として、結合インダクタの巻線間の転流が利用できることを明らかに

している。

(2) 結合インダクタとマトリクスコンバータ回路および電流形の電力変換方法を用いて、運転動作中に双方向に昇降圧変換を行い、更に電力変換方向を瞬時に切り替えることができる新しい直接方式の DC-AC 電流形電力変換装置を提案している。さらに提案回路の動作解析を行い、シミュレーションおよび実機試験により、従来できなかった運転中の電力変換方向の高速な切り替えが可能であることを示し、その有効性を明らかにしている。なお、提案回路はバッテリーを用いた再生可能エネルギーシステムにおける電力平準化装置への適用のみでなく、昇圧動作と降圧動作および力行・回生動作の高速な切り替えが必要とされるモータ駆動へも適用することができるため、本論文ではモータ駆動を例にとりシミュレーションおよび実機試験を行っている。

(3) 前項と同様の手法を適用した新しい直接方式の AC-AC 電流形電力変換装置を提案している。さらに提案回路の動作解析を行い、シミュレーションおよび実機試験により、従来できなかった運転中の昇圧動作と降圧動作の切り替えと電力変換方向の切り替えがスムーズにできることを示し、その有効性を明らかにしている。なお、この提案回路は、例えば回生機能付きモータと電力系統間の電力変換装置として用いられる。

以上要するに、本論文は、双方向に昇降圧変換が可能な電力変換装置の高効率化・高速応答化を実現するため、結合インダクタとマトリクスコンバータ回路および電流形の電力変換方法を用いた新しい直接方式の電流形電力変換装置を提案し、その有効性を明らかにしたものであり、電気電子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 由井 俊太郎
学位記番号 シ情 博甲第 521 号(工学)
学位授与の日付 平成 26 年 2 月 28 日
学位論文題名 LEVEL SET METHOD の高速化および医療画像への応用に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 倉爪 亮
(副 査) " 名誉教授 長谷川 勉
" " 准教授 諸岡 健一
" " " 原 健二

論文内容の要旨

カメラや CT、MR などから得られる画像情報や、レーザレンジファインダやステレオカメラから得られる距離画像情報から、ユーザが注目する領域を自動的に抽出するセグメンテーション手法の一つに、Snakes に代表される動的

輪郭モデルがある。従来の動的輪郭モデルは、対象領域の分離、結合など位相変化への対応が困難であることが問題であったが、位相変化に対応可能な動的輪郭モデルとして、Osher, Sethian らにより Level Set Method が提案され、医療画像処理やカメラ画像内の移動体検出、追跡などで利用されている。しかし、Level Set Method の実現には多くの計算量が必要であり、実応用には計算量の削減による高速化が課題であった。さらに、医療画像において腫瘍領域の自動抽出に Level Set Method を適用した場合、輪郭の変形を制御する従来の成長速度の定式化では対象領域の抽出精度が低いため、Level Set Method の医療画像分野への実応用には抽出精度向上が課題であった。

本論文では、Level Set Method の高速化手法として、Level Set Method の計算に不可欠な最近傍曲面探索を高速に実現する Fast Narrow Band と、その応用例として CT 画像を用いた肝癌に対する病変候補位置の自動検出手法を提案している。

Fast Narrow Band は、Level Set Method の計算において最近傍曲面を探索する際、曲面からの距離情報を備えた距離マップを利用し、探索が必要な曲面点を限定する。これにより効率的な最近傍曲面点の探索処理を実現し、曲面形状進化を大幅に高速化している。また、FNB を用いた曲面形状進化は、処理が高速であるにもかかわらず、従来手法である Narrow Band に対して原理上、精度の低下がないことを指摘している。

本論文は 5 章から構成される。第 1 章は序論である。第 2 章では、Level Set Method と Level Set Method を用いた動的輪郭モデルに関する関連研究について述べている。第 3 章では、Level Set Method の高速化手法として FNB を提案している。また距離画像を用いた 3 次元物体幾何モデリングに適用し、解像度を変化させながら曲面形状進化をすることで、より高速な曲面再構成を実現する手法を提案している。複数物体からなるシーンや複雑な位相を有する物体の距離画像に提案手法を適用し、実験により提案手法の性能を確認している。第 4 章では、医療画像分野への応用として、CT 画像に対する肝癌の自動検出手法を提案している。提案手法は動脈相を用いた腫瘍の自動検出法であり、低コントラスト画像や雑音に対しても頑健に腫瘍を検出する新たな成長速度の設定法を示している。提案手法は、様々な形状、サイズの腫瘍が検出可能であり、また腫瘍個数の事前知識が不要である。提案手法の有効性を確認するため、実際の患者の匿名化 CT 画像に提案手法を適用して肝臓腫瘍の検出実験を行い、従来の Level Set Method に比べて検出精度が向上することを確認している。第 5 章では、結論として本論文で得られた結果を統括し、今後の課題を述べている。

論文調査の要旨

カメラや CT、MR などから得られる画像情報や、レーザレンジファインダやステレオカメラなどを用いて得られる距離画像情報から、注目すべき領域を切り出すセグメンテーション手法として、これまでに画像上で輪郭線の形状を動的に変化させる動的輪郭モデルが提案されている。この動的輪郭モデルの代表的な手法として、注目領域への適合度や輪郭線の曲率により定義されたエネルギー関数を最小化することで、頑健に注目領域を抽出する Snakes がある。しかし Snakes を含む従来の動的輪郭モデルでは、対象領域の分離、結合など位相変化への対応が困難であることが問題とされていた。これに対し、位相変化に対応可能な動的輪郭モデルとして Osher, Sethian により Level Set Method が提案され、医療画像処理や距離画像を用いた 3 次元幾何モデリング、カメラ画像内の移動体検出、追跡などで利用されている。しかし、Level Set Method は多くの計算量が必要であり、実応用には計算量の削減による処理の高速化が課題であった。さらに、CT 画像に対する腫瘍領域の自動抽出に Level Set Method を適用した場合、輪郭の変形を制御する従来の成長速度の定式化では腫瘍領域の抽出精度が低く、腫瘍自動抽出の実応用には抽出精度の向上が課題であった。

本論文では、Level Set Method の高速化手法として、Level Set Method の計算に不可欠な最近傍曲面の探索処理を高速に実現する Fast Narrow Band と、その応用例として CT 画像を用いた肝癌に対する病変位置の自動検出手法を提案しており、以下の点で評価できる。

第一に、Level Set Method で最も処理コストの高い最近傍曲面の探索処理において、曲面からの距離情報を保持した距離マップを利用し、探索が必要な曲面点を限定することで、効率的な最近傍曲面点の探索処理を実現する Fast Narrow Band を提案している点である。また、Fast Narrow Band を用いた領域抽出は、処理が高速であるにもかかわらず、従来手法である Narrow Band に対して原理上、精度の低下がないことを示した。

第二に、距離画像を用いた 3 次元物体幾何モデリングに Fast Narrow Band を適用し、さらに解像度を変化させながら Level Set Method を繰り返し適用することで、より高速に領域を抽出する手法を提案している点である。複数物体からなるシーンや複雑な位相を有する物体の領域抽出にこの手法を適用し、Fast Narrow Band の処理時間は Narrow Band に比べて 11%、解像度を変化させた場合は 2.4% にそれぞれ減少することを確認した。

第三に、Fast Narrow Band を医療画像分野へ適用し、CT 画像に対する肝癌の自動検出手法を提案している点である。これは、動脈相を用いた腫瘍の自動検出法であり、腫瘍個数の事前知識が不要で、また様々な形状、サイズの腫瘍が検出可能である。さらに領域の局所特徴を用いた新た

な成長速度の設定法を提案しており、低コントラスト画像や雑音を含む画像に対しても頑健に腫瘍を検出することができる。この有効性を確認するため、24 症例の匿名化 CT 画像にこの手法を適用して肝臓腫瘍の検出実験を行った。その結果、33 個の腫瘍に対し、従来手法である Chan-Vese 法での検出率が 57.6%、誤検出が 1 症例当り 4.0 個に対して、この手法では検出率 97%、誤検出 3.1 個となり、検出精度が向上することを確認した。

以上要するに、本研究は、位相変化の可能な動的輪郭モデルである Level Set Method の高速な実現手法と、その応用例として CT 画像を用いた肝臓に対する病変位置の自動検出手法を提案したものであり、情報知能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 Othman M. M. Othman
 学位記番号 シ情 博甲第 522 号（工学）
 学位授与の日付 平成 26 年 3 月 25 日
 学位論文題名 Research on Future Internet and Contents Delivery
 （新世代インターネットと情報流通に関する研究）

論文調査委員

（主 査）九州大学 教授 岡村 耕二
 （副 査） ” ” 青柳 睦
 ” ” 准教授 天野 浩文

論文内容の要旨

Software Defined Networking (SDN) is an emerging topic that attracts attention due to its paradigm, that splits the control plane from data forwarding plane. According to which, the control plane is realized as the network operating system, which is responsible for controlling maintaining the state of the whole network. And the data plane is realized as the network equipment or devices that carry out instructions from the control plane and forwards the data packets. Where, SDN have defined OpenFlow as “key enabler for software-defined networks and currently is the only standardized SDN protocol that allows direct manipulation of the forwarding plane of network devices”.

OpenFlow was first introduced in 2008, as a part of Stanford University’s clean slate project. OpenFlow provides a specially designed way to control flows on the network equipment by the OpenFlow controller (control plane) through using the OpenFlow Protocol, and splits that form the data plane (network equipment). According to OpenFlow; decision making can be done and modified freely by the

OpenFlow controller according to layer 2,3, VLAN, and layer 4 headers while the forwarding is still done by routers or switches, in addition to, their original functionality. Moreover, OpenFlow defines actions to be performed on flows that can be either collection of statistics or usage data, forwarding packets, dropping packets, or manipulating packet’s headers.

Thanks to the flexibility provided by OpenFlow and SDN, many researchers embarked on providing new smart applications like; a virtualized network infrastructure, detection of DDoS attacks, measurement-aware routing, supporting QoS, run-time programming for network to support big data applications, and many others. It is believed that large number of new applications will be proposed to enhance the operation of current technologies and to provide even new applications.

At the beginning of the Internet, it served the role of delivering contents using the simple client server model. But as time passes number of users grew fast. As shown by studies in AKARI project; that the traffic size increases by factor of 1.7 every year. Thus, causing the content serves to overload. Many efforts were put to solve the server overloading problem; among them the concept of Content Delivery Network (CDN), which was introduced to provide high availability of the contents, and solve the previously mentioned problem by supporting multiple replica servers to serve the same contents. And to enable the CDN many technologies were introduced like, the concept of using DNS resolutions to point to different replica content servers, other way was to use routing based method as in the anycasting to deliver traffic to different replica servers, other way was to construct an overlay delivery network as in the P2P networks to help the server in providing service. However, each of those technologies had some advantages and disadvantages, for example; overlay solutions induced an increase in inter-network connections, because it lacked knowledge of the undelaying network. While, the DNS and routing based solutions lacked the ability to rapidly change the server information due to their stability constraints and delays.

And thus, this study approaches the server overloading problem using SDN, since it provides more flexibility, and deeper ability to control and manipulate traffic. In this study, Content Anycasting is proposed to be built on SDN, to achieve; traffic locality and thus reducing inter-network connections, fine granularity for more accurate redirection, rapid updating to cope demands of some applications, while protecting vital network topology information, and enable a server driven CDN for a more server friendly service.

Our simulation shows that using content anycasting with

only a single content server; load can be reduced to 20% (in case that each client is capable of serving 4 other clients) which is the same load using 5 replica content servers in case of using the regular Anycast. Which means that according to the simulation content anycasting is capable of achieving the same load on content server as the regular anycasting while reducing the number of servers by 80%. Moreover content anycasting showed that it is capable of reducing the average hop count needed prior getting the content by 74% (in the case studied in this simulation), because it makes use of the network to redirect packets and so helps to redirect requests to a peer/server within the same network rather than randomly choosing peers regardless of their location. Also, content anycasting showed it can be used to take the process of querying about peers/servers one step ahead by pre installing redirections on the network rather than having the server to reply to all of the queries. And thus it improves the availability of the server in many cases and especially in case of flash crowds.

However, the split of control and data planes comes with some cost. For example, there is a probability that the controller would be a source of bottle neck in the whole system. This can be confirmed by, Michael Jarschel et al. who concluded in his study titled “Modelling and performance evaluation of an OpenFlow architecture” that “When using OpenFlow in high speed networks with 10 Gbps links, today’s controller implementations are not able to handle the huge number of new flows.”. Moreover, the controller might be assigned more tasks if it has to debug or check to protect the network against malicious flow installations. Also, the controller can be under more burdens if the network has to support some service that produces a huge number of flows like P2PTV or content anycasting. For example, some statistics showed that PPTV – a popular P2PTV application – have 34 million unique daily visitors. Knowing the flow table size on the network equipment (router/switch) is also a limited resource.

We considering the case that the controller is under load to install and maintain huge number of flows; moreover, some of the network equipment are also overloaded (having low space in their flow table). To tackle the problem mentioned previously, this study proposed a hybrid control model that incorporates both centralized and distributed control plane. Where it is intend to keep the main control role to be played by the centralized controller, and provide some distributed control as an aid for the centralized one. This is done by proposing two features of SDN; aiming tackle problem in a different manner by enhancing the behaviour of some flows

and by providing an enhanced control model for SDN. This results in giving SDN more flexibility and more diverse control methods. Those features will help to relieve some load off the controller; also will help to make SDN self-aware and able to react when under heavy loads. Those two features are: Network equipment to equipment flow installation, and a new type of flows that are the proactive flows. Also, this study shows the proposed design of the required methods to secure the proposed distributed behaviour of the hybrid control plane. In order to assess the efficiency of the proposed control model, simulation of a network with some overloaded equipment is implemented, under the assumption that the controller is also overloaded and cannot do any further processing or relocation of the flows to be installed, and thus continuously sends new flows to be installed into network equipment. According to the simulation the proposed hybrid control model was able to limit the growth of the flow table size of the overloaded equipment to, while in case of the original design, the table size of the network equipment kept on growing.

論文調査の要旨

現在のネットワークの研究には、インターネットが構造的に持つ経路制御や移動体通信の課題を根本的に改善する新世代ネットワークという研究分野がある。その中で、通信識別子の情報をネットワークに広告することを基本とする現在のインターネットで用いられている経路制御に対して、集中管理された通信機器でパケット中の通信識別子に基づいて通信制御が行われる SDN (Software Defined Network) に関する研究が注目されている。SDN の実用化のためには、具体的な通信応用への適用とその課題を解決する新しい技術の研究開発が必要である。本論文は、現在のインターネットにおいて重要な通信応用の一つである情報流通に着目し、SDN を用いた効率的な情報流通の実現、SDN 制御の負荷分散や認証に関する研究を行ったもので、以下の点で評価できる。

第一は、ネットワーク上で高速かつ低遅延である効率的な情報流通を行うために必要となる複数の要件の性能向上を同時に実現するためにコンテンツ識別子を新たに提案し、TCP 通信方式を拡張して OpenFlow でコンテンツ Anycast 通信方式の実現を行ったことである。シミュレーションによって、本論文が提案するコンテンツ Anycast 通信方式が、従来のインターネット上での P2P や、IP Anycast による通信方式と比べて、局所的な通信の高速化、コンテンツ群のより細かい粒度設定、コンテンツの高速更新、ネットワークの状況の反映の高速化といった情報流通を行うために必要となる要件において、いずれも優れていることを示す結果が得られている。

第二は、集中型である SDN の制御処理からフロー処理を、通信性能と耐故障性を損なわずに通信機器に分散する分散型 SDN 制御方式を提案したことである。本論文では分散型 SDN 制御方式のために、新たにフロー情報の集約方式、先読みフロー処理方式を開発している。さらにシミュレーションによって、フロー処理が通信機器に分散された状況で、従来の集中型の SDN と同等な通信性能が得られ、分散された機能の一部に障害が発生しても通信に影響を及ぼさないことが示されている。

第三は、分散型 SDN 制御処理方式への高速な認証処理方式を考案したことである。本論文では、集中処理を分散処理で行うことによって発生する情報改竄等への対策のために、分散型 SDN の制御処理の通信を高速に認証できる方式を開発している。本論文の認証処理に要する処理時間はベンチマークを用いて評価を行い、そのオーバーヘッドが通信性能に影響を及ぼさないことを示している。

以上要するに本論文は、新世代ネットワークである SDN において、効率的な情報流通を提供するコンテンツ Anycast 通信方式、SDN 制御の集中処理を分散する分散型 SDN 制御方式および分散制御処理における高速な認証方式の研究開発を行い、それらの有用性の評価により、新世代ネットワークにおける情報流通に関して論じたものであり、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 吉永 諭史
 学位記番号 シ情 博甲第 523 号 (工学)
 学位授与の日付 平成 26 年 3 月 25 日
 学位論文題名 Background Modeling for Object
 Detection in Complex Situations
 (複雑環境下における物体検出のための
 背景モデリング)

論文調査委員
 (主 査) 九州大学 教授 谷口 倫一郎
 (副 査) " " 倉爪 亮
 " " 准教授 長原 一

論文内容の要旨

映像中に出現する歩行者や車両等の前景物体を検出する画像処理技術(以下、物体検出)が、セキュリティシステムや交通量解析などへの応用に向けて盛んに研究されている。なかでも、観測画像と背景画像の差分から前景物体を検出する背景差分法は、前景物体に関する事前知識を必要としないため物体検出によく利用されている。しかし、映像中では前景物体以外にも、照明変動や木々の揺れといった動的変動をはじめとした様々な背景変動が観測されるため、前景物体のみを頑健に検出することは容易ではな

い。また、物体検出を行う環境によっては前景物体の立ち止りも観測される。このような環境下では、停止中の前景物体(以下、静止物体)を検出し続けると同時に、静止物体とそれらの前を通過する前景物体を区別する必要もある。さらに、静止物体が移動を再開する際には、静止物体によってそれまで遮蔽されていた領域についても正しく背景と認識する必要がある。本研究では、これらの問題を解決するため、「時空間特徴を考慮した新たな背景モデル」および「背景モデルを階層的に保持する枠組み」を提案することによって、背景変動ならびに静止物体の出現・消失が観測される複雑環境下において正確な物体検出を実現するための研究成果について述べたものである。

本論文は 6 章から構成されており、第 1 章では研究の背景と目的について述べている。

第 2 章では、物体検出の関連研究を整理し、本研究で取り組むべき課題を明らかにしている。

第 3 章では、照明変動や動的変動をはじめとした様々な背景変動に対し頑健に物体検出を行うため、時空間特徴を考慮した背景モデルを提案している。照明変動は近傍に存在する画素に対し同様の輝度値変化を引き起こすという空間的性質を持っており、動的変動は同様の変化を繰り返し引き起こすという時間的性質を持っている。そこで、空間的に近接する画素同士の輝度値差を局所特徴とし、それを統計的にモデル化した Statistical Local Difference Pattern (SLDP) と呼ぶ時空間特徴を提案している。SLDP では、局所特徴を利用することで空間的性質を持つ照明変動の影響を吸収することができ、さらに統計情報を利用することで動的変動の時間的性質もモデル化することができる。SLDP に基づく背景モデルを用いることで、従来提案されてきた背景モデルよりも照明変動および動的変動に対し頑健に対応できることを実験的に示している。

第 4 章では、近傍画素で観測される輝度値変化の類似性まで考慮することで、Spatio-temporal Similarity of Intensity Changes (StSIC) と呼ぶ新たな時空間特徴を提案している。具体的には、輝度値変化の類似性に基づき画素をクラスタリングし、各クラスタにおいて照明変動に頑健な特徴を領域レベルで統計的にモデル化している。これにより StSIC は、従来は考慮されてこなかった動的背景変動の空間的性質、つまり近傍画素で観測される動的変動の影響までも考慮することができるため、様々な背景変動に対しより頑健に対応することが可能となる。実験では、背景モデルの性能評価のために提供されている BMC データベースを用いて背景変動に対する頑健性を評価し、StSIC に基づく背景モデルが SLDP および従来の背景モデルよりも頑健に様々な背景変動に対応できることを示している。

第 5 章では、前景物体の立ち止りおよび立ち去りに伴い観測される静止物体の出現・消失に対応するため、新たに階層型背景モデリングの枠組みを提案している。具体的に

は、観測シーンを単一の背景モデルを用いてモデル化する代わりに、静止物体毎に背景モデルを定義しそれらを階層的に保持することで観測シーンをモデル化している。これにより、階層型背景モデルでは、背景変動や静止物体が観測シーンに及ぼす影響および静止物体に遮蔽された背景情報を同時にモデル化することが可能になる。バス停や交差点といった複雑環境を観測した映像を用いて性能評価を行い、StSIC を基本背景モデルとして利用した階層型背景モデルでは、従来手法では不可能であった静止物体の出現・消失への対応および静止物体とその前を通過する前景物体の区別が可能であることを実験的に示している。

第 6 章では結論として本論文で得られた結果を総括している。

論文調査の要旨

映像中に出現する歩行者や車両等の前景物体を検出する画像処理技術（以下、物体検出）は、セキュリティシステムや交通量解析など様々な応用に利用される基本的な技術である。なかでも、観測画像と背景画像の違いから前景物体を検出する背景差分に基づく方法は、前景物体に関する事前知識をほとんど必要としない物体検出手法としてよく利用されている。しかし、映像中には前景物体以外にも、木々や水面の揺れといった動的変動や照明変動など様々な変化が含まれるため、前景物体のみを正確に検出するためには、適切な背景モデルを入力映像から学習し、それに基づいて前景物体を検出する必要がある。また、前景物体が停止した場合には停止した前景物体を背景として学習しないようにする必要があり、更に、停止した前景物体の前を通過する物体を新たな物体として検出する必要がある。本論文は、これらの問題を解決するため、時空間特徴を考慮した新たな背景モデルおよび物体の立ち止まりや立ち去りに対応可能な階層的背景モデルを開発したものであり、以下の点で評価できる。

第一に、照明変動および動的変動に対して頑健に対応するため、Statistical Local Difference Pattern (SLDP) と呼ぶ時空間局所特徴に基づく背景モデルを考案した点である。照明変動は輝度値を急激に変化させる一方で隣接した画素同士には似たような変化を与えるという空間的特性を持っている。また、動的変動は同様の変化を繰り返し引き起こすという時間的特性を持っている。そこで SLDP では、照明変動の空間的影響を吸収するための局所特徴を定義し、それを統計的にモデル化することで動的変動も時空間的特性も表現できるようにしている。実験では、物体検出の性能評価に用いられる BMC データベースを用いて背景変動に対する頑健性を評価した。実験の結果、SLDP を用いることで、従来提案されてきた統計的背景モデルよりも照明変動および動的変動に対し F 値で最大約 14 ポイントの性能向上（従来手法の F 値約 66%）が見られることを

示している。

第二は、Spatio-temporal Similarity of Intensity Changes (StSIC) と呼ぶ画素値の変化傾向の類似性に基づいた背景モデルを考案した点である。具体的には、輝度値変化の類似性に基づき画素をクラスタリングし、各クラスタにおいて輝度値変化の傾向が同じ画素群は背景、異なる画素は前景と判断するような特徴を定めている。BMC データベースを用いて物体検出の性能を評価したところ、F 値で前述の SLDP に比べて最大約 5 ポイント、他の従来手法よりも最大約 20 ポイントの性能向上が見られることを示している。

第三に、前景物体の立ち止まりおよび立ち去りに対応するため、階層型背景モデリングの枠組みを考案した点である。具体的には、観測シーンを単一の背景モデルでモデル化する代わりに、静止物体毎に背景モデルを定義しそれらの集合により観測シーンをモデル化することで、各静止物体の見えの変化および静止物体に遮蔽された領域の背景の両方をモデル化することを可能にしている。実験では、前述の StSIC に階層型背景モデリングの枠組みを導入し、バス停や交差点といった停止物体が頻繁に出現する複雑環境を観測した映像を用いて性能評価を行った。実験の結果から、従来の背景モデリングに基づく手法では難しかった物体の立ち止まりや立ち去りが正しく識別可能になったことを示している。

以上要するに、本研究は、複雑な環境下で前景物体を正確に検出するために、新たな時空間特徴を考案するとともに、階層的な背景モデル構築手法を提案し、実験を通してその有効性を示したものであり、情報知能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 喜多 純一
 学位記番号 シ情 博甲第 524 号（工学）
 学位授与の日付 平成 26 年 3 月 25 日
 学位論文題名 官能評価をサポートするにおい識別装置の開発に関する研究

論文調査委員

（主 査） 九州大学 教授 都甲 潔
 （副 査） " " 林 健司
 " " " 松井 利郎

論文内容の要旨

快適な生活環境の創造、また、おいしくて安全な食品の提供に際し（価格を抑えながらも作り出すために）、五感で得ている感性特性を官能評価に頼らず、装置で定量化したいという要求は年々高まってきている。しかし、五感の中でも嗅覚と味覚についてはヒトのメカニズムの複雑さ、

特に嗅覚については、その指標・尺度すらも、一般的化されていないのが現状であった。

そのような中で、においの定量化については、におい成分の定量化がクロマト分析を初めとするにおいガス分析により発展をしてきており、一定の成果は得られているものの、嗅覚で感じているにおいの強さおよびにおいの質の表現と、成分分析で求めたにおい成分種とその濃度（量）との間にはまだ隔たりがあるのが現状である。この隔たりは、嗅覚のにおいレセプタの感度がにおい物質ごとに大きく異なるということと、嗅覚はそれぞれ成分に分けて検出するのではなく、成分の集合体としてにおいを検知しているためである。

そのため、においをその強さと質で表現ができ、成分に分けずにおいを成分の集合体として捉えることができるにおい識別装置が、1995年ごろからヨーロッパを中心に研究開発され、一部市販品が発売されているものの、まだ大きく普及するには至っていない。普及しない要因としては、感度不足、センサの非線形問題、得られた結果の表現力不足という3つの問題が挙げられると考えている。

本研究では、その3つの問題に対し、とりわけセンサの非線形問題について、その解決の糸口を得ることを目的とした。本論文は5章から構成されている。

第2章では、従来、におい識別装置用のにおいセンサ素子として利用されてきたいくつかのセンサ方式を、その原理をもとに説明し、その中から今回なぜ酸化物半導体センサを選定したかについて説明している。また今回利用したにおい識別装置の原理と付加した濃縮、脱水機能についてその内容と動作を説明している。

第3章では、におい識別装置で従来使われていた、主成分分析やクラスター分析など一般的な多変量解析を、酸化物半導体センサから得られた出力の解析に用いた場合に起こりえるいくつかの問題点を、事例を挙げて説明している。これらの問題点を解決できる解析方法として絶対値表現解析を提案している。本方法は、従来相対値しか求まらなかったにおい識別装置の結果を絶対値が求まるように、予め準備した基準臭の検量線をもとにおいの強さや近さ度合いを示す解析方法であり、本章ではその内容を説明し、それらの解析方法を使った応用例をもとにその妥当性を検証している。

第4章では、酸化物半導体センサの濃度に対する出力が非線形となる問題について、その克服方法と、さらに再現性のよいデータを得るために、10個のセンサ出力を要素とするベクトルの長さを一定に調節する方法と、その期待される効果を説明した。さらに、このベクトル長をどの測定についても一定に調節する機能を利用することにより、におい質の変化方向について校正が可能である、偏位臭マップ法を提案している。この偏位臭マップとは、中心となるにおいを設定し、そのにおいから偏差したにおいを1軸も

しくは2軸設定し、その偏位した軸をもとにおいマップを描く方法であり、その原理と実際の応用例を説明している。

また、ベクトル長を合わせて測定することにより、どれだけ再現性を向上させることができたかを調べるために、ベクトル長を合わせた場合と、合わせなかった場合について複数回測定したときのデータのばらつきを調べ、ベクトル長についてフィードバックをかけて調節することの妥当性を確認した。

第5章では、第1章から第4章までの研究により得られた成果を総括するとともに、今後の課題と展望について述べた。今後残った課題である、におい成分間の相乗、相殺効果についても、工夫は必要だが、成分に分けず測定する方法であれば、相乗、相殺効果であっても全成分がどのようにヒトの嗅覚レセプタに作用しているかを慎重に追及していくことにより、それらを測定できる可能性があることを記載している。

論文調査の要旨

快適な生活環境の創造、また、おいしくて安全な食品を価格を抑えながらも作り出すために、五感で得ている感性について官能評価に頼らず、装置により定量化したいという要求は年々高まってきているが、五感の中でも嗅覚と味覚は、その発達が遅れていた。その理由は、そもそも嗅覚と味覚についてはヒトがどのように検知しているかについて、そのメカニズムの解明が遅れるほど複雑であったことと、嗅覚については、その指標・尺度すらも、一般的なものがなかったためである。

そのような中、においの定量化のうち、におい成分の定量化については、ガスクロマトグラフィ分析を初めとするにおいガス分析により発展してきており、一定の成果は得られている。しかし、嗅覚で感じているにおいの強さおよびにおいの質の表現と、成分分析で求めたにおい成分種とその濃度（量）との間には隔たりがある。この隔たりは、嗅覚のにおいレセプタの感度がにおい物質ごとに大きく異なるということと、嗅覚ではそれぞれ成分に分けて検出するのではなく、成分の集合体としてにおいを検知しているためである。

このような隔たりがなく、においをその強さと質で表現ができ、成分に分けずにおいを成分の集合体として捉えることができるにおい識別装置が、1995年ごろからヨーロッパを中心に研究開発され、一部市販品が発売されているものの、まだ大きく普及するには至っていない。その要因としては、感度不足、センサの非線形問題、得られた結果の表現力不足という3つの問題が挙げられる。

本研究では、その3つの問題に対し、その解決を図ることを目的とした。

従来、におい識別装置用のにおいセンサ素子として利用

されてきたいくつかのセンサ方式を原理をもとに説明し、その中から今回なぜ酸化半導体センサを選定したかについて説明した。また今回開発したにおい識別装置の原理と付加した濃縮、脱水機能についてのその内容と動作を説明した。次に、におい識別装置で従来使われてきた主成分分析やクラスター分析など一般的な多変量解析を、酸化半導体センサから得られた出力に適用した場合に起こりえる、いくつかの問題点を事例を挙げて説明し、これらの問題点を解決できる解析方法として絶対値表現解析と名づけた解析方法について、その内容を説明し、それらを使った応用例をもとに妥当性の検証も行った。

さらに、酸化半導体センサの出力が濃度に対して非線形となる問題について、その克服方法と、より再現性のよいデータを得るために、10 個のセンサ出力を要素とするベクトルの長さを一定に調節する方法と、その期待される効果を説明した。このベクトル長をどの測定についても一定に調節する機能を利用することにより、においの質の変化方向について校正を可能とする偏位臭マップ法と名づけた方法の原理と、実際の応用例を説明した。

また、ベクトル長を合わせて測定することにより、どれだけ再現性が向上できたかを調べる目的で、ベクトル長を合わせた場合と、合わせなかった場合についてデータのばらつきを調べ、フィードバックをかけてベクトル長を調節することの妥当性を確認した。

最後に、今後の課題と展望について、においの間の相乗・相殺効果についても、工夫は必要だが、化学成分に分けずに測定し、全成分がどのようにヒトの嗅覚に作用しているかを詳細に追及することにより、それらが測定できる可能性が見出せることについてコメントしている。

以上要するに、本論文は、官能評価をサポートするにおい識別装置を実現するため、従来からの問題であった感度不足、センサの非線形問題、得られた結果の表現力不足の解決を図り、新たな解析手法を提案し、装置を開発することで、におい計測の数多くの応用を可能としており、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）の学位に値するものと認める。

論文内容の要旨

匂いは、生物が外界の化学情報を認識し、その生命活動を維持するための重要な感覚量であり、また、人間にとって癒しや不快感など数多くの感情を誘起させたり、心身の健康や病気に影響を与える媒体である。また、化粧品業界ではアロマセラピーや香りの効果が商品開発に利用されている。このように、現在では、匂いを扱ったビジネスが一つの産業として成立するようになり、匂いが人間社会に与える影響は大きくなっている。これまで、温度センサといった五感の代用となるセンサによる計測技術が人間の生活の質や科学技術を大幅に発展させてきた。そのため、匂いを検知することで安心安全を守るセンサの実現が待ち望まれ、膨大な匂い情報を応答パターンとして抽出することができる匂いセンサを開発することは、社会的にも、工学的にも大きな意義がある。

匂いを測定・モニタリングすることは、健康や食事をはじめとした日常生活だけでなく、工業系・科学捜査など社会を支える基盤として重要な位置を占めることになる。そのため、それを可能にする匂いセンサを開発できれば、化学物質が関係する広範な分野への応用に加えて、新たな事業や分野をも創出することができ、社会に大きく貢献することになる。匂いセンサには、匂いの性質の感覚表現や包括的検知といった生物の嗅覚に匹敵する高度な性能が求められる。そこで、嗅覚のバイオモデルに基づく匂いセンサの開発を本研究の目的とした。

生物が持つ鼻の感度や選択性は非常に高く、その性能に及ぶセンサデバイスは実現できていない。生物は匂いを嗅ぐと、匂い受容体の持つ分子認識能によって、感性を引き起こす必要十分な基本情報となる匂いコードが抽出され、この情報を基に「匂いマップ」と呼ばれる脳内情報が生成される。そのため、生物は匂いマップを基に匂いを認識・識別していると考えられることができる。近年、匂いマップの研究が進む中、匂いマップを複数のクラスターに分類する「匂いクラスタリング」という概念が提案された。生物はクラスタリングにより、膨大な匂い情報を匂いの識別のために圧縮している。このように生物の嗅覚は匂い受容体による高度な分子認識能に加え、匂いクラスタリングという情報圧縮手法によって、高度な匂い測定を行っている。

そこで本研究は、高度な匂い測定を実現するため、嗅覚バイオモデルに基づいた、高度な分子認識能を持ち、匂いクラスタリングを反映する匂いセンサの開発を行った。本研究により、匂いの包括的検知や膨大な種類の匂い物質の適切な分類を実現できる。具体的には、生物が匂いを認識・識別する決定要因を満たし、匂い物質の分子的特徴により分類できる測定装置の作製と高度な分子認識部の開発を行った。最後に、得られたセンサ応答から嗅球で作成されるものに近い人工の匂いマップ画像の作成を実施した。本論文は以上の研究についてまとめたものであり、5

氏 名 今橋 理宏
 学位記番号 シ情 博甲第 525 号 (工学)
 学位授与の日付 平成 26 年 3 月 25 日
 学位論文題名 分子認識ナノフィルタを用いた匂いクラスタリングシステムに関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 林 健司
 (副 査) " 主幹教授 都甲 潔
 " " 教授 富浦 洋一

章から成る。

第 2 章では、分子認識部と検知部を完全に分離することで、感度や拡張性を向上させたセンサシステムの設計・開発を行っている。まず、分離吸着剤により匂いを選択的に濃縮させた後、加熱により脱着させ、金属酸化物半導体ガスセンサで検知する匂い分離測定装置を作製した。実際に、モレキュラーシーブとガスクロマトグラフィのカラム用吸着剤を装置に導入し、クラスターに属する 9 種類の匂い物質を測定した結果、相関係数 0.8 以上の高い相関で、サイズと極性という分子パラメータを推定できた。ゆえに、吸着剤を選択することで、匂い物質の分子構造(分子パラメータ)が測定可能となった。最後に、これらのパラメータを基に実験的な匂いマップの作成に成功した。

第 3 章では、匂いクラスターの定義をために、生理学的研究で作成されたラットの匂いマップ画像をパターン解析している。匂いマップ画像を主成分分析することで、匂いマップの幾何学的特徴を基にした匂いクラスターの基本パターンを定義した。また、物理化学的に計測可能な分子パラメータの中から、分子サイズの他に、分配係数、酸解離定数、Number of rotatable bonds というクラスターに対応するキーパラメータの探索に成功した。これにより、センサ技術を用いて分子パラメータを測定することで、匂いクラスタリングを実施できることを明らかにした。

第 4 章では、特定の分子構造に特異性を示すセンサシステムを構築するために、分子鋳型法を利用して分子認識ナノフィルタと高度な分子ふるい能力を持つ吸着剤の開発を行っている。結果として、表面ゾルゲル過程により 10nm ほどのポリマー層と TiO₂ の単分子層を基板の上に堆積した。また、脂肪酸・アルデヒド・ケトン類に相補的な認識サイトを持つ分子認識ナノフィルタを PDMS (Polydimethylsiloxane) 上に修飾した MIFA (Molecularly imprinted filtering adsorbent)を開発した。MIFA には分子認識能力・濃縮効果に加え、可塑性と拡張性も有していることが SPME/GC-MS (固相マイクロ抽出/ガスクロマトグラフィ-質量分析)による吸着測定などで確認された。これにより、MIFA の表面特性を自由に再構築することが可能で、テーラーメイドかつ測定対象物質に合わせた最適化なフィルタを形成可能であることが明らかになった。

第 5 章では、MIFA を匂い分離測定装置に搭載した匂いクラスタリングシステムの開発を行っている。本システムは、匂い分離測定装置のセンシングセルの流路体積と流量を最小化することで、吸着応答に関して、3 倍以上の感度向上結果が得られた。また、匂いクラスタリングシステムを用いて、1ppm ほどの測定ガスから特定の匂い物質を検知し、嗅覚メカニズムに合った混合臭の応答パターンを出力することに成功した。最後に、得られた応答値を基に、人工の匂いマップを作成し、これらが生物の内部表現に近いことも確認された。

第 6 章では、本研究の総括を行っている。生物の匂い受容機構に基づいた匂いクラスタリングシステムの開発により、匂いの包括的な検知や匂い物質の適切な分類が可能となる今後の展望を示した。

論文調査の要旨

匂いは、生物が外界の化学情報を認識し、その生命活動を維持するための重要な感覚量であり、匂いが人間社会に与える影響は近年、大きくなっている。これまで、五感の代用となるセンサによる計測技術が人間の生活の質や科学技術を大きく発展させており、匂いについても安心や安全を守る事につながるセンサの実現が待ち望まれている。匂いの計測においては膨大な匂い分子に関する情報を抽出し、匂いを測定・モニタリングするセンサが実現できれば、日常生活に関係する食品や環境の計測・管理だけでなく、化学物質に関係する広範な工学分野、さらに医療検査や科学捜査など社会を支える基盤技術として大きく貢献できる。

本論文は、匂い受容機構に基づいた嗅覚バイオモデルを構築し、このモデルに基づいた匂いセンサシステムの開発を目的としている。生物の嗅覚では、匂い受容体の持つ分子認識能によって、感性を引き起こすための基本情報となる匂いコードが抽出され、この情報を基に匂い物質群をその特性によりクラスタリングした「匂いマップ」と呼ばれる脳内情報が生成される。生物が匂いを認識・識別する基本情報である匂いマップの決定要因を明確化した嗅覚バイオモデルに基づき、匂いマップにより匂いを定量化する技術として、匂い物質をその分子的特徴により分類できる測定装置の作製と分子認識材料の開発を行っている。開発されたセンサシステムから得られた匂い物質応答により、脳の嗅球で作成されるものに近い人工の匂いマップが再現できることを実証しており、以下の点で評価できる。

第一に、匂いマップを分類する匂いクラスターを定義するために、生理学的研究で作成されたラットの匂いマップ画像を主成分分析により解析し、匂いマップの幾何学的特徴を基にした匂いクラスターの基本パターンを定義している。また、物理化学的に計測可能な分子パラメータの中から、分子サイズの他に、分配係数、酸解離定数、疎水性パラメータ、回転可能結合数などのクラスターに対応する分子のキーパラメータの探索に成功し、分子パラメータをセンサ技術によって測定することで、匂いクラスタリングを実現できることを明らかにしている。

第二に、特定の分子構造に特異性を持たせる分子鋳型法を利用した分子認識ナノフィルタにより、分子ふるい能力を持つ吸着剤の開発に成功している。具体的には、表面ゾルゲル過程により 10nm 程度のポリマー層と酸化チタン単分子層を基板の上に堆積し、脂肪酸・アルデヒド・ケトン類に相補的な認識サイトを持つ分子認識ナノフィルタを

PDMS (poly dimethylsiloxane) 上に修飾することで, MIFA (molecularly imprinted filtering adsorbent) を実現している. また, MIFA が分子認識能力・濃縮効果に加え, 可塑性と拡張性も有していることを SPME/GC-MS (固相マイクロ抽出/ガスクロマトグラフィー-質量分析) による吸着測定などで確認し, 再構築が可能な分子ふるい特性により, 測定対象物質に合わせた最適なフィルタを形成可能であることを実証している.

第三に, MIFA を搭載した匂い分離測定装置を開発し, 匂いクラスタリングシステムの開発を行っている. 開発された装置は分子認識部と検知部を分離し, MIFA により匂いを選択的に分離・濃縮・脱着させ, 金属酸化物半導体ガスセンサで検知する. 匂い分離測定装置のセンシングセルの流路体積と流量を最適化することで, 吸着応答に関して, 従来型システムの 3 倍以上の感度向上結果を得ている. また, 匂いクラスタリングシステムを用いて, 1ppm 程度の測定ガスから特定の匂い物質の検知に成功し, 得られた応答値を基に, 人工の匂いマップを作成し, これらが生物の内部表現に近いことを確認している.

以上要するに, 本研究は, 匂いセンシングシステムを実現するため, 生物の脳内嗅覚情報を解析し, その基本パターンと対応する分子パラメータを明らかにし, 新たな分子認識ナノフィルタを開発するとともに, 計測される分子パラメータにより匂いマップを生成できる計測装置を試作し, その出力が生物の匂いマップと近いことを実証しており, 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) の学位に値するものと認める.

 氏 名 Dayang Azra Binti Awang Mat
 学位記番号 シ情 博甲第 526 号 (工学)
 学位授与の日付 平成 26 年 3 月 25 日
 学位論文題名 Development of Slow Wave Structures
 for Millimeter-wave CMOS Applications
 (ミリ波 CMOS 応用のための遅波構造
 の開発)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 准教授 金谷 晴一
 (副 査) " 教授 吉富 邦明
 " " " ポカレル ラメシュ

論文内容の要旨

In current wireless communication system, market demand on the high data rate services is becoming increasing. In the next few years, wireless LAN and wireless PAN data rates should be within the range of 1-10Gbps. High gain antenna (10dBi) is needed for transmitting 10mW power for 10m range according to the recommendations from Wireless

HD industry consortium. Thus, with larger offered bandwidth, higher data rate (>1Gbps), high transmit power and greater range, unlicensed 60GHz frequency band technology is preferable. Due to rapid progress and high demand, Complementary Metal Oxide Silicon (CMOS) technology is used in the millimeter-wave applications because it could offer low cost, higher digital integration thus enabling easy systems-on-chip solution.

In higher frequency design, silicon technology is the dominant material for semiconductors design market compare to GaAs process which remained very small. It comprises about 95% of the semiconductor industry compare to 5% of the arsenide market. The biggest challenges for IC designers in designing passive devices in CMOS process are higher insertion loss and lower selectivity. Lossy silicon exists due to electrical coupling that degrade the quality factor of the design. Thus, with proper coupling, this problem could be solved. Another challenge in this technology is due to thin silicon oxide layer and ground metal, thick metal layer results edge and fringe capacitances and voltage/current distributions is not the same. More rigorous approach is needed in designing the filter. EM simulation with simplified single homogenous substrate is applied in this design to determine the EMF for multi-layer substrate.

In this thesis, both transmission line with coplanar waveguide (CPW) structure and bandpass filters (BPFs) are designed for 60GHz applications applying CMOS 0.18 μ m technology. At millimeter-wave frequencies, CPW is preferred compared to microstrip due to lower dispersion, insensitivity to substrate thickness, easy connection to both shunt and series element and losses can be solve by adjusting the values of gap and width of the structure. Slow wave patterned ground structure is design and optimized at the ground metal, M1 of the CPW structure to exhibit the slow wave propagation effect thus enhancing the performance of CPW for higher frequency applications.

A low loss BPF with good selectivity and desired bandwidth is important in reducing the burden of power amplifier in 60GHz system. For the sake of obtaining enough power gain in this mm-waveband, numerous designers have to use complex multi-stage amplifier or even use costly special production process to design a power amplifier (PA). At the same time, the consumer market compels the manufacture to produce electric and communications products with low power and low cost. The method regarding to improve the power added efficiency (PAE) of mm-band PA becomes the focal point for RFIC engineers in recent years. In the receiver part, BPF used to

reject out-of-band interference and improve the receiver sensitivity. Therefore, research on decreasing the insertion loss of the BPF is of great importance. It is desired to have filters which could be integrated with the transceiver to reduce overall cost and form factor of the radio system. One of the biggest challenges for IC designers from integrating RF filters on CMOS is the lossy silicon substrate. Silicon substrate induced higher resistive loss which occurs due to deterioration of quality factors of resonators as the result of electrical coupling which leads to higher insertion loss of filters. In this thesis, BPFs are designed with and without split ring resonator (SRR), one of the famous elements in metamaterial structure. Slow wave propagation technique is applied in the designed filter with the patterned ground shield act as the ground metal below the filter structure. SRR is placed in the second lowest metal, M2 to increase the coupling thus enhancing the filter selectivity and bandwidth.

The thesis is organized in 6 chapters defining and explaining the research process of both CPW and BPFs for 60GHz technology. Chapter 1 is the Introduction of the thesis. It covers background of the study, motivations, design objectives and thesis outline. Chapter 2 entitled, Design theory for CMOS 60GHz mm-wave transmission line, discuss on mm-wave transmission line. Among other type of transmission lines, for example, microstrip and stripline, coplanar waveguide (CPW) is selected in this design due to several advantages mentioned in this chapter. This chapter includes subtopics of CMOS, slow wave concept, mechanisms of loss, introduction of metal shields and patterned ground in the passive components design and recent researches in 60GHz mm-wave applications. Chapter 3 is Design theory for 60GHz bandpass filters (BPFs) with split rings and methodology. 60GHz Bandpass filter (BPF) and split ring resonator (SRR) explained hypothetical of 60GHz BPF with SRR as one of famous metamaterial structures. BPF plays very important role in mm-wave applications. In this chapter, filter design methods, characteristics and tradeoffs are explained. SRR is presented in this chapter as one of the important characteristic in designing the filter. Beside, design methodology is also included in this chapter. It includes flow-chart of design procedure.

Chapter 4 is Design of low-loss 60GHz coplanar waveguide transmission line with patterned ground shield. In this chapter, CPW is design with patterned ground shield design as the ground layer of the CMOS structure. Metal strips' space and widths are first determined by using calculation and simulation method before designing the patterned structure to be applied in the CPW design. Both

measurement and simulation results are presented in this chapter.

Chapter 5 entitled, Design of 60GHz bandpass filters (BPFs) on patterned ground shield and split ring resonator (SRR). In this chapter, the author introduces the concept of SRR towards the design of the BPF in order to achieve better performance of filter. Different considerations are well explained in this chapter referring to the best way in choosing the structure of SRR to be used for higher frequency applications. Basically, BPF is constructed with open loop resonators and folded structure with pattern ground shield. Different structures and placements of SRR are designed below the BPF structure either as ground shield or increasing the numbers of SRR in order to examine the effect of the SRR toward enhancing the performance of current BPF designed. This chapter also includes measurement and simulations results of BPFs consist of two poles and fourth poles BPFs, 2 and 5-quadrilateral SRRs on BPFs, 5-quadrilateral SRRs on folded BPF, 5-conventional SRRs on BPF and BPF with CSRR as ground shield.

Last but not least, Chapter 6 is the Conclusion and future works. This chapter concludes this thesis with two main designs, the CPW and BPFs which operates at mm-wave frequency band. It is recommended that the structure of the BPF should be decrease to quarter wavelength size to solve the problem of area and also increase the performance of the filter with different structure of ground. Thus, the lossy silicon substrate is not a major issue in designing passive components for higher frequency system.

論文調査の要旨

無線通信システムにおいて、動画等、大容量データの配信を目的として、高データレートサービスの需要が高まっている。しかしながら、従来型無線 LAN システムでは、通信にマイクロ波帯を用いるので、帯域が狭いため、高いデータレートを得ることができない。一方、ミリ波帯においては、広い帯域が利用可能なため、1Gbps 以上のデータレートが簡単に実現可能である。これまで化合物半導体によるミリ波帯通信デバイスが主流であったが、最近、安価な CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) プロセスを用いたミリ波帯通信用増幅器や発振器等の能動デバイスが開発されている。

一方バンドパスフィルタ (BPF: Band Pass Filter) 等の受動デバイスを CMOS プロセスにより実現する場合、シリコン基板や薄い金属層による損失の増大が通信回路全体の特性を劣化させている。BPF 等の受動素子は、伝送線路を用いた共振回路と、伝送線路間の結合を用いて、通過周波数帯域、及び遮断特性を設計するため、伝送線路の損

失を抑えることが急務の課題である。

本論文では、上述の問題を解決するために、メタマテリアルと呼ばれる人工媒質を CMOS プロセスにより実現し、電磁界遮蔽構造や、遅波構造を持つ伝送線路を構築することで、ミリ波周波数帯で動作する低損失 BPF の開発に成功している。

本論文の成果の中で、とりわけ以下の点で評価できる。

(1) 導体層にパターンニングを施すことにより実現したメタマテリアルの一種であるパターンングランドシールド (PGS: Patterned Ground Shield) を用いた低損失伝送線路を提案し、試作・評価により、60GHz において線路長 1mm 当たりの損失を約 0.6dB まで低損失化している。本値は世界最高クラスである。

(2) 複数の開口部を有した多段スプリットリング共振器 (SRR: Split Ring Resonator) を開発し、BPF の結合係数の自由度を従来型に比べ約 2 倍大きくしている。

(3) PGS と新たに提案した SRR を組み合わせた BPF を設計し、試作及び評価の結果、測定結果は設計値とよく一致し、60GHz 帯において、比帯域約 25%、伝送損失約 2.6dB の BPF を実現している。本 BPF は他の研究論文に比べ最高クラスの低損失特性である。

以上要するに、本研究は、メタマテリアルの一種であるパターンングランドシールド、および多段スプリットリング共振器を用いて、ミリ波帯無線通信システムの実現に必要な、低損失 BPF の開発に成功したものであり、電気電子工学上価値のある業績である。よって本論文は博士 (工学) の学位に値するものと認める。

氏 名 富田 泰志
 学位記番号 シ情 博甲第 527 号 (工学)
 学位授与の日付 平成 26 年 3 月 25 日
 学位論文題名 アダプティブな系統構成と需要調整による電力系統運用の高度化に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 村田 純一
 (副 査) " " 川邊 武俊
 " " " 庄山 正仁

論文内容の要旨

電力系統の運用では、安定供給、エネルギー効率、経済性の確保を目的として、平常時、緊急時、復旧時の 3 つの局面で各種の制御を行っている。平常時には周波数制御、電圧制御、過負荷回避制御、ロス最小化系統切替制御、事故時制御系のパラメータ調整など、緊急時には事故検出、事故区間切り離し、安定化制御など、復旧時には停電区間復旧措置などである。近年、このような電力系統の運用に

影響を与える状況が拡大しつつある。すなわち、低炭素への社会的ニーズにおける、太陽光発電や風力発電などの自然エネルギーの導入拡大、また、需要家の利便性向上のニーズにおける、オール電化や電気自動車の導入拡大である。このとき、総需要や自然エネルギー電源発電量の変動拡大が周波数制御に影響を及ぼし、また、送配電系統潮流分布の変動拡大が電圧制御に影響を及ぼし、さらに、安定度や設備負荷率の変動拡大がロス最小性に影響を及ぼすことが懸念される。

これに対して各種の対策が検討されているが課題も多い。周波数制御では予備力対策に電源の拡充や自然エネルギー電源の一時的な出力制限による対策が検討され、電圧制御では主に送配電線の太線化や電圧調整機器の拡充による対策が検討されているが、設備コストの増大や自然エネルギー有効活用の阻害が生じる。この問題を緩和するソリューションとして、需要側との協調による対応策も提案されている。需要側に無理のない範囲での需要抑制や増大への協力を依頼し、その対価として経済的インセンティブを提供する、デマンドレスポンスと呼ばれているものである。電力系統の経済効率向上のほか、緊急時の供給信頼性を最大限確保する手段拡充という公共的意義から、米国などで先行して各種の取り組みがなされてきている。しかし、需要家の利便性や経済性への影響という点で、デマンドレスポンスは社会的に受容されるかという議論も見られる。需要家の手間を軽減する制御システムや経済的負担を軽減するインセンティブが導入されてきているが、普及するまでの十分な解決には至っていない。特に、電気機器使用抑制による快適性への影響を最大限回避することが本質的な課題となっている。そのほか、安定度やロス最小性については、系統切替や負荷配分を潮流状態に応じてアダプティブに制御することが提案されているが、事故検出や事故区間切り離しを行う保護システムは、事前に想定した系統構成に対して動作ロジックやパラメータを構築しており、保護システムで想定している系統構成での運用が原則で、制御のアダプティブ化では系統接続構成に依存して動作する保護システムとの整合性維持が課題である。

本研究では、系統運用高度化における経済性向上のため、アダプティブな系統構成と需要協調の自由度を拡大することを考えた。需要協調の自由度拡大においては、需要家の利便性や経済性への影響が障害となるため、これを最小化する需要調整制御方式について研究した。具体的には、供給力不足時の電力需要抑制制御の「電力ピークカットの高効率空調デマンド制御方式」、余剰電力時の電力需要増大制御の「太陽光発電余剰電力吸収のヒートポンプ給湯機群制御方式」である。さらに、系統貢献需要調整が長期間にわたる場合、夜間への負荷シフトのための設備導入など、ユーティリティ設備の構成の在り方にも影響を与えるため、設備計画支援のための「需要家ユーティリティ設備計

画シミュレーション方式」についても検討した。系統構成の自由度拡大においては、その障害となる、保護システムの系統構成に対するアダプティブ化方式について研究した。「エージェントモデルによる協調動作型保護システム」である。

各研究項目の概要は以下の通りである。

(1) 電力ピークカットの高効率空調デマンド制御方式

供給力不足時の電力需要抑制では、調整量のポテンシャルが期待できる需要調整力として、ピーク需要の大きな割合を占める空調、特にオフィスビルを中心に多く利用されているマルチパッケージエアコンを対象とした。従来、室外機オンオフによる間欠制御が知られているが、本研究では、中間出力が高効率な点に着目し、空調特性モデルベースの高効率領域出力一定制御を提案した。同じピークカット電力での空調出力最大化と、抑制解除後のリバウンド回避が可能である。一定制御は標準インタフェースのみの室内機台数制御で実現した。室内機 8 台&室外機 1 台による実験とケーススタディで、運転点制御精度 4-5%、また、間欠制御に対して、空調抑制時間帯では同じ電力で空調出力増 20%、空調抑制開始から室温復帰までのトータルで電力低減 10%が期待できる結果を得た。

(2) 太陽光発電余剰電力吸収のヒートポンプ給湯機群制御方式

余剰電力時の電力需要増大では、具体的な需要調整力として、需要家サイドに代表的な蓄エネルギー設備であり、稼働調整で利便性への影響が少ない電気式給湯機に着目した。従来、需要家個別の制御によるが、本研究では、地域内の複数需要家の電気給湯機の群制御を提案した。地域内の複数給湯機の複数時刻断面の蓄熱運転計画を、給湯機動作特性モデルを組み込んだ混合整数計画問題として定式化し、地域として商用電力使用量増加を回避しつつ、余剰電力吸収量の最大化を実現した。プロトタイプにより、同じ低圧変圧器配下の一般家庭 6 軒を対象としたシミュレーションケーススタディを行い、従来の個別制御に対して群制御により余剰電力吸収量を 46%向上する結果を得た。

(3) 需要家ユーティリティ設備計画シミュレーション方式

経済性最大化のための設備計画を支援する省エネルギー解析シミュレーション方式を開発した。任意のマルチユーティリティシステムを対象に、季節別 1 時間刻みの負荷データに対して年間の一次エネルギー量を計算するものである。実世界との親和性を高め、任意のシステム構成に柔軟な対応を可能とするため、設備内部状態と設備間接続構造を明確に分離した、エネルギーフロー構造データモデルとエネルギー状態計算モデルのアーキテクチャを採用した。設備モデルの拡張性や並列計算等プログラム実装の自由度のさらなる向上が期待できる。冷熱供給システムを例題にモデル設定と解析を試行し、正しい計算結果が得ら

れることを確認した。また、従来の表計算ソフト等を用いた手作業での解析に対して作業時間を約 80 分の 1 に短縮できた。

(4) エージェントモデルによる協調動作型保護システム

保護システムは、センサや遮断器により事故を高速かつ確実に検出して最小限度の範囲で分断遮断するものである。従来、保護システムは事前に想定した系統構成に対して動作ロジックを構築しているため、想定した系統構成での運用が原則である。本研究では、各装置におけるセンサ計測、遮断器遮断、事故検出、系統状態変化に対する構成制御等の機能を要素機能に分解して、任意の系統状態変化に対し、監視や遮断の対象範囲や動作ロジックを柔軟に再構築する、エージェントモデルによる協調分散型のアーキテクチャを提案した。系統状態変化における遮断範囲の最小性維持が可能である。シミュレーションケーススタディを行い、遮断範囲の最小性、ハードウェアの冗長性低減、系統運用の自由度向上が可能であることを考察した。

論文調査の要旨

太陽光発電や風力発電などの自然エネルギー電源が電力系統に次々と導入されつつある。また、電気自動車のような新しい種類の負荷の導入拡大も見込まれている。これらは発電量および電力需要量の変動を増大させ、十分な対策を講じないと、周波数や電圧の維持、系統の安定度、送電損失などに影響を与える。これらの対策を電線大容量化や電圧調整設備導入などの系統設備増強によって実施するとコスト増につながり、また、系統電圧上昇時の太陽光発電切離しなど自然エネルギー電源の出力制限によって行うと自然エネルギー活用の妨げとなる。これらの弊害が生じない対策として、変動に応じた系統構成の変更や変動に応じた需要調整が注目されている。しかし、前者では、変更前の系統構成を前提としている系統保護システムの機能が損なわれる恐れがあり、後者では、需要家の利便性・快適性や経済性への悪影響が懸念され、いずれも多く普及するには至っていない。

本研究は、系統構成変更や需要調整において、機能低下や利便性悪化などを防止・抑制することができる新たな方式を開発し、これによって電力系統運用の柔軟性を向上させ、高度化する方法を提案したものであり、以下の特長を有する。

1. 需要調整のうち、電力供給力不足時に有効な需要抑制に関して、大きな需要調整量が見込めるビルの空調設備に着目し、快適性に直結する冷房出力をできるだけ低減させずに消費電力を指定値に抑制する制御方式を開発している。従来、空調設備の需要抑制法として定格出力運転と停止を繰り返す間欠運転が提案されていた。これに対し、

オフィスビルで多用されているパッケージエアコンでは定格出力時よりも中間出力時の方が高効率であることを活用し、消費電力抑制時の冷房出力が間欠運転を行う場合よりも約 20%高く、また、抑制解除後の電力消費急増を回避できる方式を提案している。

2. 太陽光発電電力余剰時の余剰電力吸収を行う需要調整として、稼働時刻変更が利便性に与える影響が小さい蓄エネルギー設備である電気式給湯機に着目し、余剰電力で温水を作り、活用する運転制御方式を考案している。従来の需要家個別の制御方式では余剰電力吸収効果は限定的であった。本研究では、複数需要家の給湯機をまとめて運転制御し、余剰電力の大きさ、給湯機容量、温水需要時間帯の需要家間の違いを活用する方式を提案している。ケーススタディによって、提案方式は、商用電力購入量増加を回避しつつ、余剰電力吸収量を個別制御方式と比較して 46%増加させることができることを示している。
3. 時間帯別料金などによる需要調整に対応して需要家が蓄電池設置などの設備更新を行うと、需要調整の効果増大と需要家の経済性向上が期待できる。需要家による経済性評価を短時間で容易に行うために、マルチユーティリティシステムを対象として、一次エネルギー年間消費量を計算するシミュレータを開発している。設備やその接続状況の変更に応じた計算モデルの自動構築を容易にするために、各設備の内部状態と外部接続構造を分離した構成としている。これにより、従来の表計算ソフト等を利用した人手による解析と比較して所要時間を 80 分の 1 に短縮している。
4. 電力需要の変動に応じた電力系統構成の変更は、送電損失の最小化などに大きく貢献する。しかし、系統の保護システムの設定も系統構成変更に応じて変更しなければならない。本研究では、任意の系統構成変化に対応できるアダプティブな保護システムとして、監視や遮断の対象範囲や動作ロジックを系統の接続状況を自動的に検出して再構築する、エージェントモデルによる協調分散型のシステムを提案している。計算機シミュレーションによって、遮断範囲の局限化とハードウェアの冗長性低減が可能であることを確認している。

以上要するに本論文は、自然エネルギー電源の有効活用、電力系統の信頼性および需要家の利便性を損なうことなく、自然エネルギー電源の大量導入を可能とする電力系統運用高度化のための方式を提案したものであり、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。

氏 名 Nurmiza Binti Othman
 学位記番号 シ情 博甲第 528 号 (学術)
 学位授与の日付 平成 26 年 3 月 25 日
 学位論文題名 Magnetic Nanoparticle Imaging for Biomedical Applications
 (医療応用のための磁気ナノ粒子イメージング法の開発)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 圓福 敬二
 (副 査) " " 木須 隆暢
 " " " 林 健司

論文内容の要旨

Magnetic nanoparticle (MNP), whose diameter is smaller than a critical diameter, exhibits superparamagnetism as a response to an applied magnetic field, having a high saturation magnetization without any hysteresis in zero field excitation. Since magnetic properties of MNP can be easily controlled and manipulated using externally applied magnetic field, it offers wide attractive possibilities in biomedical applications such as hyperthermia, immunoassay, drug delivery, and magnetic particle imaging (MPI).

In this study, a simple yet high-sensitivity MPI system has been developed based on the second harmonic ($B_{2\omega}$) signal detection especially for the sentinel lymph node (SLN) detection for breast cancer diagnosis. SLN, the first lymph node in which cancer cells appear before they spread to other lymph nodes, should be detected for in vivo application. To detect the SLN, MNPs are injected into the human body, and the signal from the magnetized MNPs is detected on the body's surface. The position of the MNPs is identified by analyzing the contour map obtained from the signal field. A highly sensitive system that can detect 100 μg of MNPs located at depth of about 30 mm is required. Additionally, it is also necessary to develop a method of accurately estimating the position of MNPs from the contour map. High spatial resolution is needed to distinguish the SLN from an adjacent lymph node. To this end, the following three key issues have been studied: (1) characterization of MNPs for MPI, (2) development of MNP imaging system based on the second harmonic signal detection, and (3) development of signal processing method for high spatial resolution image reconstruction.

In this thesis, **Chapter 1** defines the research background and the motivation. Basic principle of MPI as the

main focus of this study, and MNP imaging for the sentinel lymph node biopsy are introduced. The main objectives of this research and the thesis outlines are also described.

In **Chapter 2**, overview of MNP properties, such as nonlinear magnetization, magnetic relaxation and harmonic spectra, is introduced. Then, their potential in the biomedical applications such as drug delivery, hyperthermia, immunoassay, and MPI are introduced.

Next, **Chapter 3** describes the characterization of MNP sample for MPI. As the imaging system utilizes harmonic signals, it is important to select MNP that can generate strong harmonic signals. First, three types of evaluation methods such as harmonic spectrum measurement, $M-H$ curve measurement, and AC susceptibility measurement were applied to characterize several commercial MNP samples. Several important parameters for harmonic signals contribution from the MNPs were established using these methods, i.e., distribution of the magnetic moment m and anisotropy energy E_B , and their relationship. Conditions required for MNP to generate strong harmonic signals have been quantitatively clarified. Then, a numerical simulation based on the *Landau-Lifshitz-Gilbert* (LLG) equation to study the harmonic spectra is introduced. The portion of m which is responsible for the harmonic signals generation in each MNPs could be studied in details using the numerical simulation results. A comparison between experiment and numerical simulation on harmonic spectra was done to comprehend the harmonic spectra properties in detail. Finally, the fractions of MNP samples that contribute to harmonic signals are discussed, and the best MNP sample for MPI is evaluated. Resovist was chosen as MNP sample for the real measurement using the MNP imaging system to be developed.

In **Chapter 4**, the development of a harmonic detection-based MNP imaging system is described. First, each component of harmonic signals from Resovist was evaluated. The experimental result was discussed to propose the best detection method utilizing harmonic signals. As a result, a second harmonic ($B_{2\omega}$) signal detection-based system was chosen as a narrow-band MPI in order to obtain a high signal-to-noise ratio (SNR) signal for imaging. Then, the MNP imaging system was designed and constructed for the sentinel lymph node biopsy application, including the MNP sample preparation, excitation and measurement systems.

In **Chapter 5**, the MNP imaging measurement results are presented. This chapter provides the position identification of one and two MNP samples in xyz space representing one and two SLNs in the lymphatic system, as

well as their localization and concentration relationship. First, it can be shown that the present imaging system could detect a 100- μg immobilized MNP sample located at $z = 30$ mm with the SNR as high as 5. This detection sensitivity is adequate for the SLN detection using MNPs. Next, the contour map of the signal field was analyzed by using a mathematical technique called *singular value decomposition* (SVD). Using this technique, the contour map of the signal field could be converted to the MNP density distribution map. The position of MNPs could be accurately estimated with high spatial resolution from the MNP density distribution map. The robustness of the SVD method against an error in the depth estimation is also demonstrated. A high spatial resolution of MNP density distribution map was successfully obtained even with error in depth information. The robustness of SVD method is very important for the localization the MNPs with high spatial resolution. Additionally, improvement in immobilization method and MNP selection towards better imaging is introduced and discussed at the end of this chapter.

Finally, **Chapter 6** concludes and summarizes the work in this thesis, and discusses on possible future research based on this thesis.

論文調査の要旨

粒子径が臨界値よりも小さな磁気ナノ粒子は超常磁性を示すことが知られており、多くのバイオ分野へ応用が研究されている。その中の一つが、乳癌のセンチネルリンパ節検査への応用を目指した磁気ナノ粒子イメージングである。センチネルリンパ節とは癌細胞が最初に到達するリンパ節のことであり、これを検出することにより乳癌手術において切除する範囲が決められる。現状では、色素や放射性アイソトープを体内に注入してセンチネルリンパ節に集積させることにより肉眼や放射線センサによりその位置を検出している。しかしながら、これらの方法では感度や放射線の問題があり、高感度で安全な検査法の開発が望まれている。

本論文では、乳癌のセンチネルリンパ節検査への応用を目指して、第2高調波測定法を用いたシンプルで高感度な磁気ナノ粒子イメージングシステムを開発している。磁気的な検査法では、センチネルリンパ節に磁気ナノ粒子を集積させ、磁気粒子からの磁気信号を体表面で測定することにより、リンパ節の位置を特定する。このためには、深さ 30 mm の位置にある重さ 100 μg 程度の磁気ナノ粒子が検出できる高感度な計測システムが必要となる。このため、本手法の基礎となる磁気ナノ粒子の非線形特性を定量的に明らかにするとともに、試作した装置によるイメージング実験により本手法の高感度性を実証しており、以下の点

で評価できる。

第 1 に、磁気ナノ粒子の高調波スペクトル、磁化特性、交流磁化率の測定結果を解析することにより、ナノ粒子の非線形特性を定量的に明らかにしている。また、磁気ナノ粒子の基本パラメータである磁気モーメントと異方性磁気エネルギーの試料内での分布を求め、この分布が非線形特性に及ぼす影響を明らかにしている。さらに、Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式を数値解析することにより、高調波信号を発生させるための条件や高調波信号の発生に寄与する試料内の磁気ナノ粒子の割合を定量的に明らかにしている。これにより、イメージング応用のための磁気ナノ粒子の定量的な評価と高性能化のための指針を初めて明らかにしている。

第 2 に、磁気イメージングのための高感度な計測システムを開発している。磁気ナノ粒子を励起するための励起システム、信号測定のためのグラディオメータ検出コイル、検出コイルからの信号読み出しのための共振回路等の最適化を行い、低雑音な計測システムを実現している。また、大きな励起磁界中で微小な信号を計測する際に問題となる励起磁界の干渉の問題を、第 2 高調波測定法を用いることにより大幅に低減できることを示している。これにより、磁気ナノ粒子からの微弱磁界の高精度な磁界マップの作成を可能にしている。

第 3 に、開発したシステムを用いて深さ 30 mm の位置にある重さ 100 μg の磁気ナノ粒子を信号対雑音比 5 で検出している。また、測定した磁界マップから磁気ナノ粒子の位置を高い空間分解能で推定するデータ解析手法を開発し、20 mm 離れた 2 か所に集積した磁気ナノ粒子の識別を可能としている。これらの結果は乳癌のセンチネルリンパ節検査に要求される性能を満たしており、高性能な検査システムであることを実証している。

以上要するに、本研究は、体内診断への応用を目指した磁気ナノ粒子イメージング法を開発するため、本手法の基礎となるナノ粒子の非線形特性を定量的に明らかにし、ナノ粒子の高性能化のための指針を明らかにするとともに、第 2 高調波測定法を用いた低雑音な計測装置を試作し、高感度で高い空間分解能をもつ磁気イメージングを実証しており、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（学術）の学位に値するものと認める。

氏 名 坂本 佳史
 学位記番号 シ情 博甲第 529 号 (工学)
 学位授与の日付 平成 26 年 3 月 25 日
 学位論文題名 リバースモデリングとモデルシミュレーションを活用した組込みシステムの開発に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 安浦 寛人
 (副 査) " " 福田 晃
 " " " 村上 和彰

論文内容の要旨

現代社会において組込みシステムは鉄道や自動車、通信ネットワークなど社会基盤を支えるインフラストラクチャーの一部として広く普及しており、また個人消費においても家庭用の電化製品や情報機器としての普及が目覚ましい。組込みシステムが社会において広く活用される中で、それらを利用する顧客は年々、多くの機能や高い性能を求める。その結果として組込みシステムは近年、急速にその規模を拡大して複雑なシステムへと変化している。現在の組込みシステムの開発において、開発コストと開発納期はいずれも厳しい制約の元にあり、開発納期も市場への製品投入サイクルの短縮を受けて短くなる傾向にある。このような環境において組込みシステムの開発は開発コストと開発納期が現状維持、もしくは削減される中で品質を高めて更に大規模化・複雑化に適用しなくてはならない状況にある。

つまり現在の組込みシステムの開発における重要な課題は、大規模化する組込みシステムを、開発コストと開発納期をこれまでと変えずに開発しなくてはならないことである。そのためにはこれまで以上にその開発品質を高めることが必要となる。

そこで本研究では、以下に示す研究を行う。

組込みシステムの開発において設計の品質を高めることを目的としてリバースモデリング手法とモデル・シミュレーションを組み合わせることで、組込みシステムの品質を評価する手法である SRMS (Systems development method utilizing Reverse modeling and Model-based Simulation) を提案する。ここで、本研究において対象とする開発品質とは、組込みシステム開発の上流工程における機能、性能、リソース使用量、消費エネルギーの充足可能性である。

また、SRMS の適用によって差分開発に多く適用されているボトムアップ開発の問題点を解決して、トップダウン開発に移行することを目標とする開発メソドロジーを提案する。本研究で用いるリバースモデリング手法とは、既存の組込みシステムに対してリバースエンジニアリングの解析技術を適用することで得られた結果を用いて、高い抽象度のモデルを作成することである。

次に、これらの提案した手法とメソドロジーを用いて、実際の組込みシステムに適用して提案手法の評価を行う。MFP - Multi Function Peripheral/Printer(デジタル複合機)においては性能評価の観点で、MFP に搭載される SoC-System On a Chip(システム LSD)では消費エネルギーの

観点で、自動車に搭載される CCS-Cruise Control System(クルーズコントロールシステム)では加速要求の観点で、システムレベルのモデル・シミュレーションによる評価を行う。モデル・シミュレーションの結果の妥当性検証を実施することで本研究の有効性を示す。

以上のことから、本研究により、厳しい制約の元での開発求められる組込みシステム開発の品質の向上と効率化において貢献が期待できる。

論文調査の要旨

組込みシステムは、現代社会を支える社会情報基盤の中核をなす種々の情報通信機器や制御装置として、交通システム、情報通信システム、ビジネス支援システム、教育支援システム、医療支援システムなど社会のシステムの基幹的な要素部品として幅広く利用されている。個人の生活においても、家庭内の各種電化製品や情報機器、ライフラインを維持するための基盤として、現代人にとって無くてはならないシステムとなっている。一方、社会や個人のニーズはより高い利便性や快適性を求めており、組込みシステムにますます多くの機能や高い性能を要求している。このため、組込みシステム開発には、高度で複雑なシステムを、できるだけ低い開発コストと短時間の開発期間で構築することが求められると共に、高い品質の維持との両立が課せられている。

本論文は、大規模な組込みシステムの開発現場で、プロジェクトマネージャーとして開発チームをまとめている著者が、自らの経験と現場で利用されている開発方法を実践的に比較検討し、新しい組込みシステム開発の方法論を提案し、3種類の実システムの開発現場に適用してその効果を示したものであり、以下の3点で評価できる。

まず、著者は現在の組込みシステムの開発における問題点を、多くの統計資料から明らかにし、システムの安全性や品質が犠牲となり始めていることに警鐘をならしている。そして、その原因が従来型のボトムアップ型開発と差分開発の組み合わせにあることを、自らがプロジェクトマネージメントを行った業種や企業体質も異なる10を超える開発事例をもとに分析している。著者は、開発コストや開発時間をできるだけ増大させずに、設計の品質を高めることを目的としてリバースモデリング手法とモデルシミュレーションを組み合わせたSRMS(Systems development method utilizing Reverse modeling and Model-based Simulation)を提案している。従来のボトムアップ型開発における差分開発の問題点を多くの開発プロジェクトの事例を解析することで明確化し、それに対する合理的な対応策として、SRMSを提案している点は、科学的思考による新しい開発手法の提案として高く評価できる。

著者が提案したSRMSは、ボトムアップ開発の問題点を解決してトップダウン開発に移行することを誘導する開

発メソッドロジーであり、既存の組込みシステムに対してリバースエンジニアリングの解析技術を適用することで得られた結果から高い抽象度のモデルを作成し、そのモデルを用いた上位レベルでのシミュレーションによって差分開発の効果を予測することが基本となる。既存の技術と新しい技術を組み合わせ、設計の抽象度の高いレベル(要件定義やアーキテクチャ設計のレベル)へ立ち戻って検証を行い、差分開発の設計意図の表現や高いレベルでの記述を自然に生成でき、保守までを考えると増加する工数は長期的には無視できるものとなり、品質の向上によるシステムの安定性という大きなメリットが享受できる。このように、現在、設計現場で利用できる技術を駆使して、開発現場の技術者の技量や設計設備への投資も考慮して、設計の品質を向上させる開発手法を具体的に提案した点が、本研究を工学的に高く評価できる2つ目のポイントである。

さらに、著者は、提案した手法を実際の組込みシステム設計現場に導入して、その効果を評価している。具体的には、デジタル複合機およびその中で用いられるシステムLSI、自動車用のクルーズ制御システムなどに適用し、異なる規模の組込みシステムプロジェクトにおいて、いずれも提案するSRMSが有効であったことを、実システム設計現場でのデータを用いて実証している。通常は、外部には出しにくい設計現場の実データによって、提案する手法が規模や分野の違う組込みシステム設計のいずれにおいても有効であったことを示したことは、工学上大きな成果である。

以上を要約すると、本研究は、組込みシステムの開発において設計の品質を高めることを目的としてリバースモデリング手法とモデルシミュレーションを組み合わせることで、組込みシステムの品質を評価することを中心とした新しい開発手法を提案し、複数の実システムの設計プロジェクトにおいて提案手法を適用してその有効性を示したもので、情報工学に寄与するところが大きい。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 南角 茂樹
 学位記番号 シ情 博甲第530号(工学)
 学位授与の日付 平成26年3月25日
 学位論文題名 組込みシステムにおける割り込み制御に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 福田 晃
 (副 査) " " 村上 和彰
 " " " 鶴林 尚靖

論文内容の要旨

組込みシステムは、現実世界の変化に対応して、予め定

められている制約時間以内に処理を行うというリアルタイム性を保証できることが重要である。そして、現実世界の変化を捉えるために各種センサを利用する。センサは現実世界の変化を検出すると、ハードウェア割り込み（以後割り込み）を使用して、CPU へ変化の発生を伝える。そして、割り込みにより CPU ハードウェアから呼び出される割り込み処理によって、変化に応じた処理が実行される。

現実世界のさまざまな変化に対応するため、割り込みには優先度をつけられ、割り込み処理実行中に、より優先度の高い割り込みが発生した場合は実行中の割り込み処理を一時停止して、より優先度の高い割り込み処理に制御を移すという多重割り込みを利用した多重割処理によって並行処理を実現する。

並行処理を行う場合にはクリティカルセクション(以後 CS)の排他制御が必要である。CS とは、同時に実行すると、データの一貫性が失われるなどの不具合が発生する可能性がある一連の命令区間のことであり、CS の排他制御とはデータの不整合が生じないように、複数の並行処理が CS を同時に実行しないように制御するである。

また、約 30%の組込みシステムは、割り込みレベルの少なさ、コスト面、ノイズに対する耐性、メモリ搭載量、そしてホワイトボックス化によるリアルタイム性確保の点からリアルタイム OS (以後 RTOS) を使用せず、割り込みを利用して並行処理を実現している。

RTOS 使用時は、タスク間の CS の排他制御にはセマフォが使用され、RTOS 不使用時は、割り込み処理間の CS の排他制御には全割り込み禁止(Disable Interrupt、以後 DI)と全割り込み許可(Enable Interrupt、以後 EI)が使用される。しかし、セマフォの排他制御の影響が、関連するセマフォを利用しているタスク間に限定されるのに対し、DI/EI による割り込み処理の排他制御は、排他制御に無関係の部分や優先度が高い無関係の割り込み処理の実行までも阻害し、組込みシステムがリアルタイム性を満足できない場合がある。

たとえば、業務用のエアコンでは 1 台の室外機で 10 台以上の室内機の温度設定や冷媒の送出的ためのコンプレッサの制御などを RTOS なしで行っている。室外機で割り込みによって行わねばならない制御は

- ・冷媒の送出制御（コンプレッサの制御）
- ・全室外機動作の制御
- ・温度、湿度など外部条件のチェック
- ・通信のチェック
- ・設定データの反映
- ・電源低下のチェック
- ・EEPROM の書き込みタイムアウトのチェック

など多岐に渡る。現実には、RTOS を使用しない業務用エアコンの室外機は 15 種類の割り込みにより処理を行っており、排他制御のための DI により、制約時間以内に高優

先度の割り込みに応答できず、リアルタイム性の満たせないための不具合が発生した。

また車に 100 個以上使用される ECU (Electric Control Unit) においても、ほとんど RTOS は使用されず、割り込みを用いて並行処理を実現する。ECU においては、バスからの割り込みが多数あるため、排他制御に苦勞している。

これらの問題を解決するためには、排他制御の影響が関連する割り込み処理間のみに限られ、低優先度の割り込み処理が高優先度の割り込み処理の実行を阻害しない、排他制御方式の実現が必要となる。そこで本研究では、特別な割り込みを追加せずに、RTOS のセマフォと同等の機能を組み込んだ、割り込み処理間の CS の排他制御を実現する方式を提案した。

RTOS がタスクに対して提供しているセマフォと同等の機能を割り込み処理が従来使用できなかったのは、各割り込み処理が固有のコンテキストを持たず、割り込み処理が待ち状態を持たなかったためである。そこで各割り込み処理に固有のコンテキストを持たせることにより、待ち状態を持てるようにした。そしてそれを利用して、割り込み処理がセマフォと同等の機能を利用できるようにして、組込みシステムのリアルタイム性を向上させた。

この仕組みを REMON(Real-Time Embedded Monitor)と名付けた。さらに REMON には、ハードウェア割り込み優先度を利用してソフトウェアの実行を減らすことによる、平均処理速を向上させる機能、メモリマネジメントユニット (MMU) を使用しないスタックオーバーフローの発生を検出する機能も持たせた。

最後に、REMON および RTOS を同じ CPU ボードに実装して実装して、処理速度の測定、比較を行い、REMON の有用性を確認した。

論文調査の要旨

各種の機械や機器に組み込まれて、その制御を行うコンピュータシステムである組込みシステムは、工業制御システム、通信機器、オフィスオートメーション、運輸システム、娯楽機器など多くの産業分野/日常生活に浸透しており、重要な研究対象となっている。組込みシステムは、外界からのイベント（外部イベント）に実時間でアクションを完了できるリアルタイム性の保証が重要となっている。組込みシステムへの外部イベントからの通知は、割り込みによってなされる。さらに、割り込み処理内では、不可分に実行しないとならない部分（クリティカルセクション：CS (Critical Section)）が存在する。

産業界では、割り込み処理内の CS 実行に関して、次の問題が生じている。従来の多くは、ハードウェアが提供する割り込み禁止命令を用いて、CS 実行を保証している。しかしながら、割り込み禁止命令を用いた方法では、当該 CS に関係のない高い優先度の割り込みまでも受け付けるこ

とができず、リアルタイム性が保証できないでいた。この問題を解決する方法の1つとして、個別のCSと関連付けたセマフォを用いたソフトウェアによる方法があるが、割り込み処理がコンテキストを持たない処理方式で実行されるため、高い優先度の割り込み処理の中で、セマフォによるロックが獲得できない場合、割り込み処理全体が中断し、ひいては、システム全体の処理が止まってしまうという不具合が生じることになる。

本論文は、組込みシステムにおける上記の問題を解決する目的で、リアルタイム性とCS実行の双方を保証するための割り込み制御方式を提案し、提案方式を設計するとともに、実装し、さらに評価を通じて、本提案手法の有効性を実証したものであり、以下の点で評価できる。

第一に、著者は、上記の問題を解決するために、個別の外部イベントからの割り込みを処理する割り込み処理ルーチンを、コンテキストを有するスレッドとして実現するアーキテクチャを提案している。すなわち、割り込み制御方式として、マルチスレッドアーキテクチャを提案している。さらに、リアルタイム性を保証するために、割り込み処理ルーチン内のCS実行を保証する制御方式として、従来の多くが採用していたハードウェア提供の割り込み禁止命令を用いた方式ではなく、セマフォによる新たなソフトウェアによる解決方法を提案している。さらに、本提案手法を設計／実装し、評価を通して、本アーキテクチャが有効であることを実証している。これらにより、割り込み制御に関するリアルタイム性とCS実行の保証に関して、産業界の観点から実用化できる見通しを与えている。

第二に、著者は、割り込み制御に関して従来から問題となっている優先度逆転現象（低い優先度の処理が高い優先度よりも優先されて実行される問題）の解決方法を示している。具体的には、優先度逆転現象の解決方法として、既存の優先度継承プロトコル（CSを実行している低優先度の割り込み処理ルーチンの優先度を一時的に高くする方式）の実現方法を提案している。具体的には、既存の優先度継承プロトコルは、従来ソフトウェアによって実現されており、割り込み処理の中で適用する場合、その実現コストが問題となっていた。著者は、ハードウェアが提供する優先度設定機構を用いることにより、当該プロトコルの実行コストを削減する手法を提案している。さらに、本提案手法を設計／実装し、評価により、本提案手法の実行コストをほとんど無視できることを実証している。これにより、割り込み処理の優先度逆転現象の解決方法において、実用化に耐えうる有効な手段を提供し、産業界に新たな知見を与えている。

第三に、著者は、割り込み処理ルーチンをスレッドとしたマルチスレッドアーキテクチャにおいて、スレッドのコンテキストの一部であるスタックのオーバフロー問題を解決する方法を提案している。具体的には、スタック内に

マジックナンバを設定することにより、スタックオーバフローを検出できる方法を提案している。本提案手法を設計／実装し、評価することにより、本提案手法が有効であることを実証している。これにより、割り込み処理におけるスタックのオーバフロー問題の解決方法に新たな知見を与えている。

以上、本論文は、組込みシステムにおける割り込み制御に関して、リアルタイム性とCS実行の双方を保証する目的で、割り込み処理ルーチンをスレッドとして実行する新たな制御方式を提案／設計し、実装／評価を通じて、本提案手法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 野田 厚志
 学位記番号 シ情 博甲第531号（工学）
 学位授与の日付 平成26年3月25日
 学位論文題名 見通し内通信を支援する相対位置情報を利用した名前解決ミドルウェアの提案と実装評価

論文調査委員

（主 査） 九州大学 教授 福田 晃
 （副 査） " " 櫻井 幸一
 " " " 鶴林 尚靖
 " " " 古川 浩

論文内容の要旨

本論文では、ユーザの見通し内における一時的な通信をLSAC (Line of Sight Ad-hoc Communication) と呼び、LSACにおいて相対位置情報を利用して通信相手の特定を支援する名前解決ミドルウェアを提案するとともに、その実装、評価を行なう。

近年、あらゆる機器や装置が通信デバイスを装備し、それらがネットワークで有機的に結合されるユビキタス計算環境が現実のものになりつつある。特に、無線通信デバイスによる接続は、その利便性の高さから、ユビキタス計算環境の核となるデバイスとして、様々な分野からの研究開発が進められている。対面している利用者の端末間での通信においても、近距離無線通信は今後、より盛んに利用されるようになると思われる。たとえば、営業担当者が企業を訪問した際に電子的な資料を無線通信で手渡したり、喫茶店で友人同士がデジカメの画像をやり取りしたりする状況である。このような状況において、現時点ではUSBメモリなどの物理媒体や、電子メールなどのバックボーンとなるインターネット通信を利用したファイル交換が盛んであるが、端末間での無線通信機能を利用した直接のファイル交換が行われることは比較的少ない。この要因とし

て近距離無線通信における通信相手の指定, 特定の煩わしさが挙げられる. 通信相手を指定するためには, ネットワーク上における通信相手の識別子 (IP や MAC アドレス) を知り, それを端末に直接入力するか, もしくはブロードキャスト通信等を利用して近くにある端末の識別子一覧を取得し, その中から指定するという煩雑な手順が必要である. 本研究では端末の配置情報 (すなわち端末との相対的な位置情報) を用いてこれを解決する. 端末の画面上に周辺端末の位置関係を表示することで, 利用者は位置情報から通信対象を容易に特定することができる. 本研究では, ユーザの視界内に存在する端末間で, 一時的にネットワークを形成し, 即座に情報交換を実現する LSAC を構築し, LSAC を支援する技術について提案, 評価を行なう. 無線通信機能をより直感的かつ信頼して利用できるようにすることで, 利用者同士が対面している状況を活用した近距離無線通信が今後より活用されていくことが推測される.

本研究の目的は, LSAC 環境における通信相手の特定を支援することである. この目的を達成するために, 本研究では名前解決ミドルウェアを提案する. このミドルウェアは, 従来の名前を用いることに加えて, 周辺端末との相対位置を補助的に提示し, LSAC 環境における通信相手の特定を効果的に支援するものである. 提案ミドルウェアは, 次の特徴を有する. (1)提案ミドルウェアの機能を, アプリケーションが柔軟に利用できるように, シンプルな API(Application Program Interface)を提供する. (2)LSAC 環境では専用サーバをあらかじめ配置することができない. 従って, 提案ミドルウェアはこのような専用サーバが存在しない環境でも動作が可能である. また, PDA 程度の処理能力でも動作が可能である. (3)キャリブレーションを必要とせず, 周囲の端末の相対位置を取得可能である WiPS (Wireless LAN indoor Positioning System) をベースにした測位手法を採用している. 提案ミドルウェアのプロトタイプシステムを構築し, 応用プログラムの作成と基礎的な評価を行った. 評価の結果から, PDA 程度の処理能力で十分に提案ミドルウェアを稼働できることを確認した. さらに位置推定において移動した端末の位置のみを計算しなおすことで, 負荷の軽減を実現した. その結果, 移動端末の割合が 50%前後の場合に最大となる 50%程度の精度低下が見られた. また, 移動端末の割合に比例した計算負荷を軽減できることを提示した. これらのことから, 提案した負荷軽減手法では位置推定精度をある程度犠牲にはするが, 計算負荷の軽減を可能とすることを示した. また, LSAC 環境における安全な通信のための暗号化について, 公開鍵の認証の必要性について述べた. しかしながら, 本研究で対象としている環境においては, 認証局が存在するネットワークに接続していない場合も想定するため, 公開鍵基盤を利用した公開鍵認証を利用できるとは限らない. この問題点を解決するために, 利用者同士が近距離で対面

していることを利用し, 相互に公開鍵の認証を行なうことのできる手法として, 「表形式確認方式」を提案した. この方式は, 認証局を用いずに相互に端末を認証し, 互いに認証した端末間で暗号化を行ったファイル共有を実現し, 主に中間者攻撃と誤った端末への送信を防ぐ効果を持つ. 端末の相互認証には公開鍵暗号を用いるが, 互いに対面する利用者間の信頼関係をよりどころとして, 利用者が互いの端末の公開鍵を確認しあうことで, 相互認証を実現する. 認証手順の中に人間の確認作業を含める man-in-the-loop アプローチによって, 利用者自身が認証の有無を明らかに認識することができる. 評価実験の結果, 提案方式は従来方式よりも認証に要する時間が短いことがわかった. 位置情報を利用する既存のアプリケーションに機能を追加する形で, 提案方式の実装を行った結果, 英単語表を用いてサマリの一致性を確認することにより, 公開鍵の認証を行い, 暗号化通信を開始ができることが確認できた. これらの評価により, 提案ミドルウェアの実現可能性と有用性を示した.

論文調査の要旨

近年, あらゆる機器や装置が通信デバイスを装備し, それらがネットワークで有機的に結合されるユビキタス計算環境が現実のものとなっている. 特に, 無線通信デバイスによる接続は, その利便性の高さから, ユビキタス計算環境の核となるデバイスとして, 様々な分野からの研究開発が進められている. この中で, 対面している複数の利用者の中で, 見通し内通信を利用してユビキタス環境を構築することは, ビジネスにおける営業, および会議などの応用があるため, 極めて重要な研究分野となっている. この見通し内通信におけるユビキタス環境として, 従来は, 通信相手を指定するためには, ネットワーク上における通信相手の識別子 (IP や MAC アドレス) を把握し, 当該識別子を利用者自らが保有する計算機端末に直接入力するか, あるいはブロードキャスト通信等を利用して近くにある端末の識別子一覧を取得し, その中から指定するという煩雑な手順が必要であり, その煩わしさから必ずしも十分に普及しておらず, 利用者を使い勝手のよい新たな環境の構築手法が求められている.

本論文は, 以上を背景にして, 見通し内通信を用いたユビキタス環境において, 利用者を使い勝手のよい計算機環境を構築する目的で, 利用者の視界内に存在する端末間で, 一時的にネットワークを形成し, 即座に情報交換を実現する見通し内アドホック通信環境 (LSAC : Line of Sight Ad-hoc Communication) を構築し, LSAC における新たなサービスを提供するための支援技術を提案/設計し, さらに, 実装/評価を通じて, 本提案技術の有効性を実証したものであり, 以下の点で評価できる.

第一に, 著者は, LSAC を対象として, 各利用者が保有し

ている端末の相対位置情報を利用して、端末間の物理的位置を可視化することにより、利用者に使い勝手のよい環境を提供する方式を提案している。具体的には、各端末間の電波強度に着眼した端末間の物理的位置推定方法を活用した名前解決ミドルウェアを提案している。さらに、本提案ミドルウェアを設計／実装し、評価を通じて、本提案ミドルウェアが有用であることを実証している。これらにより、LSAC における新たなサービス提供の可能性について、新たな知見を与えている。

第二に、著者は、端末の物理的位置を推定する技術に関して、端末が移動する際の推定コストを削減する手法を提案している。具体的には、移動した端末の位置のみを計算しなおす手法を提案するとともに、設計／実装し、さらに、評価することにより、推定コストを約 1 / 2 に軽減できることを示し、本提案手法が有効であることを実証している。これらにより、LSAC の支援技術の実用性に関して、新たな知見を与えている。

第三に、著者は、LSAC における安全な通信のための暗号化に関する公開鍵の認証について、認証局を必要としていた従来方式を見直し、認証局を必要としない新たな認証方式を提案している。具体的には、認証手順の中に、人間による口頭や目視による手順を導入して、公開鍵のサマリを認証する手法を応用することを提案している。さらに、本提案手法を設計／実証し、評価により、本提案手法が LSAC に有効であることを実証している。これらにより、LSAC のセキュリティに関して、新たな知見を与えている。

以上、本論文は、移動端末を有する複数の利用者が対面する見通し内アドホック通信環境を対象として、端末の相対位置情報を利用して、当該端末の物理的位置を可視化することにより、当該環境における新たなサービス基盤を提供できる名前解決ミドルウェアを提案／設計し、実装／評価を通じて、本提案ミドルウェアの有用性を実証したものであり、情報工学上寄与するところが大きい。よって、本論文は、博士（工学）の学位に値すると認める。

論文内容の要旨

The problem of determining whether a propositional Boolean formula can evaluate to true is called Boolean Satisfiability Problem (SAT). Maximum Satisfiability Problem (MaxSAT), as well as its extensions: partial MaxSAT, weighted MaxSAT, and weighted partial MaxSAT, are optimization versions of the famous SAT problem. To date, there have been a variety of MaxSAT applications such as planning and scheduling. This thesis is concerned with a well-suited way of representing and solving real-world problems with MaxSAT, in terms of multi-agent systems and cryptographic areas.

Generally, a propositional Boolean formula is expressed in Conjunctive Normal Form (CNF), which is a conjunction of clauses that are disjunctions of literals. A literal is either a positive or negative Boolean variable. Weighted partial MaxSAT (WPM) distinguishes clauses between hard and soft, where each soft clause is associated with a positive weight. The WPM problem is to satisfy all hard clauses and maximize the sum of weights of all the satisfied soft clauses. The positive weights in WPM sometimes become impediment to solve problems where positive and negative weights co-exist. To avoid this difficulty, in this thesis, an extended WPM (EWPM) for handling non-zero weights is presented and the relationship between EWPM and WPM solution is examined. The design of EWPM paves the way for a wider range of WPM applications.

One application of EWPM is the coalition structure generation problem (CSG), which tries to partition a set of agents into coalitions so that the total value of all coalitions is maximized. In the CSG problem, values of coalitions can be both positive and negative. This thesis provides two WPM encodings for solving the CSG problem. The first encoding is derived from the existing optimization frameworks and the second one is a brand-new encoding making use of the developed EWPM. Both encodings validate the effectiveness of the WPM solvers in solving the CSG problem.

If all soft clauses in WPM have weight 1, the problem is regarded as partial MaxSAT. The goal of partial MaxSAT is to satisfy all hard clauses and the maximal number of soft clauses. In this thesis, the potential of partial MaxSAT is exploited for reconstructing corrupted key schedule images of advanced encryption standard (AES) extracted from the dynamic random access memory after power is removed. An AES key is a series of 0-1 bits closely related to each other. The relations among key bits are naturally expressed with a set of Boolean formulas, and rectifying the faults in the corrupted AES key schedule is formulated as a Maximum

氏 名 廖 晓鵬
 学位記番号 シ情 博甲第 532 号 (工学)
 学位授与の日付 平成 26 年 3 月 25 日
 学位論文題名 Maximum Satisfiability Approach to
 Game Theory and Network Security
 (ゲーム理論と通信網の安全性への最大充足可能性アプローチ)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 長谷川 隆三
 (副 査) " " 横尾 真
 " " " 鈴木 英之進

satisfiability problem which can be solved efficiently by off-the-shelf MaxSAT solvers. Experiments show that the partial MaxSAT encoding can greatly improve the efficiency of AES key recovery from corrupted key bits.

Specifically, this thesis is organized as follows.

Chapter 1 presents the background and motivation of this research, and also summarizes our main works and contributions in this chapter.

Chapter 2 provides an introduction to the preliminaries used in the remainder of the this thesis, including the basic concepts and notions related to SAT and MaxSAT, various techniques used for MaxSAT solving, and encodings that transform from a propositional formula to CNF formula. MaxSAT solving techniques play a crucial role in improving the efficiency of problem solving, and the choice of CNF encoding is as important as that of MaxSAT solving algorithms, since currently, many MaxSAT solvers are designed to solve problems represented typically in CNF formulas.

In Chapter 3, WPM is extended for handling not only positive weights but also negative weights. The original intension of the extension is to describe the real-world problems that are associated with both positive and negative values, and then employ the off-the-shelf WPM solvers to these problems. To this end, this chapter first shows the way of transforming from EWPM to the standard one, and provides a rigorous proof on the relation between EWPM and WPM solutions.

Chapter 4 presents a WPM encoding on solving the CSG problem. The encoding provided in this chapter is directly derived from the previous work by Yokoo et. al. First an overview of the previous work that is the most related to our encodings is provided, which has been shown sound and more efficient than other works. This forms the basis for the WPM encoding discussed subsequently. A procedure to encode the previous work into WPM formulas is provided, including the encoding of the basic CSG problem as well as its extension. Experimental results are used to show the efficiency and scalability of the WPM encoding.

Chapter 5 provides a brand-new WPM encoding for the CSG problem, taking advantage of the EWPM-to-WPM transformation described in Chapter 3. The notion of agent relations is introduced and the encodings of the CSG problem based on agent relations are defined. In the rest of this chapter, the WPM encoding towards solving the CSG problem with positive values and negative values are discussed step by step. Experimental data and comparison results are provided to demonstrate the effectiveness of the

proposed encoding.

In Chapter 6, two propositional logical encodings for recovering AES key schedules are provided. There are two different assumptions for key recovery, i.e., perfect assumption and realistic assumption. Perfect assumption assumes all memory bits tend to decay to the ground state after power is removed, while in the realistic assumption, the phenomenon of decaying to the ground state and flipping to the charged state may co-exist. The works for recovering the AES keys under different assumptions are analyzed. Since the realistic assumption is more suitable for the real-world case, this chapter presents two approaches for recovering AES keys under realistic assumption, respectively with SAT and partial MaxSAT solvers. Experimental results and comparisons are provided to demonstrate the effectiveness of the proposed approaches.

Finally, Chapter 7 contains a summary of this thesis and a discussion of some future research directions that may be worth exploring.

論文調査の要旨

命題論理式の真偽を決定する問題は充足可能性 (SAT) 問題と呼ばれる。MaxSAT はこれを最適化問題向けに拡張したもので、SAT が全ての節を満たす付値を求めるのに対し、MaxSAT は最多の節を満たす付値を求める。部分 MaxSAT は必ず満たすべきハード節と満たさなくともよいソフト節を対象とする。さらに、各節に重みを付加した重み付き部分 MaxSAT (WPM) は、満たされるソフト節の重みの総和が最大になるような付値を求める。本論文は、マルチエージェントシステムや暗号分野に関して、MaxSAT を用いて実世界の問題を記述し解くための CNF 符号化手法の確立を目指したものである。

マルチエージェントシステムの研究課題の 1 つである提携構造形成 (CSG) 問題は、効用の総和が最大化されるようにエージェントの集合を互いに素な部分集合 (提携) に分割する問題である。提携の効用は特性関数により記述されるが、その記述量はエージェント数に対し指数的に増加する。近年、“提携条件→利得” という形のルール集合を用いて特性関数を簡潔に記述する方法が提案された。大田らはルール間の両立可否関係を 4 種に分類し、この制約下でルールの利得の総和を最大化するルール集合を求める、混合整数計画問題として CSG 問題を定式化した。CSG 問題は組合せ最適化問題であり、正の効用に限れば正整数の重みしか許さない WPM でも定式化できる。しかし、正負の効用を持つ CSG 問題はこのままでは扱えない。

AES 等の暗号システムは検索速度向上のため暗号鍵を DRAM に格納する。しかし、DRAM の内容は、電源を落としても室温で数秒間、低温では数時間保持されるので、この

間に情報が盗まれる危険がある。Halderman, Tsow らは、電源接断時の損傷したメモリ内容から AES 鍵を復元するアルゴリズムを開発した。AES 鍵は初期鍵にビット演算を施し生成される複数のラウンド鍵からなる。鍵ビット間の関係は命題論理式で表されるので、AES 鍵復元問題は SAT 問題として定式化できる。Kamal らは、全ビットが 1 から 0 へ衰退するという仮定の下で、1 に帯電した全ビット位置およびビット間の関係をハード節として記述し、SAT ソルバーで求解することにより、従来手法より高速な AES 鍵復元を実現した。しかし、一部のビットは 0 から 1 に逆フリップするという現実的仮定の下では、SAT アプローチはうまくいかない。

本論文は、上述の CSG 問題および AES 鍵復元問題に対する効率的な MaxSAT 符号化方式を提案したものであり、以下の点で評価できる。

第一に、著者は、利便性向上のため、一般の論理式に重みが付けられ、重みとして負整数も許すように WPM を拡張した。これを EWPM と呼ぶ。そして、EWPM から通常の WPM への変換手続きを与えた。これにより、負の重みをもつ任意の命題論理式を、既製の WPM ソルバーで処理できるようになった。また、EWPM 解と EPM 解の関係を調べ、以下の点を証明した。(1)EWPM が充足可能ならば、EWPM を変換して得られた WPM も充足可能である。(2)EWPM 解の利得は、変換後の WPM 解の利得に負の重みの総和を加えたものに等しい。

第二に、著者は、CSG 問題を解くための 2 つの WPM 符号化法、ルールベース方式とエージェントベース方式を提示した。ルールベース方式は、大田らが導入した 4 種のルール関係を、重み付きソフト節とハード節を用いて忠実に WPM に符号化する。実験により、ルールベース方式は、混合整数計画を用いる先行研究に比し、ルール数が 90 のとき 2 倍、ルール数が 150 では 10 倍の計算速度を達成することを示した。エージェントベース方式は、EWPM を利用する斬新な符号化である。ルールベース方式とは異なり、2 つのエージェント (i, j) が同一提携に属する (C_{ij}) か否かという関係のみを識別する。例えば、提携条件 $a_1 \wedge a_2 \wedge \neg a_3$ (エージェント 1, 2 を含み、3 は含まない) は、 $C_{12} \wedge \neg C_{13}$ と表わされる。実験により、計算時間および符号化サイズ (変数数・節数) の両面で、エージェントベース方式はルールベース方式より効率が良く、エージェント数の増加に伴いその優位性が増すことを示した。エージェントベース方式は、ルールベース方式の計算時間とサイズを、それぞれ最大約 1/3 に短縮している。

第三に、著者は、0 から 1 への逆フリップが生じる現実的仮定の下で、破損した AES 鍵を復元するための CNF 符号化を提示した。逆フリップがあれば 1 情報は信頼できないが、従来の SAT 符号化はこのエラーを検出できない。そこで、可能な逆フリップ数と位置を逐次的に試す素朴な方法

で Kamal らの SAT 符号化を拡張した。さらに、できるだけ多くの制約を満たすという MaxSAT の特長を利用し、この問題を部分 MaxSAT 問題として符号化した。本方法では、鍵中のビット間の関係をハード節、全ての 1 をソフト節として与え、部分 MaxSAT ソルバーで求解することにより、AES 鍵を復元する。実験により、鍵長 128 ビットの復元性能に関し、逆フリップ数が多い程、MaxSAT 符号化は SAT 符号化を凌駕することを示した。衰退率 70%、逆フリップ率 0.1% で、MaxSAT 符号化は SAT 符号化よりも約 4 倍効率的である。

以上要するに本論文は、MaxSAT の利便性向上のため、重み付き MaxSAT の拡張を行うとともに、マルチエージェントシステムにおける提携構造形成問題および暗号分野における AES 暗号鍵復元問題に対する効率的な MaxSAT 符号化方式を提案し、実験によりその有効性を明らかにしたものであり、情報学に寄与する所が大きい。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 後藤 啓介
 学位記番号 シ情 博甲第 533 号 (理学)
 学位授与の日付 平成 26 年 3 月 25 日
 学位論文題名 Text Compression and Compressed String Mining
 (テキスト圧縮と圧縮文字列マイニング)

論文調査委員

(主 査)	九州大学	教授	竹田 正幸
(副 査)	〃	〃	山下 雅史
〃	〃	〃	瀧本 英二
〃	〃	准教授	坂内 英夫

論文内容の要旨

インターネット上を流通するデータ量が指数関数的に増大し、科学技術分野ではセンシング技術等の発達を背景に種々の観測・実験データが巨大化している。また、企業や機関等においては保管が必要な内部文書が増加の一途を辿っている。このような大規模データから価値ある知識を抽出し活用したいという要求が、学界のみならず産業界でも高まっている。これらのデータの多くは定まった形式を持たない非定型データ、すなわち、文字列データと捉えることができる。

通常、大規模データの処理には膨大な計算資源が必要となるため、計算対象とするデータ量を制限せざるを得ず、データを十分に利活用できないというジレンマに陥る。そこで、本研究では、「データ圧縮」を核に据え、大規模文字列データマイニングの高速化と省領域化の両方を同時に達成する手法の開発に取り組んだ。

データ圧縮とは、データに含まれる規則性や統計的性質に着目することにより冗長性を除去し、データの表現長を短くする技術をいう。データ圧縮により記憶容量や通信コストを節約することができるが、その反面、データ利用時には伸張作業が必要となる。だがもし、圧縮データを伸張することなく直接処理できれば、このオーバーヘッドは解消される。このような背景の下、「圧縮データ処理」の研究は、1990年代より今日まで世界の各所で行われている。この研究の目標は、

【目標 1】 伸張時間 + 非圧縮データ処理時間 > 圧縮データ処理時間

であり、主にパターン照合問題を対象とし様々なデータ圧縮形式について目標 1 が達成されている。一方、本研究室では、より挑戦的な目標として、

【目標 2】 非圧縮データ処理時間 > 圧縮データ処理時間

を掲げ、いくつかの圧縮形式に関してこの目標が達成できることを示した。これは、圧縮を高速化のための前処理と捉えるものであり、「圧縮による高速化」という新しい研究潮流に繋がっている。

しかしながら、圧縮データ処理の研究の多くはパターン照合問題やその変種に限られており、文字列データマイニングに関わる文字列処理については、ほとんど行われていない。そこで本研究では、文字列データマイニングに必要な文字列処理として q -グラム頻度問題およびその変種に取り組んだ。ここで、 q -グラムとは、テキストに出現する長さ q の部分文字列をいい、 q -グラム頻度問題とは、テキストに出現する全 q -グラムの頻度を求める問題をいう。 q -グラム頻度は文字列の特徴を表す重要な指標のひとつであり、機械学習や分類問題などに応用されている。圧縮による高速化と省領域化を同時に達成することを目指して、以下の 2 つの研究項目を置いた。

- (A) 圧縮テキスト上で動作する効率的な q -グラム頻度アルゴリズムの開発。
- (B) 高い圧縮率をもつ高速かつ省領域な圧縮アルゴリズムの開発。

圧縮データ形式として、直線的プログラム (Straight Line Program; SLP) を採用する。SLP は、単一の文字列を導出するチョムスキー標準型の文脈自由文法を指す。Sequitur や Re-Pair 等の文法圧縮法はもちろん、Lempel-Ziv 法などの既存圧縮法の多くは、圧縮データフォーマット自体がこの SLP とみなせるか、または、容易に SLP に変換できることが知られている。

研究項目(A)の q -グラム頻度問題について、Inenaga & Bannai は、サイズ n の SLP から q -グラム頻度を求める $O(\sigma^q qn^2)$ 時間アルゴリズムを提案した。ここに、 σ はアルファベットサイズを表す。だが、このアルゴリズムの計算時間は、圧縮サイズ n に関して多項式であるものの q に

関して指数的であるため、実用からは程遠い代物であった。本研究では、この先行研究を大きく上回る $O(qn)$ 時間アルゴリズムを開発した。非圧縮データを入力とした線形時間アルゴリズムとの比較実験により、 q が小さい場合、英語テキスト、XML、塩基配列をはじめとした様々な実データについて提案手法が高速であり、最大で 5.7 倍高速であることが判明した。すなわち、 q が小さい場合には上述の目標 2 が達成できることを示したものである。

q が大きい場合、 qn の値が非圧縮文字列長 N を超え、上述の $O(qn)$ 時間アルゴリズムは非圧縮データ上の線形時間アルゴリズムよりも遅くなってしまふ。そこで、本研究では、この問題を解決すべく、さらに高速な $O(N - \text{dup}(q, D))$ 時間アルゴリズムを開発した。ここで、 $\text{dup}(q, D)$ は圧縮データ D において捉えられた q -グラムに関する冗長性の量を表している。すなわち、圧縮アルゴリズムによって捉えられた冗長性が多ければ多いほど高速化できることを明示的に示している。これは T に冗長さが含まれている場合 ($N > n$)、非圧縮文字列に対する q -グラム頻度計算アルゴリズムの下界である $\Omega(N)$ 時間を打破するという驚くべき結果であり、理論的に目標 2 を達成したものである。

さらに、 q -グラムの出現を重複して数えない非重複 q -グラム頻度問題にも取り組み、上で得られた知見を基に、SLP 上で動作する $O(q^2n)$ 時間アルゴリズムを開発した。

研究項目(B)については、与えられた文字列を導出する最小文法を求める問題は NP 困難であることが知られており、これまで様々な近似アルゴリズムが提案されてきた。Rytter は入力文字列をいったん LZ77 法で圧縮しそれから近似率 $O(\log N)$ の SLP へと変換する $O(z \log N)$ 時間近似アルゴリズムを提案した。ここで z は LZ77 法で圧縮した時の圧縮サイズである。このアルゴリズムを大規模データに適用する際には、LZ77 圧縮にかかる時間と領域がボトルネックとなる。そこで、高速かつ省領域の LZ77 圧縮アルゴリズムを開発し、このボトルネックを解消した。

LZ77 圧縮の核となるのは、入力文字列中の位置 i について、 i から始まる部分文字列と最長一致する、 i 以前に出現する部分文字列の出現位置 $\text{PrevOcc}(i)$ とその一致長 $\text{LPF}(i)$ の計算である。既存手法の多くは、前処理においてこれらの情報を格納した PrevOcc , LPF 配列をいかに効率的に計算するかにかまかっていた。しかし、LZ77 圧縮に必要なのは、これらの配列の一部であり、必ずしも配列全体を計算する必要はない。本研究では、 PrevOcc , LPF 配列の必要な部分のみを計算するというアイデアに基づき、アルゴリズム BG3, BG4, BG5 を開発した。作業領域は、それぞれ、 $3N \log N$, $4N \log N$, $5N \log N$ ビットである。これらのアルゴリズムを実装し、既存の線形時間アルゴリズムの中で最も高速な LZOG との性能比較を行った。LZOG の作業領域は $3N \log N$ ビットである。実験結果により、BG3, BG4, BG5 のいずれもが LZOG より高速であり、特に BG5 では

最大で 2~3 倍高速であることが判明した。ほぼ同時期に、Karkkainen らは同様のアイデアを用いて作業領域 $2N \log N$ ビットのアルゴリズムを提案している。本研究では、さらに作業領域を $N \log N + O(\sigma \log N)$ ビットにまで減らしたアルゴリズム BG1 の開発に成功した。

論文調査の要旨

人類の生み出す機械可読データは増加の一途を辿っており、データ利活用技術への期待がいつそう高まっている。増加するデータの多くは、定まった形式をもたない非定型データであり、定型データを扱う従来のデータベース技術を適用できない。非定型データは、記号やイベントの連鎖、すなわち、文字列データと捉えることができる。そこで、大規模文字列データを対象としたデータ利活用基盤技術の確立が必要である。

大規模データの格納においてデータ圧縮は不可欠である。データ圧縮法の評価基準として、(1)圧縮率、(2)圧縮に要する計算量、(3)伸張に要する計算量、の三つがあるが、データの巨大化に伴って(2)の重要性が増しており、新たな圧縮法の開発が必要である。

データ圧縮によってディスク領域を節約できる反面、データ利用時には伸張作業が必要となる。そこで、圧縮データを伸張することなく直接処理する「圧縮データ処理」の研究が行われるようになった。既存研究の多くは、文字列パターン照合問題及びその様々な変種を対象とし、効率の良いアルゴリズムを提案している。だが、データに特徴的なパターンを発見する文字列パターン発見等に関わる研究は、ほとんど行われていない。

圧縮データ処理に適した圧縮スキーマとして文法圧縮がある。文法圧縮では、入力文字列からそれを一意に生成する SLP を作成し、適当な方法で符号化する。ここで、SLP (Straight-line Program) とは、単一の文字列を生成するチョムスキー標準形の文脈自由文法をいう。多くの圧縮法において、その出力は、SLP そのものと見なせるか、または、簡単に SLP へ変換できる。圧縮データ処理の研究では、SLP を入力とすることが一般的である。

本研究は、(A) SLP 上で動作する q グラム頻度計算アルゴリズムの開発、および、(B) 省領域な線形時間文法圧縮アルゴリズムの開発、という二つの課題に取り組んだもので、次の点で評価できる。

第一に、課題 (A) について、 q グラム頻度問題をとりあげ、SLP 上で動作する効率的アルゴリズムの開発を行っている。ここで、 q グラム頻度とは、文字列データ中に出現するすべての q グラム (長さ q の部分文字列) の頻度をいう。 q グラム頻度は文字列データの特徴を表す重要な指標の一つであり、機械学習や分類問題などに応用されている。入力 SLP を D 、 D の生成する文字列を T 、アルファベットを Σ とする。先行研究は $O(q |\Sigma|^q / D^2)$ 時間を要する。本研究

では、これを劇的に改善する $O(q/D)$ 時間アルゴリズムを開発している。また、実用面では、非圧縮データ上の $O(T)$ 時間アルゴリズムと比較し、 q が小さい場合には提案アルゴリズムが高速であることを計算機実験により示している。圧縮データ処理研究の目標は、伸張時間と非圧縮データ処理時間の和と比べて圧縮データ処理時間を短くすること (目標 1) であるが、より挑戦的な目標として、非圧縮データ処理時間と比べて圧縮データ処理時間を短くすること (目標 2) がある。本研究成果は、 q グラム頻度問題について初めて目標 2 を達成しており、高く評価できる。

第二に、上述の $O(q/D)$ 時間アルゴリズムを改良している。このアルゴリズムは、 q が大きい場合、非圧縮データ上の $O(T)$ 時間アルゴリズムよりも遅くなる。そこで、隣接木という新たなデータ構造を用いることにより、 $O(T/\text{dup}(q, D))$ 時間アルゴリズムを開発している。一般に、 $T/\text{dup}(q, D) \leq 2(q-1)/D$ であるため、このアルゴリズムは q の値によらず $O(q/D)$ 時間アルゴリズムより効率が良い。また、 $\text{dup}(q, D)$ は入力 SLP D において除去された q グラムに関する冗長性の量を表すことから、 $O(T/\text{dup}(q, D))$ という計算時間は、圧縮アルゴリズムの捉えた冗長性が多いほど高速化できること、すなわち「圧縮による高速化」を直接的に示しており、本研究成果の当該分野における貢献は極めて大きい。

第三に、(B) の課題として、新たな LZ77 圧縮アルゴリズムの提案により文法圧縮の効率化に貢献している。与えられた文字列を導出する最小文法を求める問題は NP 困難である。Rytter による近似アルゴリズムは、入力を LZ77 法で圧縮した後に SLP へと変換するもので、入力文字列長を N とするとき、近似率 $O(\log N)$ をもち $O(N)$ 時間で動作する。大規模データに適用する際には、LZ77 圧縮に要する時間と領域がボトルネックとなる。本研究では、 $O(N)$ 時間で動作する LZ77 圧縮アルゴリズムとして最も省領域なアルゴリズムの開発に成功している。LZ77 圧縮においては、サイズ N の整数配列を複数個用いるが、本研究では、単一の配列を複数の用途に使い回す手法を開発し、作業領域を $N \log N + O(|\Sigma| \log N)$ ビットに減らすとともに、計算機実験によりその有効性を示している。本研究成果は、文字列の組合せ的性質に関する新たな知見によって初めて可能となったものであり、データ圧縮分野における貢献は大きい。

以上要するに本研究は、圧縮データ上で動作する q グラム頻度アルゴリズムについて理論と実用の両面から効率化を行い、また、線形時間 LZ77 圧縮アルゴリズムの省領域化を行ったもので、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 末廣 大貴
 学位記番号 シ情 博甲第 534 号 (情報科学)
 学位授与の日付 平成 26 年 3 月 25 日
 学位論文題名 Efficient Learning Algorithms for
 Rankings and Other Combinatorial
 Concept Classes
 (ランキング及び組み合わせ論的概念
 クラスに対する効率的な学習アルゴ
 リズム)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 瀧本 英二
 (副 査) " " 竹田 正幸
 " " " 竹内 純一
 " " 准教授 来嶋 秀治

論文内容の要旨

近年、情報検索、商品推薦、金融リスクの予測、スケジューリングなど様々な分野において、アイテム間の順位を推定するランキング学習の技術が注目されている。これらの分野では訓練データが膨大であるため、得られるランキングの精度が高いだけでなく、ランキングが得られるまでの計算効率が良いことが、学習アルゴリズムに求められる重要な要件となっている。本論文は、統計学習およびオンライン予測と呼ばれる 2 つの理論的な学習モデルのもとで、ランキングに関する効率の良い学習アルゴリズムの設計法について論じたものである。

統計学習モデルにおいては、ランキング関数を学習する問題として、最も基本的な二部ランキング問題を取り上げる。二部ランキング問題とは、正のラベルが付いた事例(正例)および負のラベルが付いた事例(負例)からなる訓練サンプルが与えられたとき、負例よりも正例に大きい値を与えるような事例空間上の実数値関数(ランキング関数)を求める問題である。この問題は、正例と負例の直積空間上の二値分類問題に帰着できることが知られており、この帰着関数とサポートベクターマシン(SVM)などの適当な二値分類学習アルゴリズムを組み合わせることにより、性能が理論的に保証された二部ランキングアルゴリズムが得られる。この手法はランキング SVM と呼ばれ、広く用いられている。しかし、ランキング SVM には、帰着の過程でサンプルの大きさが 2 乗のオーダーで増大してしまうという問題がある。すなわち、学習アルゴリズムとして 1 ノルム正則化 SVM や 2 ノルム正則化 SVM を用いるとすると、ランキング関数を求めるためには、元のサンプルのサイズを m としたとき、それぞれ $O(m^4)$ の大きさの線形計画問題や 2 次計画問題を解く必要があり、 m が大きいとき極めて効率が悪い。本論文では、SVM による定式化を見直すことにより、2 部ランキング問題を $O(m^2)$ の大きさの最適化問題として定式化し、大幅に計算量を削減す

ることに成功した。さらに、得られたランキング関数の汎化性能に関して理論的な保証を与えた。特に、1 ノルム正則化ランキング SVM を再定式化することによって得られたアルゴリズムは、元の 1 ノルム正則化ランキング SVM に匹敵する性能を持つ初めての実用的なアルゴリズムである。

ランキング学習の応用研究として、本論文では、プロ棋士の対戦記録である膨大な棋譜データから将棋の評価関数を構築する問題に取り組んだ。棋譜データに現れる局面を正例、現れない局面を負例と考えることにより、この問題は、局面を事例空間とする二部ランキング学習の問題とみなすことができる。このように、コンピュータ将棋の分野では、機械学習の技術を用いて局面の評価関数を自動獲得する手法が発達し、その強さがプロ棋士に匹敵するほどに至っている。しかし、局面の特徴ベクトルを構成する評価項目をどのように設計するか、すなわち、特徴抽出の問題は依然として大きな問題である。従来、各評価項目の設計は手動で行われているため、得られる評価関数は、結果として作成者の棋力や感覚に強く依存するものとなっている。そこで本研究では、カーネル法と呼ばれる技術を用いて、 $10^{13} \sim 10^{14}$ に及ぶ複雑な評価項目を網羅的に自動生成する手法を提案した。さらに本論文で開発した効率の良い 2 部ランキング学習の手法と組み合わせることで、実時間で評価関数の学習を行うアルゴリズムを開発した。いくつかの予備実験では、本提案手法が有望であることを示唆する結果を得ている。

オンライン予測問題とは、株式投資のように、予測に基づく意思決定と、環境からのフィードバックの開示が逐次的に繰り返される意思決定問題である。各試行において、アルゴリズムは自らの決定と環境からのフィードバックによって定まる損失を被る。アルゴリズムの目標は、累積損失を最小化することである。情報検索や推薦システムなどの多くの問題は、ランキング、すなわち、あるアイテム集合上の順列のクラスを決定空間とするオンライン予測問題としてモデル化することができる。同様に、多くの自然なオンライン組み合わせ最適化問題は、対応する組み合わせ集合を決定空間とするオンライン予測問題としてモデル化できる。例えば、ある固定されたグラフ上の道や全域木のクラスを決定空間とすることにより、それぞれオンライン最短路問題やオンライン最小全域木問題が得られる。このようなオンライン予測の問題に対し、射影および分解と呼ばれる幾何的な操作を用いる一般的なアルゴリズム設計スキームが知られている。しかし、順列、道、全域木などの組み合わせ構造を予測の対象とする場合、概念クラスの大きさが指数的となるため、射影と分解を多項式時間で実現するアルゴリズムが存在するか否かは自明ではなく、クラスごとに個別にアルゴリズムを設計する必要があった。そこで本論文では、組み合わせ構造の広いクラ

スに対し、劣モジュラ最適化の手法に基づき、射影と分解を多項式時間で実現するアルゴリズムを与えた。このクラスは、順列、全域木、 k 部分集合族などを部分クラスとして含むため、これら多くの組み合わせ構造のクラスに適用可能な、世界初の統一的なオンライン予測アルゴリズムが得られたことになる。

論文調査の要旨

近年、情報検索や商品推薦など様々な分野において、順位を推定するランキング学習の技術が注目されている。これらの分野では訓練データが膨大であるため、得られるランキングの精度が高いだけでなく、学習に要する計算効率が良いことが、学習アルゴリズムに求められる重要な要件となっている。本論文は、統計学習およびオンライン予測と呼ばれる2つの理論的な学習モデルのもとで、ランキング及びランキングを一般化した組み合わせ論的概念のクラスに対する効率の良い学習アルゴリズムの設計に取り組んだもので、以下の3点で評価できる。

第一に、統計学習モデルにおいて最も基本的な二部ランキング問題に対し、計算効率を著しく改善したアルゴリズムを提案している。二部ランキング問題とは、正例および負例からなる訓練サンプルが与えられたとき、負例よりも正例に大きい値を与えるような事例空間上の実数値関数（ランキング関数）を求める問題である。この問題は、正例と負例の直積空間上の二値分類問題に帰着できることが知られており、代表的な二値分類学習アルゴリズムであるサポートベクターマシン (SVM) を適用することにより、汎化性能が理論的に保証された二部ランキングアルゴリズムが得られる。しかし、この手法は、帰着の過程でサンプルの大きさが2乗のオーダーで増大してしまうため、計算効率が悪いという問題がある。本論文では、二部ランキング問題をサンプルの増大を伴わない最適化問題として定式化することにより、計算量を従来手法の平方根程度に抑えつつ、従来手法に匹敵する汎化性能を持つアルゴリズムの構築に成功している。本手法は特に、疎な線形ランキング関数を導出するものとしては初めての実用的なアルゴリズムと言えるものであり、高く評価できる。

第二に、大規模データに対するランキング学習の応用研究として、膨大な棋譜データから将棋の局面評価関数を構築するプログラムを開発している。コンピュータ将棋の分野では、機械学習の手法を用いて局面の評価関数を自動獲得する手法が発達し、その強さがプロ棋士に匹敵するほどに至っているが、二部ランキングによる理論的アプローチは本研究が初めてである。また、本論文では、局面の特徴ベクトルを構成する評価項目の設計問題にも取り組んでいる。従来、各評価項目の設計は手動で行われているため、得られる評価関数は、結果として作成者の棋力や感覚に強く依存するものとなる。本論文では、カーネル法を用いて、

基本となる単純な評価項目から、その組み合わせにより $10^{13} \sim 10^{14}$ に及ぶ複雑な評価項目を網羅的に自動生成する手法を提案し、プログラムに実装している。いくつかの予備実験では有望な結果を得ており、人工知能分野における貢献として評価できる。

第三に、オンライン予測モデルのもとで、ランキングを含む、組み合わせ論的概念クラスの広い族に対する、統一的で効率の良いアルゴリズムを構築している。オンライン予測とは、株式投資のように、意思決定と、環境からのフィードバックの開示が逐次的に繰り返される意思決定過程である。情報検索や推薦システムなどの多くの問題は、ランキング、すなわち、あるアイテム集合上の順列のクラスを決定空間とするオンライン予測問題としてモデル化することができる。同様に、多くの自然なオンライン組み合わせ最適化問題は、対応する組み合わせ論的概念のクラスを決定空間とするオンライン予測問題としてモデル化できる。このようなオンライン予測の問題に対し、射影および分解と呼ばれる幾何的な操作を用いる一般的なアルゴリズム設計スキームが知られている。しかし、順列、道、全域木などの組み合わせ論的概念を予測の対象とする場合、概念クラスの大きさが指数的となるため、射影と分解を多項式時間で実現するアルゴリズムが存在するか否かは自明ではなく、クラスごとに個別にアルゴリズムを設計する必要があった。本論文では、組み合わせ論的概念クラスの広い族に対し、劣モジュラ最適化の手法に基づき、射影と分解を多項式時間で実現するアルゴリズムを与えている。これは、ランキングを含む多くの組み合わせ論的概念クラスに適用可能な、世界初の統一的なオンライン予測アルゴリズムであり、当該分野における貢献は極めて大きい。

以上要するに本論文は、二部ランキング学習アルゴリズムの効率化と将棋の局面評価関数構築への応用、およびランキングを含む組み合わせ論的概念クラスの広い族に対する統一的な多項式時間オンライン予測アルゴリズムの開発を行ったもので、情報科学に寄与する所が大きい。よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文に値するものと認める。

氏名 谷口 雄太
 学位記番号 シ情 博甲第 535 号 (情報科学)
 学位授与の日付 平成 26 年 3 月 25 日
 学位論文題名 構造化・非構造化データの特異な部分構造の検出

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 池田 大輔

論文内容の要旨

人類が蓄積しているデータは膨大な量に及んでおり、この蓄積を利活用するための基盤技術の確立が強く求められている。これらのデータは、内容・形式ともに多岐に渡っているが、大きく構造化データと非構造化データの2つに分けられる。非構造化データには、例えば文書などのテキストデータ、音声データや自然現象を観測した時系列データなどがある。これらは明示的には構造をもたず、連続した記号や事象などの単純な列、すなわち、文字列と見なすことができる。他方、構造化データには、例えば原子同士の結合を表す分子構造、論文の共著関係など人間同士の関係を表すソーシャルネットワークなどがある。こうした明示的な構造をもつデータの多くは、異なる2つの実体間の関係を集めたもの、すなわち、グラフと見なすことができる。今日では、文字列とグラフは、計算機科学において様々なデータを抽象的に取り扱うための基本的な表現として用いられている。

大量データ利活用のためには、構造化・非構造化データのどちらにおいても、データの中に埋没したより高次の部分構造を捉えることが重要である。例えば、テキストデータは文字の並びであるが、その意味を把握する場合には単語の列と見なす必要があり、さらに高次の意味を捉えるためには、文の列など、より高次の構造について解析する必要がある。同様に、例えば、ソーシャルネットワークの中に築かれるコミュニティを見つけることは社会学、マーケティングにおいて有用である。

こうした部分構造の検出に関する既存研究の多くは、部分構造のもつ特異性に基づいて検出を行っている。これら既存手法は、専門家による領域知識を利用するものとそれ以外とに分けられる。前者のアプローチでは、領域知識を活用することで精度が高くなる反面、コストが高く、未知のデータに対応できないという問題がある。一方、後者のアプローチでは、大きなコストをかけず未知データを含む様々なデータに普遍的に適用でき、より発見的な結果を期待することができる。本研究では、構造化・非構造化データそれぞれに対し、データに隠れた部分構造を後者のアプローチで検出する問題に取り組んだ。その結果、(1) Purity 尺度によるゲノム配列上の水平伝播遺伝子の発見、(2) アルファベットサイズの大きい文字列に対する Purity 尺度の改良、(3) ノイズに対し頑健なグラフクラスタリング手法の提案、という研究成果をあげた。

(1)では、文字列の部分文字列の特異性を測る尺度として、Yamada ら(2012)によって提案された Purity 尺度に着目し、複数の細菌ゲノムの配列において Purity 尺度が水平伝播遺伝子と呼ばれる遺伝子の特徴付けることを明らかにした。細菌などの微生物には、通常の生殖とは異なる遺伝子伝播メカニズムである水平伝播が存在する。水平伝播により獲得された遺伝子を特定することは、ゲノムの理解や進化の

過程の解明に繋がるため重要視されている。本研究では、実験および配列マップや配列注釈を用いた評価を通して、RNA やトランスポゾン、モバイルエレメントやファージなど、水平伝播したと考えられる遺伝子が、Purity 尺度により高いスコアを与えられることを確かめた。

(2)では、短い部分文字列に対する Purity 尺度の問題点を指摘し、それを克服した新しい尺度である Atomicity 尺度を提案した。ゲノム配列は4種類程度の記号により記述されるため、解析の対象となるのは比較的長い部分文字列である。一方、英文テキストなどの文字列データではより多くの記号が使われており、情報が短い文字列で記述されるため、比較的短い部分文字列も解析の対象としなければならない。対象となる部分文字列が短い場合、Purity 尺度の値が特定の値に集中するため短い部分文字列をうまく差別化できないという問題がある。本研究で提案した Atomicity 尺度は、この問題を改善したものである。英文テキスト中の単語を文字とみなした実験により、Purity 尺度では差別化できない部分文字列が Atomicity 尺度によって差別化できることを確認した。

(3)では、グラフの頂点のクラスタリング問題に対し、巨視的構造と呼ぶ粗視化されたグラフを導入することで、既存手法と比べてノイズに頑健な手法を提案した。グラフクラスタリング問題として定式化される種々の問題の中には、クラスタ間に多数の辺(ノイズ)があるグラフを扱わなければならない場合がある。本研究では、巨視的構造と呼ぶクラスタ間の関係性を記述するグラフの導入により、クラスタ間の辺の絶対数に左右されず、クラスタ間およびクラスタ内の辺密度の差のみに依存する手法を提案した。人工データおよび実データを用いた実験から、提案手法がノイズの多いグラフ上において既存手法を凌ぐ性能をもつことが示された。

論文調査の要旨

機械可読データが増加の一途を辿っており、データ利活用のための基盤技術の確立が強く求められている。DNA 配列、テキストデータ、時系列データなどのデータは、明示的な構造をもたず、記号、単語、イベントなどの単なる連鎖、すなわち、文字列と見なすことができる。一方、分子構造、Web のリンク情報、ソーシャルネットワークなどのデータは、グラフと見なすことができる。文字列とグラフは、それぞれ、計算機科学において最も基本的なデータ表現である。

文字列とグラフのいずれにおいても、データ中に潜む特異な部分構造を抽出することは重要である。例えば、DNA 配列において特定の遺伝子に対応する部位を同定することはゲノム研究において重要な作業である。また、ソーシャルネットワークの中からコミュニティを見出すことは、社会科学的研究やマーケティング戦略において有用である。

機械学習手法を用いて特異な部分構造の検出を行う場合、教師付きと教師無しの二つのアプローチが考えられる。教師付きのアプローチでは、部分構造の特異性に関する十分な量の訓練例が必要である。しかし、例えば、DNA 配列における水平伝播遺伝子の検出では、大腸菌の配列については解析が進んでいるものの、その他の生物についてはほとんど手つかずの状態であり、学習に十分な量の訓練例を用意できない。したがって、教師無しのアプローチを取らざるを得ない。

本研究は、文字列データとグラフデータのそれぞれに対し、データの特異な部分構造を教師無しアプローチで検出する問題に取り組んだもので、次の点で評価できる。

第一に、Purity 尺度による DNA 配列上の水平伝播遺伝子の検出手法を提案している。本研究では、文字列中における部分文字列の特異性を定量化する尺度として Yamada らの Purity 尺度に着目し、複数の細菌ゲノムの配列において Purity 尺度が水平伝播遺伝子を特徴付けることを明らかにしている。すなわち、配列マップや配列注釈を用いた評価を通して、RNA やトランスポゾン、モバイルエレメントやファージなど、水平伝播したと考えられる遺伝子が、高い Purity 尺度の値をもつことを示している。通常の生殖と異なる遺伝子伝播メカニズムである水平伝播は、主として真核生物に見られるが、その特定はゲノムの理解や進化の過程の解明に繋がるため重要視されており、本研究結果のバイオインフォマティクス分野への貢献は大きい。

第二に、Purity 尺度の頑健性を高めた Atomicity 尺度を新たに提案している。Purity 尺度は、対象となる部分文字列を構成する部分文字列が他で生起しているか否かに敏感すぎるという欠点をもつ。そこで、本研究では、この感度を緩めた新しい尺度として Atomicity 尺度を提案している。英文テキストを用いた実験により、固有名詞となる語句や慣用的な表現を検出できることを示している。この結果は、提案した尺度のテキストマイニング等への応用可能性を示唆しており、高く評価できる。

第三に、ノイズに対して頑健なグラフクラスタリング手法を提案している。提案手法は、巨視的構造と呼ぶクラスタ間の関係性を記述するグラフの導入に基づくもので、その性能は、クラスタ間の辺の絶対数に左右されず、クラスタ間およびクラスタ内の辺密度の差のみに依存する。人工データおよび実データを用いた実験により、提案手法がノイズの多いグラフ上において既存手法を凌ぐ性能をもつことを示している。グラフクラスタリングとして定式化される現実の問題では、クラスタ間に多数の辺（ノイズ）を含むグラフを扱わざるを得ない場合が多く、提案手法はそのような場合に有効な方法として高く評価できる。

以上要するに本研究は、文字列とグラフという基本的なデータ表現を対象とし、文字列に対しては、部分文字列の特異性を定量化する指標を用いて分子生物学の問題に適

用しその有効性を示すとともにその指標の改善を行い、一方、グラフに対しては、ノイズに頑健なグラフクラスタリング手法を開発したもので、情報科学に寄与する所が大きい。よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文に値するものと認める。

氏 名 矢田部 暎
 学位記番号 シ情 博甲第 536 号（工学）
 学位授与の日付 平成 26 年 3 月 25 日
 学位論文題名 表面プラズモン共鳴免疫センサによる爆薬成分の高感度検出

論文調査委員

（主 査） 九州大学 教授 都甲 潔
 （副 査） " " 圓福 敬二
 " " " 興 雄司

論文内容の要旨

2001 年の米国同時多発テロ以来、世界ではテロの脅威が増している。その様な犯罪では爆発物が多く用いられ、多くの人々が犠牲になっている。爆発物の痕跡を検知することが出来ればこの様な犯罪の防止に役立つと考えられる。そこで爆発物から発せられる爆薬成分に対して高感度・高選択性を有するセンサの開発が求められる。この様な要件を満たすセンサとして生物の免疫反応の一つである抗原抗体反応と表面プラズモン共鳴（SPR: Surface Plasmon Resonance）を併用した SPR 免疫センサを用いた。このセンサでは抗原抗体反応を用いることで高選択性を実現し、SPR センサを用いることで高感度を実現している。本研究では抗原抗体反応の反応場を 3 次元的に配置したポリマー表面を用いて高感度化を目指した。検出対象は 2,4,6-トリニトロトルエン(TNT)で標準的な爆薬として用いられる化合物である。本研究ではこの TNT を SPR 免疫センサのポリマー表面と TNT 抗体を用いて測定した。本論文は全 5 章からなり、以下のその概要を述べる。

第 1 章では本研究の背景や目的について上記の様な説明を行った。また測定に用いる SPR センサについて基本原理から実際に用いるセンサの構造などの説明を行った。センサ表面の作製技術である自己組織化単分子膜(SAM: Self-Assembled Monolayer)やアミンカップリング反応の説明も行った。また測定原理である抗原抗体反応についても説明を行った。

第 2 章では実際の測定法と測定に影響を及ぼす要因について述べた。実際の測定法として間接競合法と置換法を用いた。これらの方法は TNT 類似物質をセンサ表面に固定し、TNT 抗体が TNT 類似物質を認識しセンサ表面と特異的な吸着することを利用して TNT の検出を行う。間接競合法は抗体と抗原の混合溶液をセンサ表面に流通させる

と抗原と結合した抗体は特異的結合ではセンサ表面に結合し難くなることを利用して抗原の測定を行う。置換法ではセンサ表面に結合された抗体の解離速度が抗原の存在によって加速されることを利用して測定を行う。これらの方法では抗体とセンサ表面の親和性は抗体と抗原の親和性より低いことが重要となる。

次に測定に影響を及ぼす要因として非特異吸着について述べた。本研究では抗体は抗原抗体反応の特異吸着によってセンサ表面に吸着し、抗原によってその様な吸着が阻害されることを利用して抗原濃度を測定している。従って抗体が抗原抗体反応によらない非特異的吸着でセンサ表面に吸着すると SPR センサはそれらを区別することが出来ないのが高感度検出は難しくなる。そのため非特異吸着を抑制する必要がある。この非特異吸着を抑制するためには電気的に中性かつ親水性のセンサ表面を作製する必要がある。

第 3 章では軍用爆薬ではプラスチック爆弾として用いられる RDX の高感度検出について述べた。まず RDX 類似物質とタンパク質のコンジュゲートを作製し、これをラットに免疫した後、ハイブリドーマ細胞を作製することで抗 RDX ラットモノクローナル抗体を得た。次にオリゴエチレングリコール鎖を持つ SAM を用いて RDX 類似物質をセンサ表面に固定することで非特異吸着が起り難い SPR 免疫センサ表面を作製した。このセンサ表面を用い間接競合法の実験条件を最適化することで RDX の高感度検出が可能となった。

第 4 章では更なる高感度化を目指して抗原類似物質を 3 次元的に配置したポリマー表面の作製を検討した。そこでラジカル重合によるビニル系ポリマーを用いた TNT の高感度検出について述べた。まず N ビニルホルムアミド (NVF) よりラジカル重合でポリ N ビニルホルムアミド (poly-NVF) を得た後、これを加水分解することで側鎖にアミノ基を持つポリビニルアミン (poly-VAm) を得た。この poly-VAm をセンサ表面に固定し poly-VAm 上に TNT 類似物質を固定してセンサ表面を作製した。この表面に対して TNT 抗体の吸着量を評価したところ、高い吸着量が得られたが、同時に非特異吸着も大きいことが分かった。poly-VAm の加水分解率を変更し poly-NVF-co-VAm とすることでポリマーの帯電を抑えた。この poly-NVF-co-VAm を用いてセンサ表面を作製すると非特異吸着が抑制され、TNT の検出を間接競合法にて行ったところ検出限界は 28ppt となった。

第 5 章では表面開始原子移動ラジカル重合 (SI-ATRP) を用いたセンサ表面による TNT の高感度検出について述べた。この方法ではセンサ表面の SAM から直鎖状ポリマーが成長し、このポリマー上に TNT 類似物質が固定された。ここでは MES (mono-2-(methacryloyloxy)ethylsuccinate) と DEAEM (diethylaminoethylmethacrylate) の混合モノマーと

MES と HEMA (2-hydroxyethylmethacrylate) の混合モノマーを用いて 2 種類の表面を作製した。まず MES と DEAEM の混合モノマーから作製した poly-MES-co-DEAEM では電気的に負の電荷を持つ MES と正の電荷を持つ DEAEM を混合し混合比を制御することで非特異吸着の少ない poly-MES-co-DEAEM 表面が得られた。次に SI-ATRP の開始点となる SAM とそうでない SAM の混合 SAM を用いてポリマーの密度を変化させて親和性の制御を試みた。その結果、SI-ATRP の開始点となる SAM の混合比が大きいくほど解離速度定数が大きくなった。またこれらの表面を用いて間接競合法にて TNT の検出を行ったところ、検出限界は 5.7ppt となった。

次に MES と HEMA の混合モノマーから作製した poly-MES-co-HEMA 表面について検討した。この表面では負の電荷を持つ MES に対して電気的に中性かつ親水性の HEMA を混合することで非特異吸着の抑制を試みた。MES に対して 10 倍以上の HEMA を混合することで非特異吸着を抑制できた。次に TNT 類似物質は MES に固定されるが、MES と HEMA の混合比を変化されることで表面に固定される TNT 類似物質の量を制御し、センサ表面と抗体の親和性制御を試みた。また置換法にて TNT の検出を行った。HEMA の混合比が大きくなるほど解離速度定数も大きくなり、TNT の検出限界も低かった。最も低い検出限界で 0.4ppb が得られた。

第 6 章では第 1 章から第 5 章まで研究の総括が行われた。今回の研究を通して最も高感度に TNT を検出できたのは SI-ATRP にて作製した poly-MES-co-DEAEM 表面を用いて間接競合法にて測定を行った場合で検出限界は 5.7ppt だった。

論文調査の要旨

2001 年の米国同時多発テロ以来、世界ではテロの脅威が増している。その様な犯罪では爆発物が多く用いられ、多くの人々が犠牲になっている。そこで爆発物の発する爆薬成分を高感度に検出できるセンサの開発が求められる。本研究では、抗原抗体反応と表面プラズモン共鳴 (SPR) を用いた SPR 免疫センサを用いて爆薬成分の高感度検出を試みた。この SPR 免疫センサのセンサ表面では抗原抗体反応ではない非特異吸着が起り難く、抗体とセンサ表面の親和性が適切であることが高感度検出にとって重要となる。これまでの研究では、オリゴエチレングリコールを用いてセンサ表面を作製することで、センサ表面の非特異吸着を抑制した。また作製に用いる抗原類似物質を選択することで適切な親和性を得て爆薬成分である 2, 4, 6-トリニトロトルエン (TNT) の高感度検出を行っていた。

この研究ではまずこの技術を用いて爆薬成分の一つである RDX (Research Department Explosive;

1, 3, 5-trinitroperhydro-1, 3, 5-triazine) の検出を行った。ここでは RDX の抗体の作製から行った。オリゴエチレングリコール鎖を持つ自己組織化単分子膜を用いて RDX 類似物質を表面に固定し非特異吸着を抑制した。この表面を用いて RDX の検出を行ったところ検出限界は 40 ppt となった。

次に更なる高感度化を目指しポリマーを用いてセンサ表面の 3 次元化を試みた。ここでは TNT の検出を行った。最初にポリマーとしてポリビニルアミン (poly-VAm) を用いた。この poly-VAm を表面に固定し, poly-VAm 上に TNT 類似物質を固定した。このセンサ表面を用いて TNT 抗体の吸着量を測定したところ高い吸着量が得られたが, 非特異的な吸着も多いことが分かった。そこで poly-VAm の作製条件を変更し, その前駆体であるポリ N ビニルホルムアミド (poly-NVF) との共重合ポリマーを作製し, これを用いてセンサ表面を作製した。この共重合体により非特異吸着が抑制され, TNT の検出を行ったところ検出限界は 28 ppt となった。

次にポリマー表面の作製法として表面開始原子移動ラジカル重合を用いた。この重合法はセンサ表面を起点として直鎖状ポリマーが成長し, 反応時間に応じてポリマー鎖の長さが長くなるという特徴を持つ。TNT 類似物質はそのポリマー上に固定される。二種の異なるモノマーからなる混合モノマーを用いてこの重合法を行うことでポリマー表面を得た。この混合モノマーの混合比を変えることでポリマー表面の組成を制御した。これにより親水性かつ電的に中性なポリマー表面が実現でき, センサ表面への非特異吸着を抑制した。またポリマーの組成や作製方法を制御することでセンサ表面と TNT 抗体の親和性を制御した。親和性を制御した表面を用いて TNT の検出を行ったところ, その検出限界は 5.7 ppt となった。

以上要するに本論文は, 表面プラズモン共鳴免疫センサによる爆薬成分の高感度検出を目指して爆薬成分である RDX や TNT の検出を行い, またセンサ表面としてポリマー表面を用いることでセンサ表面の非特異吸着の抑制及び抗体との親和性制御を行い, TNT の超高感度検出を可能としており, 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) の学位に値するものと認める。

氏 名 吉村 友志
 学位記番号 シ情 博甲第 537 号 (工学)
 学位授与の日付 平成 26 年 3 月 25 日
 学位論文題名 非分散赤外吸収法 CO₂ 計を応用した
 自動車排出ガス高精度分析装置の開発
 に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 岡田 龍雄

(副 査) " " 白谷 正治
 " " " 村瀬 英一

論文内容の要旨

自動車を構成するモジュールの中でも特に重要な役割を持つパワートレイン部分の開発において, エンジンから排出されるガスの中に含まれている気体, または粒子状物質の性状や量を計測することは重要な意義を持つ。環境保全のため世界各国で制定されている規制要求値を満足しているかどうかの確認, 運転効率が最大となる各デバイスの制御量の決定, 組み込まれる部品の個々の特性および組み合わせ特性の計測と最適化等を実施するには, 排出ガスの分析は必要不可欠な情報となる。しかし, エンジン排出ガスはガスと粒子が混在する複雑な組成を持ち, 温度や圧力などの状態変動が激しいため, 計測が困難な対象であると言える。したがって, 計測前の処理や計測手法自体に工夫や専用の設計が必要となる。同時に, 自動車排出ガスラインの後処理装置の進化や制御の複雑化が進むにつれて, 計測器にも精度向上や計測時間の短縮といった高性能化が継続して求められている。

本研究では, 粒子状物質 (PM) 計測装置と排出ガス再循環 (EGR) 率計測装置, 排出ガス流量計測装置の三種類の計測に注目し, 計測精度の向上と計測時間の短縮を目的として, それぞれに新しい計測方式を提案している。まず, PM 計測では計測精度の向上と大幅な計測時間短縮を実現している。また, 加熱型非分散赤外吸収 (NDIR) を用いた 2 ライン CO₂ 計測装置を開発し, 水分含有状態での EGR 率計測および排出ガス流量計測への応用を世界で初めて実現している。こうした新しい計測手法の提案と同時に, 計測精度の向上や応答時間の短縮も実現した。本論文は, これらの成果をまとめたもので, 以下の 6 章から構成される。

第 1 章は緒論であり, 本研究の背景となる排出ガス計測の動向, および計測における課題と本論文の意義を述べている。

第 2 章では, 本研究で注目した計測手法について説明している。PM 計測装置と EGR 率計測装置, 排出ガス流量計測装置に関して, それぞれの技術の歴史および動向, その計測技術とその課題について詳述している。

第 3 章では, 低重量 PM 装置の開発において, 低重量 PM の分離計測の実現を目指して装置構成の検討と検証を行っている。低重量計測を実現するために, 計測誤差の要因となる酸素の混入箇所と混入源の低減が必要であることを突き止め, 本現象の検証を流体シミュレーションと試験により行った。これより装置構成を検討し, 酸素混入の影響が最小限になるよう装置の設計に反映した。この研究の成果として, PM 計測において可溶性有機成分 (SOF), すず (Soot) の低重量域での高精度分離計測を実現しなが

ら、かつ大幅な計測時間の短縮が可能な気化方式 PM 計測装置を開発している。結果として、酸素混入の影響を取り除く前よりも、80%低いサンプル重量域において高精度で計測できる装置を実用化している。

第 4 章では、水分含有状態のガスを計測して EGR 率計測や排出ガス流量計測ができる装置について検討している。通常、非分散赤外吸収 (NDIR) 方式では水分干渉影響を受けるために、前処理として水分除去を行う。この方式では、乾燥濃度から湿り濃度に変換するときに誤差が発生しやすいため、精度面で課題がある。加熱型 NDIR 式 CO₂ 計を応用した水分含有状態でのガスを測定する EGR 率計測装置は前例がない。そのため、サンプルライン、計測部ともに水分含有ガスを計測できる EGR 率計測装置として最適化を行った。水分が共存することにより発生する CO₂ 吸収スペクトルの変化は、ガス分子レベルでの現象であり、水分共存影響と呼ばれる。この現象は、装置側で影響を取り除くのが困難であるため、水分濃度を直接計測し演算処理により影響を補正する手法を確立している。

第 5 章では、前章で検討した計測装置に対して、初めに既知濃度のボンベガスによる性能試験を行っている。ノイズ、再現性などの基本性能評価を行った結果、排出ガスの濃度分析に適切な性能を有していることを実証している。また、水分干渉の影響・水分共存の影響についても試験ガスにて確認を行い、前章で検討した補正機能が適切に動作していることを確認した。次に、実排出ガスを用いて、EGR 率計測と排出ガス流量計測を行った。EGR 率計測において、エンジンが定常運転時、過渡運転時ともに、従来装置より応答良く高精度な計測をできることが試験により明らかになった。また、排出ガス流量計測においても従来装置と比較して高精度な計測をできることがわかった。これらは、排出ガス流路内で結露する水分により発生する測定誤差を取り除いたことに起因することが示された。

第 6 章では、本研究で得られた成果をまとめ、各計測手法における今後の展望を述べている。

論文調査の要旨

自動車のパワートレイン開発において、エンジンから排出される有害ガス、または粒子状物質の性状や量を計測することは地球環境を守る上で重要な意義を持つ。環境保全のため世界各国で制定されている規制要求値を満足しているかどうかを確認し、有害物質の放出を低く保ったままエンジンの運転条件を最適化するためには、排出ガスの分析は必要不可欠な技術である。しかし、エンジン排出物質はガスと粒子が混在する複雑な組成を持ち、温度や圧力などの状態変動が激しいため、排出物質の組成や濃度などの計測は容易ではない。一方で、環境規制値の厳格化、自動車排出ガスライン後処理装置の進化や制御の複雑化が進むにつれて、計測器にはさらなる精度向上や計測時間の短

縮といった高性能化が強く求められおり、これらの要求に対応できる計測前の処理法や計測手法の新規開発が必要である。

本論文では、粒子状物質 (PM) 計測装置と排出ガス再循環 (EGR) 率計測装置、排出ガス流量計測装置の三種類の計測装置に注目し、計測精度の向上と計測時間の短縮を目的として、それぞれに新しい計測方式を提案している。PM 計測では計測精度の向上と大幅な計測時間短縮を実現している。また、加熱型非分散赤外吸収 (NDIR) を用いた 2 ライン CO₂ 計測装置を開発し、水分含有状態での EGR 率計測および排出ガス流量計測への応用を世界で初めて実現するなど、新しい計測手法の提案と同時に計測精度の向上や応答時間の短縮も実現した。本論文は、これらの成果をまとめたもので、以下の点で評価できる。

第一に、PM 計測装置において、可溶性有機成分 (SOF)、すす成分の分離計測と計測時間の大幅な時間短縮を同時に実現している。精密天秤による PM 重量測定では、水分影響を初めとする環境影響を整えて安定した結果を得るために、PM 捕集フィルタに対して 8 時間以上の一定環境下でのソーク時間が必要となる。一方、980°C の高温で PM を加熱し、気化させた後、酸化還元反応によりガス成分を測定して重量演算を可能にする気化方式 PM 計測装置は、短時間で分離計測ができる利点がある一方、分離能力として 1.0mg 以下の領域での精度には課題があった。本論文では、誤差の要因の検証と特定を行うとともに、流体シミュレーション解析を組合わせて充填時間と還元反応の最適化を行っている。この結果、大幅な計測時間の短縮を図りながら、従来の装置より 80%低いサンプル重量域において、SOF、すすを ±2 % の高精度で分離計測できる装置を実現している。

第二に、水分含有状態のエンジン排出ガスを除湿処理なしで計測して EGR 率を演算する装置を世界で初めて実現している。加熱型 NDIR 式 CO₂ 計では水分干渉や水分共存影響があるため、これを応用した水分含有状態での EGR 率計測装置は前例がない。著者は、計測対象波長域を最適化することによってエンジン排出ガス内の水分濃度を直接計測し、演算処理により水分影響を補正する手法を確立することによりこの問題を解決している。また、EGR 率の演算にはエンジンの吸気側と排気側の CO₂ 濃度を同時に計測する必要があるが、サンプル取り合いの温度や圧力の条件が発生するため、吸気側と排気側で応答差が発生する。本装置では、サンプルライン体積を最適化して圧力変動を受け難い設計とし、応答差を従来の三分の一の影響に抑えている。結果として、従来装置の精度 ±5 % と比べて ±1 % という高精度の計測を実現した。

第三に、上に述べた EGR 率計測装置を CO₂ トレーサ式排出ガス流量計測装置として応用することを提案し、その有効性を実証している。スムーズアプローチオリフィス法に

対して本開発手法と従来の除湿機能を持たせた CO₂ 計による計測を比較した結果、特に過渡特性において結露の影響を受けない本手法がスムーズアプローチオリフィス法と良好な相関を示し、従来方式より優れていることを実証している。

以上要するに、PM 計測装置と EGR 率計測装置、排出ガス流量計測装置の三種類の計測装置に関して、PM 計測では計測精度の向上と大幅な計測時間短縮を実現するとともに、加熱型 NDIR を用いた 2 ライン CO₂ 計測装置を開発して水分含有状態での EGR 率計測および排出ガス流量計測への応用を世界で初めて実現しており、電気電子工学上価値ある業績である。よって博士（工学）の学位論文に値するものと認める。

氏 名 増田 貴史
 学位記番号 シ情 博甲第 538 号（工学）
 学位授与の日付 平成 26 年 3 月 25 日
 学位論文題名 シリコンインクとそれを用いた薄膜形成技術に関する研究

論文調査委員

（主 査） 九州大学 教授 浅野 種正
 （副 査） " " 林 健司
 " " " 興 雄司

論文内容の要旨

本論文はシリコン前駆体溶液(Si インク)および Si インクを用いた半導体 Si 薄膜の製膜技術の開発、ならびにその塗布型アモルファスシリコン(a-Si)膜を用いた a-Si 太陽電池への応用に関する研究をまとめたものである。

Si は現在の産業で最も重要な材料の一つである。Si デバイスの出発原料には一般に固相 Si(シリコンウェーハ)か、気相 Si(シランガス)が用いられている。もし、液相 Si を用いて Si 薄膜の製造ができれば、塗布法によりデバイスを作製できることになり、その利点は大きい。例えば、真空プロセスとそのための設備が不要となり、装置の小型化とエネルギー消費の削減が可能になる。こまた材料使用効率が高い上に有毒ガスを用いないため、資源の節約、安全性確保の容易性の面でも既存技術よりも優れている。

しかし残念なことに、過去に塗布法によって Si デバイスを作製したという報告はない。本論文の著者は、そのような状況を踏まえ、Si インクの開発から研究を開始し、それを用いた半導体 Si 薄膜の形成技術の開発に取り組んだ。塗布法による Si デバイスの製造を可能にするには、長期安定性に優れ良好な塗布性能を有するインクの開発と良質な塗膜を再現性よく得るための科学的な見地にたった塗布技術の開発が必要であるとの信念から研究を進め、先導的な多くの成果を挙げた。

本論文に述べられている主たる成果を以下に記す。

(1)インク開発で課題とされる溶媒の選定において、物質の溶解性と van der Waals 相互作用とを関連付けることで、計算によって最適な溶媒を見出す術を見出した。それにより、良質の真性(i 型)Si インクだけでなく、電子物性を制御可能な p 型および n 型 Si インクを初めて開発した。さらには、その手法を炭化シリコン(SiC)インクの開発に発展させた。

(2)塗布技術に関する研究では、Si インクから得た塗膜の不安定性の原因が van der Waals 相互作用に依るものである事を明らかにし、Si インクから平坦で良質な Si 膜を再現性よく得る技術を開発した。これは機能性インクを用いた塗布法による薄膜形成技術において、製膜性と van der Waals エネルギーとの間に密接な関係がある事を示す初めての報告である。

(3)デバイス応用性の検証研究では、本研究で開発した Si インクおよび塗布技術を用いる事で、塗布法によって半導体特性を有する非晶質 Si(a-Si)膜および非晶質 SiC(a-SiC)膜を得る事に成功した。更にそれら薄膜を用いた a-Si 太陽電池を作製し、塗布法による Si デバイスが実現可能であることを実証した。

論文調査の要旨

シリコンは、現代のエレクトロニクスを支える基盤半導体材料である。シリコンは、単結晶または多結晶のウェーハ、あるいは多結晶または非晶質の薄膜として電子デバイスに利用される。ウェーハは集積回路に主に利用され、薄膜は平面形ディスプレイや太陽電池などに利用されている。薄膜はこれまで、シリコン化合物の気体を原料に用いて製造されてきた。その工程では、大気からの酸素等の混入による半導体特性の劣化を避けるために、気体原料の分解反応を起こさせる空間を真空にする必要があり、そのために消費するエネルギーがシリコン薄膜の製造エネルギーの大きな部分を占めている。したがって、真空を要しない薄膜形成法を創成できれば、電子デバイスの製造エネルギーを極小化でき、エレクトロニクスの持続的発展に大きく貢献できると期待される。

本論文は、液体を原料に用いた塗布法によるシリコン薄膜技術の創成に向けて、薄膜の前駆体となる液状シリコン化合物（シリコンインク）とそれを用いた薄膜形成に関する研究をまとめたものである。

第 1 章では、本研究の意義、目的を論じている。第 2 章では、液体とそれを用いた薄膜形成技術開発の理論的基礎となる分子間力相互作用について整理している。第 3 章では、開発したシリコンインクの性状を解析し、分子量と固有粘度の関係を明らかにしている。第 4 章では、種々の有機液体化合物の誘電率の分散関係を測定した結果を述べるとともに、シリコンインクに適した溶媒の選定指針につ

いて述べている。第 5 章では、開発したシリコンインクを用いてスピン塗布法によって連続した薄膜を形成するための基板選定指針を、溶媒、溶質、基板表面の分子間力の観点から解析した結果を述べている。第 6 章では、シリコンインクと塗布法によって形成した非晶質シリコン薄膜の特性を調査した結果を述べている。第 7 章では、半導体デバイスの製造に必要な伝導型の制御、デバイスの性能向上に有用な炭化シリコンインクの開発と膜形成、およびこれらを用いた太陽電池の試作結果を述べている。第 8 章で本研究を総括している。

得られた成果は、以下の点で評価できる。

1. 塗布性に優れるシリコンインクを開発した。これは、シクロペンタシランを光照射によって開環重合させてポリシランとし、それを適切な溶媒に溶かすことで実現したものである。この開発の過程で、計算によって最適な溶媒を見出す方法を考案した。具体的には、溶質と溶媒のファンデルワールスエネルギーを光の領域における誘電率と吸収振動数の計測結果から求め、それを元に溶媒中の溶質の凝集エネルギーを理論的に算出して適切な溶媒を選定する方法である。

2. 基板上に均一な薄膜を形成する技術に関し、性質の異なる基板とシリコンインクの組み合わせによる実験研究を進め、連続な塗膜の成否は、溶媒ではなく溶質と基板間のファンデルワールス相互作用により決定されることを見出し、連続膜を形成するには、基板と溶質間に引力が作用する材質の基板を選定すれば良いことを示した。この考え方は、凹凸のある基板表面上での薄膜形成過程にも応用でき、工業的価値は大きい。

3. p 型および n 型のシリコン薄膜を形成できるシリコンインクを開発した。p 型シリコンインクはデカボランを、n 型シリコンインクは白燐をドーパントとして溶解させて作製した。ドーパント濃度を制御することによって、p 型は 5 桁、n 型は 6 桁にわたって、非晶質シリコン薄膜の導電率を制御できることを示した。さらには、その手法を炭化シリコン(SiC)インクの開発に発展させ、液体プロセスを用いて半導体ヘテロ接合を形成できることを示した。

4. 開発したシリコンインクを用いて薄膜太陽電池を作製し、液体原料を用いた塗布法によりシリコン薄膜デバイスの製造が可能であることを実証した。

以上、要するに本論文は、固体シリコンの液状前駆体となるシリコンインクとそれを用いて半導体薄膜を形成する技術を分子間力相互作用の学理に基づいて開発し、さらに薄膜の伝導型制御も可能として太陽電池の動作実証へと発展させ、液体を原料とするシリコン電子デバイス製造プロセスを創出したものであり、電気電子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 金子 晃介
 学位記番号 シ情 博甲第 539 号 (情報科学)
 学位授与の日付 平成 26 年 3 月 25 日
 学位論文題名 A Study on Framework for Multimodal Intelligent Interfaces Using Emotion Data
 (感情データを利用したマルチモーダル知的インターフェイスのための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 教授 岡田 義広
 (副 査) " " 竹田 正幸
 " " " 瀧本 英二

論文内容の要旨

近年の情報通信技術の発達に伴い、個人情報を活用した様々なシステムが開発されて来ている。これらの個人情報に、個人の感情に関する情報を取り入れることで、個人の感情に応じたサービスを提供できるようになると考えられる。人間の表情や動作や言葉などの様々な要素から感情を解析するためには、それらの要素を認識するためのセンサーデバイスが必要になる。このようなマルチモーダルインターフェイスを備えたシステムでは、多様なセンサーデバイスから得られる入力データを解析するためのデータベースの構築とそのデータベースと連携するマルチモーダルインターフェイスのアーキテクチャーが必要である。

本論文で提案するフレームワークの特徴は、Websocket 通信や Linked Data などの Web 標準技術を積極的に採用している点である。Linked Data では、すべてのデータに対して URI を割振ることにより、HTTP 通信によるデータへのアクセスが可能となる。したがって、提案するフレームワークを利用することにより、その優れたデータの共有性や参照性から、より高い精度でデータベース解析結果を得ることが可能となる。

本論文の第一章では、本研究の研究背景や研究目的を先行研究の事例と共に紹介している。また、本研究成果の要約を述べている。

第二章では、提案するフレームワークのアーキテクチャーについて説明している。マルチモーダルインターフェイスのアーキテクチャーと Web とを繋ぐ連携機構として、Linked Data で構築された Web 上のリソースにアクセスするためのコンポーネントについて説明している。センサーデバイスからのデータの入出力処理を行う汎用コンポーネントの提供により、アプリケーション開発で必要となるコーディング量を削減できるほか、分散開発環境をも提供する。

第三章では、言葉と感情に関する Linked Data の構築手法を提案している。この手法では、387 個の感情語に注目

し、それらの感情語を含むテキストから、被験者の感じ方により感情語を 11 個の感情カテゴリーに分類する。分類された結果を基に各感情語が感情カテゴリーに属する強度を表す感情強度を計算し、感情語と感情強度の関係を表す **Linked Data** を被験者毎に構築する。この **Linked Data** を用いた顔表情システムを開発し、被験者の評価実験結果から本フレームワークの有用性を示している。

第四章では、顔表情と感情における **Linked Data** の構築手法を提案している。この手法では、7 種類の感情カテゴリー毎に顔表情のデータを解析し、顔の特徴点の位置情報と各感情カテゴリーとの関係を記述した **Linked Data** を構築する。この解析結果の **Linked Data** を用いて感情認識実験を行い、各特徴点の認識における重要度に関する **Linked Data** を別に構築し、これと解析結果の **Linked Data** とを統合することで、より高い精度で認識結果を得ることができるとデータベースを構築する。

第五章では、歩行動作と感情における **Linked Data** の構築手法を提案している。この手法では、動作の特徴を表し易い部位に注目し、4 種類の感情カテゴリーに対して各部位の速度データを解析する。この解析結果から得られた情報を基に、各部位の速度情報と感情カテゴリーとの関係を表す **Linked Data** を構築する。この解析結果の **Linked Data** を用いて感情認識実験を行い、各部位の認識における重要度に関する **Linked Data** を別に構築し、これと解析結果の **Linked Data** とを統合することで、より高い精度で認識結果を得ることができるとデータベースを構築する。

第六章では、第二章で説明するマルチモーダルインターフェイス用のアーキテクチャーと、第三、四及び第五章で説明する感情認識用の **Linked Data** を用いて開発した感情可視化システムを提案している。このシステムは、発話内容、顔表情、歩行動作を入力データとして、被験者の感情の状態を可視化する。この可視化システムを用いた実験を行い、その評価結果から提案するフレームワークの有用性を示した。

第七章では、本研究の結論と今後の課題について記述している。また、本フレームワークを利用した将来的なアプリケーションを紹介することで、提案するフレームワークの有用性について言及している。

以上のように本論文では、Web 標準技術を用いたマルチモーダルインターフェイスのためのアーキテクチャーを提案し、そのインターフェイスから得られる多様な入力データに対して、**Linked Data** で記述されたデータを参照しながら解析を行うことで、より高い精度で感情認識が行えることを示し、これらを構成要素とするフレームワークを提案している。

論文調査の要旨

本論文は、感情データを利用したインターフェイスに関するものである。近年における情報通信技術の発達により、

個人の情報を利用した様々なサービスが行われるようになって来ている。しかし、個人の感情に関する情報を利用したものはほとんどない。個人の感情に関する情報を利用可能とすることにより、個人の感情に応じた知的なサービスを提供できるようになると考えられる。人間の顔表情や振る舞いおよび言葉の内容から感情を解析するためには、それら顔表情や振る舞いおよび言葉の内容を入力可能なセンサーデバイスが必要である。しかし、このような多様なセンサーデバイスからデータを入力可能とするシステムは複雑となり、その開発コストは非常に大きなものとなる。このようなマルチモーダルインターフェイスを備えたシステム開発を支援するアーキテクチャが必要である。また、多様なセンサーデバイスから得られるデータを解析し個人の感情を認識するためには、個人の感情に関するデータベースの構築が必要である。そこで、本論文では、感情データを利用したマルチモーダル知的インターフェイスのためのフレームワークとして、提案するデータベース化手法を用いた個人の感情に関する情報のデータベースと、それを利用可能とするマルチモーダルインターフェイスのためのアーキテクチャを提案している。

本論文で提案するフレームワークの特徴は、Websocket 通信や **Linked Data** などの Web 標準技術を積極的に採用している点である。**Linked Data** では、すべてのデータに対して URI を割振ることにより、HTTP 通信によるデータへのアクセスが可能となる。データを **Linked Data** として蓄積することにより、データの共有性や相互参照性に優れたデータベースが構築でき、異なる種類のデータベースとの連携も容易になる。したがって、本論文で提案するフレームワークを利用することにより、より高い精度でデータベース解析が行えると期待できる。すなわち、より高い精度で個人の感情の認識が可能になると考えられる。

まず、本論文では、マルチモーダルインターフェイスのためのアーキテクチャを提案している。これは、多様なセンサーデバイスから得られる入力データと、**Linked Data** として Web 上に構築されている感情データベースのデータとの連携機能を提供するコンポーネント群である。センサーデバイスからのデータの入出力処理を行う汎用コンポーネントの提供により、アプリケーション開発に必要なコーディング量を削減できるようになる。

次に、本論文では、言葉と感情に関する **Linked Data** の構築手法を提案している。387 種の感情語について、感情語を含むテキスト内容の被験者実験から、感情語を日本語感情表現辞書に基づく 11 種類の感情カテゴリーに分類する。これを基に各感情語が感情カテゴリーに属する強度を表す感情強度を計算し、感情語と感情強度の関係を表す **Linked Data** を構築する。この **Linked Data** を用いた顔表情システムを開発し、被験者の評価実験結果から本フレームワークの有用性を示した。

また、本論文では、顔表情と感情に関する Linked Data の構築手法を提案している。Ekman らの研究で採用されている 7 種類の感情カテゴリについて、顔表情の特徴点の位置情報と各感情カテゴリとの関係を記述した Linked Data を構築する。この Linked Data を用いて感情認識実験を行い、各特徴点の認識における重要度に関する Linked Data を別に構築し統合することで、より高い精度で認識結果を得ることができた。

さらに、本論文では、歩行動作と感情に関する Linked Data の構築手法を提案している。動作の特徴を表し易い関節に着目し、Castellano らの研究で採用されている 4 種類の感情カテゴリに対して、各関節の速度情報と感情カテゴリとの関係を表す Linked Data を構築する。この Linked Data を用いて感情認識実験を行い、各関節の認識における重要度に関する Linked Data を別に構築し統合することで、より高い精度で認識結果を得ることができた。

最後に、本論文では、提案するアーキテクチャと構築した感情認識用の 3 種類の Linked Data を用いて、発話内容、顔表情、歩行動作を入力データとして、被験者の感情の状態を可視化するシステムの開発について述べている。ユーザ評価実験の結果から提案するフレームワークの有用性を示した。

以上要するに本論文は、Web 標準技術を用いたマルチモーダル知的インターフェイスのためのアーキテクチャを提案し、感情に関する入力データについて、Linked Data 表現された感情データベースを参照し解析を行うことでより高い精度で感情認識が行えることを示し、これらを構成要素とするフレームワークを提案したもので、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 菅沼 崇
 学位記番号 シ情 博甲第 540 号 (工学)
 学位授与の日付 平成 26 年 3 月 25 日
 学位論文題名 レーザ生成プラズマ方式極端紫外線光源の高出力化と長寿命化に関する研究
 論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 岡田 龍雄
 (副 査) " " 白谷 正治
 " " " 内野 喜一郎

論文内容の要旨

光リソグラフィ技術は、半導体集積回路 (LSI) 微細化の基盤技術として、LSI の高集積化を牽引してきた。現在、光リソグラフィにはエキシマレーザを光源とする深紫外線リソグラフィが実用化されている。LSI のさらなる微細化を進めるため、将来の露光技術として波長 13.5nm の極

端紫外光 (EUV: Extreme Ultra Violet) を光源に用いる EUV リソグラフィの実用化が期待されている。この EUV リソグラフィは、32nm ノード以細における量産露光技術の有力候補とされている。

量産時の EUV 光源には出力 115W 以上の高出力が要求されており、実用化にはまず本出力を実現することが課題となる。EUV 光源には、放電プラズマからの発光を利用する方式と、レーザ生成プラズマからの発光を利用する方式が有るが、高出力化が容易なレーザ生成プラズマ方式が有力視されている。レーザ生成プラズマ方式は、真空容器内の微小金属液滴に高出力レーザ光を集光してプラズマを生成し、発生した EUV 光をプラズマ近傍に設置したミラーにより集光して、光リソグラフィ光学系に輸送する構成になっている。このため、まず高出力レーザにより安定したプラズマを生成して高出力 EUV 光を発生するとともに、プラズマ近傍に配置される EUV 集光ミラーがプラズマからの飛散物により汚損するのを避けてミラーの長寿命化を図ることが重要な課題である。さらに、実機では波長 13.5nm の高出力の光源の集光点における光特性をどのように評価、モニターするかも重要な技術課題である。

本論文は、レーザ生成プラズマ方式による EUV 光源装置の開発において、高出力 EUV 光の発生に不可欠なプラズマ生成用の高出力レーザシステムの開発、装置寿命を制限する最大の要因の一つであるプラズマからの付着物に起因する集光ミラーの反射率低下を防止するための付着防止技術の開発、さらに実用化に際して不可欠な EUV 光源性能の評価技術の確立を目的として行った研究成果をまとめたものであり、以下の 6 章から構成される。

第 1 章は緒論であり、本研究の背景および本論文の意義と概要を述べている。

第 2 章では、レーザ生成プラズマ方式 EUV 光源の高出力化に不可欠となる、高出力パルスレーザ開発に関して、まず Nd:YAG を用いた高出力パルスレーザの開発について述べる。小出力のパルス Nd:YAG レーザ発振器に LD 励起 Nd:YAG 増幅器を用いる MOPA(Master Oscillator Power Amplifier)方式を採用して、EUV 光を生成するためのレーザパルス出力として最大 1.5kW、パルス幅 15nsec、繰り返し周波数 100kHz の性能を得るとともに、ビーム品質や安定性などの特性を評価した。しかし、Nd:YAG レーザシステムでは、高出力動作時のビーム品質の劣化が激しく、さらなる高出力化は困難と判断した。

第 3 章では、レーザ生成プラズマ方式 EUV 光源の高出力化に不可欠となる、高出力パルスレーザの開発に関して、もう一方の候補として有力視されている CO₂ レーザシステムの開発結果を述べる。CO₂ レーザシステムは、小出力のパルス炭酸ガスレーザ発振器を連続発振用炭酸ガスレーザを増幅器として用いる MOPA(Master Oscillator Power Amplifier)方式を提案し、EUV 光を生成するレーザパルス

出力として最大 8kW, パルス幅 20nsec, 繰り返し周波数 100kHz の性能を得るとともに, ビーム品質や安定性などの特性を評価している。また, 今後実用化に対してさらなる増幅器の増幅効率改善を図って装置規模の縮小化を図る必要があるが, 本研究ではスラブタイプの CO₂ レーザを増幅器を導入して性能を評価し, スラブタイプの CO₂ レーザ増幅器の有効性を実証した。

第 4 章では, EUV 光用集光ミラーへの中性粒子付着による反射率低下を改善するために, ECR を用いた中性粒子のイオン化の実験結果について述べている。水晶振動子膜厚計を用いて, プラズマからの飛散物のミラーへの堆積量を測定した。この時, 磁場を用いてプラズマ中のイオンの飛散を制御することにより, 集光ミラーへの堆積量は約 40% 低減することを確認した。また, 直接磁場で制御できないプラズマからの中性原子の飛散を制御するため, イオンサイクロトロン共鳴プラズマを併用すると, 磁場でコントロールされたイオン信号量は 1.5 倍に増加することを実証して, 中性元素の飛散を制御できることを初めて実証した。本 ECR によるイオン化により集光ミラー寿命は, 1.5 倍になると推定される。

第 5 章では, 高出力レーザ生成プラズマ方式 EUV 光源の集光点での光特性評価技術を開発した結果について述べる。波長 13.5nm の EUV 光はガス中を伝搬できないため, 全ての計測は真空装置内で行う必要がある。また, 光源に要求されている特性は, 波長 13.5nm のみの特性ではなく, プラズマから放射される全スペクトルに渡っての特性についても規定されている。集光後のレーザ生成プラズマ方式光源の性能を高出力 EUV 光源で直接測定した例はなく, 実用技術として確立するには直接測定による評価技術の確立する必要がある。レーザ生成錫プラズマを用いた EUV 光源システムを試作して, EUV 光パワー, EUV 光スペクトル, EUV 光集光パターン, EUV 以外の波長での光パワーを実機レベルの集光点において評価する技術を確認した。

第 6 章では, 本研究で得られた成果をまとめ, 今後の展望を述べている。

論文調査の要旨

現代の高度情報化社会は, 大規模半導体集積回路 (LSI) の微細化による LSI 素子の高機能化によりもたらされてきた。光リソグラフィは, LSI 回路パターンを写真製版の原理によりウエハ上に転写する技術であり, LSI 製造において回路の微細化を牽引してきた基盤技術である。光リソグラフィにおいて, 微細化の性能は基本的には使用する光源の波長によって制限される。現在, 最先端の光リソグラフィ装置には, 波長 193 nm の ArF エキシマレーザが使用されているが, LSI のさらなる微細化には, より短波長の光源を用いる光リソグラフィ装置の開発が必要不可欠であ

る。

次世代の光リソグラフィ用光源として, 錫を利用したレーザ生成プラズマ (LPP: Laser Produced Plasma) からの波長 13.5 nm の極端紫外光 (EUV: Extreme Ultraviolet) を利用する EUV 光源が有力視されている。EUV 光源の実用化には, プラズマ生成用のレーザとしてパルス幅 10 ナノ秒程度で平均出力が 10 kW を超えるこれまでにない高出力レーザシステムの開発や, 長寿命で安定な EUV 光源を実現するため錫プラズマによる光学系の汚染を防止する技術の開発が大きな課題となっている。本論文は, 錫を利用した LPP 方式の EUV 光源装置の開発において, EUV 光源の性能を決める高出力レーザシステムの開発と, 装置寿命を制限する最大の要因の一つである錫による集光ミラーの汚損防止技術, さらに光源装置の性能評価技術に関する研究成果をまとめたもので, 次の点で評価できる。

第一に, LPP 方式 EUV 光源用の高出力レーザシステムとして, ナノ秒 CO₂ レーザ発振器の出力を高出力の連続動作 CO₂ レーザ増幅器で増幅する方式を提案し, その有効性を実証している。従来, LPP 方式 EUV 光源用の高出力レーザシステムとして, Nd:YAG レーザシステムが提案されていたが, 固体レーザ媒質を用いているため, 媒質への熱負荷により集光性能が悪化して EUV 光への変換効率が低下し, 出力に限界があることを実験により明らかにしている。これに対して, 提案した CO₂ レーザシステムにおいて, パルス幅 20 ナノ秒, 平均出力 8 kW で集光特性に優れた世界最高の性能を持つ LPP 方式用レーザシステムを実現した。本論文で提案された CO₂ レーザシステムの方式は, その後 LPP 方式 EUV 光源用として世界標準となっている。

第二に, 錫プラズマから放出された錫中性粒子が EUV 光集光ミラーへ付着するのを防止するため, 電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECR) により錫中性粒子をイオン化し磁場により付着を防止する方法を初めて提案し, その有効性を実証している。LPP 方式では, レーザ照射によりプラズマ化した錫液滴からの飛散物が EUV 光集光用ミラーに付着してミラーの反射率の低下, ひいては装置寿命を制限することが大きな問題になっている。特に, 電磁場での運動制御が難しい中性粒子による汚損防止が課題となっている。ECR により錫の中性粒子をイオン化し, イオン数が 1.5 倍に増加することを実証した。これは, 磁場によるイオントラップと併用すれば EUV 光集光ミラーの寿命が, 1.5 倍延びることに相当する。

第三に, LPP 方式 EUV 光源の各種光性能評価技術を開発し, 実機レベルの EUV 光源で初めて総合的な EUV 光源評価を実施し, 実用化のための評価技術を確認している。EUV 光源装置の性能評価は, 装置を露光機に接続したときの露光性能を左右する重要なものであり, 実用化のためには EUV 光集光ミラー後の出力, 光源サイズ, スペクトル, 安定性などの各種光特性を精度よく計測する技術が不可欠

である。本論文では、新たに開発した計測装置を用いて、錫を利用した LPP 方式 EUV 光源の集光性能の計測に初めて成功している。

以上要するに、本論文は、錫を利用した LPP 方式の EUV 光源装置の開発において、LPP 用の高出力レーザシステムとして CO₂ レーザシステムを用いる方式を提案してその有効性を実証するとともに、錫プラズマから放出された錫中性粒子が EUV 光集光ミラーへ付着するのを防止するため、ECR により錫中性粒子をイオン化し磁場により付着を防止する方法を初めて提案しその有効性を実証するなど、EUV 光源開発の基礎を確立したもので、電気電子工学上価値ある業績である。よって、博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏 名 松清 秀次
 学位記番号 シ情 博乙第 105 号 (学術)
 学位授与の日付 平成 26 年 3 月 25 日
 学位論文題名 高密度電子線励起による蛍光体の輝度劣化とその改善に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 准教授 佐道 泰造
 (副 査) " 教授 岡田 龍雄
 " " " 中島 寛

論文内容の要旨

陰極線管 (CRT: Cathode Ray Tube) などの表示デバイスにおいて重要な役割を担っている材料の 1 つが蛍光体である。画像の高精細化、高輝度化、更には大画面化等のニーズに応えるため、蛍光体を励起する電子銃の改良が進められ、電子ビーム径が縮小するとともにビーム電流が増加することで、蛍光体の励起電流密度が上昇している。高い電流密度で蛍光体を励起すると、経時的な輝度の低下 (輝度劣化) が顕著化する。したがって、表示デバイスの信頼性向上には、高密度電子線励起における蛍光体の輝度劣化の抑制が極めて重要である。

本論文は、表示デバイスの性能を決定づける蛍光体材料について、励起電流が高密度化している技術動向に対応すべく、高密度電子線励起における輝度劣化現象の機構を説明するとともに、その抑制手法を明らかにすることを目的としたものであり、5 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、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、蛍光体の輝度劣化を定量的に評価するため、高密度電子線励起が可能な蛍光体発光特性の評価装置と、熱発光を利用した蛍光体結晶中の欠陥準位の評価装置を開発した。発光特性評価装置の特長は、励起電流密度及び試料温度を広範囲に可変できることである。これにより、

蛍光体の発光特性に及ぼす励起電流密度及び試料温度の影響を定量的に評価することが可能になった。一方、欠陥準位評価装置の特長は、昇温速度を高精度に制御できることであり、欠陥準位を正確に解析することが可能となった。

第 3 章では、蛍光体の輝度劣化に与える電流密度の影響を評価した。その結果、輝度劣化は、面積当たりの電子線照射量に依存するのみでなく、照射電流密度にも依存することを明らかにした。これまで長時間を要していた実球での劣化試験では、低い励起電流密度が用いられていたが、励起電流密度を上昇することで、より短時間での劣化試験が可能となった。つぎに、電子線照射時の蛍光体からの脱ガスと輝度劣化の相関を検討し、電子線照射による酸素脱離が輝度劣化の要因であることを見いだした。さらに、輝度劣化に及ぼす蛍光膜作製プロセス条件の影響を評価し、蛍光膜の密度を上げて熱伝導性を高め、蛍光膜の過熱を防ぐことで、輝度劣化を低減できることを明らかにした。

第 4 章では、緑色発光材料として重要な蛍光体 Y₃(Al,Ga)₅O₁₂:Tb³⁺ [P53(Ga)] の高密度電子線励起による輝度劣化の機構を検討した。まず、P53(Ga)の輝度劣化には、蛍光体結晶中の酸素空孔 (電子捕獲準位: Ec-1.5eV) が深く関与しており、電子線照射により色中心が形成して発光が低減すること、酸素雰囲気中での高温熱処理により空孔密度を低減できることを明らかにした。また、微量 (100ppm 程度) の Yb³⁺ を P53(Ga) に添加することにより、輝度劣化が抑制されることを見いだした。さらに、この現象は、Yb³⁺ が蛍光体結晶中に形成する電子捕獲準位 (Ec-1.1eV) が蛍光体に供給された電子を捕獲するため、色中心を形成する準位 (Ec-1.5eV) による電子捕獲が抑制されることに起因するとのモデルを提案した。Yb と類似の電子的性質を持つ Eu や Sm についても同様の検討を行った結果、これらの元素添加により輝度劣化が抑制されること、その抑制効果は各元素が蛍光体結晶中に形成する準位の深さと良い相関を示すことが明らかになった。これは、上記の提案モデルを支持する結果である。更に、Sc³⁺ の添加により、高密度電子線励起における短時間領域での輝度劣化が著しく低減できることを見いだすと同時に、この現象は Sc³⁺ 添加による酸素空孔密度の低減に起因することを明らかにした。

第 5 章では、本論文を総括し、今後の展望を示した。

論文調査の要旨

高度情報化社会の発展に伴い、人間と情報機器のインターフェース (ディスプレイ) の重要性が増大している。陰極線管 (CRT: Cathode Ray Tube) を用いたディスプレイは、テレビジョンやコンピュータ表示装置への利用は減ったものの、高い解像度、広い視野角、および高い応答速度を有するため、産業用機械や航空管制システムなどの表示装置として、依然、重要な位置を占めている。CRT ディスプ

レイの画面の大型化と、明るく鮮明な表示画像を両立するため、蛍光体を励起する電子線は、年々、大電流化されるとともに、ビーム径の縮小が進められてきた。その結果、電子線の照射密度が増加することで蛍光体への負荷が増大し、輝度劣化が顕著化している。したがって、高性能 CRT ディスプレイの実現には、高い照射電流密度における蛍光体の輝度劣化の機構を解明するとともに、輝度劣化を抑制する手法の創出が必須となる。

本研究は、高性能 CRT ディスプレイの創出を目指し、高密度電子線励起による蛍光体の輝度劣化の機構を解明するとともに、その抑制手法を明らかにしたものである。

本研究で得られた成果は、以下の点で評価できる。

1. 高密度電子線励起による蛍光体の輝度劣化の機構を定量的に解明するには、試料温度と照射電流密度を広範囲かつ精密に制御できる新しい評価装置の開発が必要であった。そこで、液体窒素を冷媒として用いた試料冷却機構を採用するとともに、酸化物カソードを装備した高品位投写型陰極線管用電子銃を応用することで、広範囲かつ精密に試料温度 (80~600K) と励起電流密度 (0.1~100mA/mm²) を変化できる電子線照射装置を開発した。さらに、蛍光体の熱発光を利用して、蛍光体結晶中の欠陥準位を評価する装置を開発した。幅広い温度範囲において試料温度の昇温速度を精密に制御することで、高精度なデータ解析が可能となった。

2. 緑色発光材料として重要な蛍光体 [Y₃(Al, Ga)₅O₁₂:Tb³⁺, P53(Ga)] の輝度劣化プロセスを検討し、P53(Ga) 蛍光体の輝度劣化は、蛍光体結晶からの酸素脱離に起因することを明らかにした。さらに、輝度の劣化量は、単位面積当たりの電子線照射量(ドーズ)に依存するだけでなく、照射電流密度にも依存することを見いだした。この現象は、高い照射電流密度では試料温度が上昇することによる、蛍光体からの酸素脱離の促進に起因することを明らかにした。

3. P53(Ga) 蛍光体の熱発光特性を解析し、酸素空孔が電子捕獲準位(エネルギー準位: Ec-1.5eV)を形成すること、電子線照射するとこの準位が電子を捕獲して色中心を形成し、蛍光体の輝度劣化が進行することを明らかにした。さらに、Yb³⁺の微量添加(約 100ppm)により、蛍光体の輝度劣化が抑制できることを明らかにした。この現象は、Yb³⁺が形成する準位(Ec-1.1eV)が優先的に電子を捕獲することで、酸素空孔が形成する準位への電子供給が阻止される結果、色中心の形成が抑制されることに起因することを明らかにした。

以上要するに本研究は、高密度電子線励起による蛍光体の輝度劣化について詳細な検討を行い、高性能ディスプレイの実現に不可欠な輝度劣化抑制手法を明らかにしたもので、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(学術)の学位論文に値するものと認める。

.....