

学位論文審査報告

沖本, 天太

尾上, 勇介

福本, 尚人

楊, 凌升

他

<https://hdl.handle.net/2324/1564267>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 17 (2), pp.67-107, 2012-09-26. 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 沖 本 天 太
学位記番号 シ情 博甲第 448 号 (情報科学)
学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
学位論文題名 グラフ構造に基づく分散制約充足/
最適化問題の解法

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 横 尾 真
(副 査) " " 長谷川 隆 三
" " 准教授 正 代 隆 義

論文内容の要旨

分散制約充足/最適化問題とは、制約充足/最適化問題における変数および制約が複数のエージェント(自律的な主体)に分散された問題であり、マルチエージェントシステムにおける様々な応用問題を表現できる一般的な枠組みである。分散制約充足/最適化問題は、変数をノードに、制約をノード間のエッジに対応させることにより、グラフを用いて表すことができる。

本研究では、グラフ構造を利用して分散制約充足/最適化問題の効率的な解法を開発することを目的とする。本研究ではまず、グラフ構造がスケールフリーと呼ばれる性質を持つ場合に特化した解法を提案する。既存の分散制約充足問題の解法のほとんどは、任意のグラフ構造で動作することを保証している。本研究では、ハブと呼ばれる、極めて多数のエッジを持つ少数のノードを含むスケールフリー的構造を持つグラフにおいては、ハブとの距離を考慮して変数の優先順位を決定することが有効であることを示す。次に、分散制約最適化問題において解品質を保証する非厳密解法(近似解法)を提案する。分散制約最適化問題は NP-hard であるため、大規模な問題に対しては近似解を与える非厳密解法を考える必要があるが、既存の非厳密解法のほとんどは解品質を保証しない。本研究では、グラフの複雑さを表すパラメータ(誘導幅)に着目し、グラフ中のいくつかのエッジを取り除くことにより、誘導幅が小さいグラフの解を用いる近似解法を提案する。最後に、多目的制約最適化問題における対話型解法を提案する。実世界に存在する様々な最適化問題では、複数の異なる評価基準を同時に考慮する場合が存在するが、数多くの最適解の候補からユーザの選好に最もあった解を選び出す必要がある。本論文では、最適解が存在し得る領域をユーザとのインタラクションにより段階的に狭めていく対話型解法を提案する。

本論文は、全体を 6 章で構成している。1 章では、本研

究の背景と目的、および得られた結果に関して概説する。2 章では、分散制約充足/最適化問題および、多目的制約最適化問題の定義を示す。3 章では、スケールフリー的なグラフ構造に特化した、分散制約充足アルゴリズムにおける変数順序付けヒューリスティクスを提案し、その有効性を示す。4 章では、分散制約最適化問題において、グラフの誘導幅に着目した解品質を保証する非厳密解法を提案し、その有効性を示す。5 章では、多目的制約最適化問題における対話型の解法を提案し、ユーザの選好に関する既存のモデルを用いて、本解法の評価を行う。6 章では、結論と今後の課題について述べる。

論文調査の要旨

マルチエージェントシステムとは、エージェントと呼ばれる複数の自律的な主体(例えば知的なプログラム及び人間)の相互作用に関する研究分野である。複数のエージェントが同じ環境に存在する場合、これらのエージェントの行動の間には、共有する資源の制限等に起因する制約条件が存在することが通例である。分散制約充足/最適化問題は、エージェント間の制約を満足、もしくは最適化する行動の組合せを発見する問題であり、マルチエージェントシステムにおける様々な応用問題を表現できる一般的な枠組みである。一方、分散制約充足/最適化問題における既存の研究には、以下のような問題点がある。まず、既存の分散制約充足問題の解法のほとんどは、対象とする問題のグラフ構造がランダムであることを仮定しており、グラフが特徴的な構造をもつ場合に、その構造を利用してアルゴリズムの効率を向上する手法に関する検討が不十分である。さらに、分散制約最適化問題は NP 困難であるため、大規模な問題に対しては、比較的少ない計算で近似解を探索する非厳密解法(近似解法)を考える必要があるが、既存の非厳密解法のほとんどは解品質を保証していない。さらに、既存の分散制約最適化問題の研究では、目的関数が単一であることを仮定している。実世界に存在する様々な分散制約最適化問題では、複数の異なる評価基準を同時に考慮する必要が生じる。

本研究は、これらの問題点の解決を目的としたもので、以下の点で評価できる。

第一に、著者はグラフ構造がスケールフリーと呼ばれる性質を持つ場合に特化した、バックトラック型解法のための変数の優先順位付けヒューリスティクスを提案している。具体的には、ハブと呼ばれる、極めて多数のエッジを持つ少数のノードを含むグラフ(スケールフリーグラフ)において、ハブとの距離を考慮して変数の優先順位を決定する手法を提案し、提案手法により実行時間を 3 割程度削減できることを実験的評価により示している。

第二に、著者は分散制約最適化問題において解品質を保証する非厳密解法を提案している。本研究では、グラフの

複雑さを表すパラメータ（誘導幅）に着目し、グラフ中のいくつかのエッジを取り除くことにより得られる、誘導幅が小さいグラフの解を用いる近似解法を提案している。著者は、本手法で得られる解の品質と最適解との差が、取り除いたエッジの数で与えられるパラメータ以下であることを証明し、提案手法が既存の手法と比較して高速であり高品質な解が得られることを実験的評価により示している。

第三に、著者は、多目的分散最適化問題の解法を提案するための最初のステップとして、多目的制約最適化問題における対話型解法を提案している。多目的制約最適化問題においては、数多くの最適解の候補からユーザの選好に最もあった解を選び出す必要がある。本論文では、最適解が存在し得る領域をユーザとのインタラクションにより段階的に狭めていく対話型解法を提案している。さらに、線形、コブダグラス、レオンチェフ型等のユーザの選好に関する既存のモデルを用いて本解法の評価を行い、ほとんどの場合に数回のインタラクションで最適解が得られることを実験的評価により示している。

以上要するに、本論文は分散制約充足／最適化問題に関して、グラフ構造に着目した効率的な解法を、また、多目的制約最適化問題に関して、新しい対話型の解法を提案し、これらの解法の有効性を確認したものであり、情報学上寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文に値すると認める。

氏 名 尾 上 勇 介
 学位記番号 シ情 博甲第 449 号 (工学)
 学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
 学位論文題名 多重リスタート型ルックバック一般
 化最小残差法の提案とその高速化

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 藤 野 清 次
 (副 査) " " 櫻 井 幸 一
 " " 准教授 高 橋 規 一

論文内容の要旨

科学や工学そして医療など様々な解析分野において、数値シミュレーションはそれらの発展に大きく貢献している。それらの分野で現れる現象を支配する基礎方程式は、偏微分方程式により数学的に記述されることが多い。数値シミュレーションにおいては、偏微分方程式は有限要素法や境界要素法などにより離散化され、最終的に連立一次方程式の求解に帰着される。そして数値シミュレーション全体の中で、この連立一次方程式の求解に要する時間が大部分を占めることも多い。そこで、連立一次方程式を高速か

つ低コストで解くことは数値シミュレーションの中で最も重要な課題の一つである。

大規模で疎な複素非対称行列を係数に持つ連立一次方程式の求解では、Generalized Minimal RESidual 法 (以下、GMRES 法と略す) が用いられることが多い。は、1986 年 Saad, Schultz により提案された算法で、方程式の厳密解へ収束性と相対残差の単調な減少性が理論的に保証されている。しかし、反復途中の収束履歴の情報をすべて持つておく必要があるため、実用上は、その簡略版(リスタート版 GMRES(k)法と一般に呼ばれる)が使用されることが多い。リスタート版 GMRES(k) 法では、反復 k 回毎に初期近似解 \mathbf{x}_0 を再設定する必要がある。GMRES(k) 法の改良には、リスタート係数 k を動的に決める算法や、反復毎に前処理行列を柔軟に変えていく算法などが提案されている。後者の研究の一つに、同一著者の提案による Flexible GMRES (FGMRES と一般に呼ばれる) (k)法がある。この FGMRES(k) 法は、前処理つき GMRES 法の変形版とも見做すことができ、収束性のよさと頑強さが実験的に検証され、高く評価されている。ここで、頑強さとは、種々のパラメータ設定に対して、反復法が収束しない割合が低い性質を意味する。

一方、Imakura らは、GMRES(k) 法の i 回目のリスタートにおける初期近似解 $\mathbf{x}_0^{(i)}$ の設定法に新しいアイデアを取り入れた。すなわち、任意のベクトル $\mathbf{y}^{(i)} \in \mathbb{C}^N$ を新規に導入し、初期解 $\mathbf{x}_0^{(i)}$ にベクトル $\mathbf{y}^{(i)}$ を加えるという着想である。ただし、ベクトル $\mathbf{y}^{(i)}$ は、残差減少条件が成り立つように設定する必要がある。これは GMRES(k) 法の残差の単調減少性を保持するためである。この着想を元に、残差多項式に関する解析に基づき直前の単一のリスタートの残差減少量に基づき、残差減少条件の下で次のリスタートの初期解を調整する Look-Back 戦略を提唱した。そして、この Look-Back 戦略に基づく Look-Back GMRES(k) 法を考案した。しかし、Look-Back 戦略では、直前回のリスタートの情報だけ採用したため、十分な収束性が得られないという新たな課題が残った。

そこで、著者は、直前回のリスタートの情報だけでなく、さらに過去のリスタートの情報も生かさないかと考えた。以下に、本研究で取り組んだ三つの解決策を述べる。

第一に、従来の Look-Back 戦略を凌駕する新戦略を考え付いた。すなわち、単一のリスタートだけではなく、それまでの複数のリスタートの残差の差分に基づき、残差減少条件の下で次のリスタートの初期解を調整する **Multi-Restarts Look-Back 戦略** である。Multi-Restarts Look-Back 戦略を用いた GMRES(k) 法は、 k 反復の GMRES 法で解を更新する「GMRES part」と、次のリスタートの初期解を調整する「Look-Back part」で構成される。Multi-Restarts Look-Back 戦略では、過去の各リスタートの「GMRES part」と「Look-Back part」の二

つのパートの合算の残差の差分を、次のリスタートの初期解の決定に使用する。しかし、「GMRES part」と「Look-Back part」の残差減少のステップは全く異質のもので、別々の残差の差分を表す変数として扱う方が妥当である、と考えられる。そこで、「GMRES part」の残差の差分と「Look-Back part」の残差の差分に分離して、次のリスタートの初期解決定に用いる**分離型 Multi-Restarts Look-Back 戦略**を考案した。そして、分離型 Multi-Restarts Look-Back 戦略を用いた GMRES(k) 法の実験的に実証した。

第二に、分離型 Multi-Restarts Look-Back 戦略の適用範囲を拡張できることを明らかにした。すなわち、分離型 Multi-Restarts Look-Back 戦略の優れた特徴の一つが汎用性の高さである。そこで、FGMRES(k) 法を含む 3 種類の GMRES(k) 法の variants (変形版) に分離型 Multi-Restarts Look-Back 戦略を適用した算法を新たに導出した。また、3 種類の GMRES(k) 法の variants に分離型 Multi-Restarts Look-Back 戦略を適用し、その収束性向上を実験的に明らかにした。さらに、同戦略を適用するときの GMRES(k) 法の variants の適切なパラメータ設定法を構築した。

第三に、分離型 Multi-Restarts Look-Back 戦略を用いた GMRES(k) 法の有効性をさらに高めるために、計算量の削減と頑強性の向上を図った。分離型 Multi-Restarts Look-Back 戦略を用いた GMRES(k) 法では、「Look-Back part」の残差の差分が零ベクトルになる場合がある。そこで、零ベクトルとなった残差の差分を次のリスタートの初期解決定に用いないように算法を修正し、計算量の増加を事前に抑える工夫をした。また、相対残差の減少の停滞を未然に検出し、その停滞を回避する策を付加することで、頑強性を向上させた。さらに、上記二種類の工夫を施した算法の評価を行い、分離型 Multi-Restarts Look-Back 戦略の有効性が一層向上することを実験的に明らかにした。

論文調査の要旨

科学や工学など様々な解析分野において、数値シミュレーションはそれらの発展に大きく貢献してきた。また、そこで生じる問題は偏微分方程式により記述されることが多い。数値シミュレーションは偏微分方程式を有限要素法などにより離散化することから始まり、その結果得られた連立一次方程式を数値的に解くことに帰着される。数値シミュレーションでは、この連立一次方程式をいかに高速かつ低コストで解くかが重要な課題となる。大規模で疎な複素非対称行列を係数に持つ連立一次方程式の求解では、相対残差が単調に減少する特長を持つ一般化最小残差 (Generalized Minimal RESidual, 以下 GMRES と略す) 法が用いられることが多い。また、GMRES 法では演算量と記憶容量の両面から、反復 k 回毎に初期近似解ベクトルを

再設定するリスタート版 GMRES(k)法がよく使用される。

GMRES(k)法については今まで様々な改良策が提案されてきた。例えば、GMRES(k)法の各リスタート時の初期近似解ベクトルに変動ベクトルを加え修正するという考え方がある。ここで、加える変動ベクトルの選択については、GMRES(k)法の残差が単調に減少するという条件が必要になる。さらに、直前の単一のリスタートの残差減少量に基づき、次のリスタートの初期解ベクトルを選ぶというルックバック戦略に基づく方法もある。ルックバック戦略には、直前回のリスタート情報の利用により、GMRES(k)法の収束性が改善される反面、それよりも古いリスタート情報を考慮できない。そこで、本研究で、著者は直前のリスタート情報だけでなく、さらに古いリスタート情報を活用する手法を開発し、この手法の効果を数値実験で検証したものであり、以下の三つの主要結果として評価できる。

第一の結果は、著者が従来のルックバック戦略の限界を克服した新たな戦略を考案したことである。具体的には、まず単一のリスタートだけではなく、それまでの複数のリスタートの残差の差分に基づき、残差減少条件の下で次のリスタートの初期解を決める多重リスタート型ルックバック戦略を考案した。同戦略を用いた GMRES(k)法は GMRES 法で解を更新する「GMRES パート」と、次のリスタートの初期解を調整する「ルックバックパート」で構成される。また、過去の各リスタートの「GMRES パート」と「ルックバックパート」の二つのパートの合算の残差の差分を、次のリスタートの初期解の決定に使用した。さらに、本研究で、「GMRES パート」の残差の差分と「ルックバックパート」の残差の差分を分離し、次のリスタートの初期解決定に用いる分離多重型ルックバック戦略を考案した。数値実験では、テスト行列 15 個のうち GMRES(k)法に比べて計算時間が半減したものがほとんどで、提案した二つの戦略を用いた GMRES(k)法がルックバック GMRES(k)法よりも収束性が優れていることを明らかにした。

第二の結果は、著者が分離多重リスタート型ルックバック戦略の汎用性が高いことを実証したことである。すなわち、GMRES(k)法だけでなく、Flexible GMRES(k)法などの GMRES(k)法の改良型複合解法への適用が可能であることを実証した。Flexible GMRES(k)法とは、方程式を GMRES(k)法で解く「外部反復」と、前進・後退代入計算を反復法で代用する「内部反復」で構成される解法である。しかし、前回の内部反復の解の有用な情報が次の内部反復の解に十分に伝わらないという課題があった。そこで、著者は、内部反復を分離多重ルックバック戦略のリスタート情報の一つと見做すことによって、分離多重ルックバック戦略の適用を可能にした。数値実験の結果、元の Flexible GMRES(k)法ではまったく収束しなかった 7 個の行列も含めてテストした 15 個すべての行列で収束するようになり、

同戦略の有効性を示した。

第三の結果は、著者が分離多重リスタート型ルックバック戦略を用いた GMRES(k)法の有効性を一層高めるため、計算量の削減と頑強性の向上を実現させたことである。同戦略を用いた GMRES(k)法では、「ルックバックパート」の残差の差分が零ベクトルになる場合、それを次のリスタートの初期解の決定に用いないように算法を修正し計算量増加を抑えた。また、同戦略を用いた GMRES(k)法では、相対残差の減少が停滞するケースが稀にあり、同減少停滞を検出し、停滞を回避する策を新たに加え頑強性を向上させた。数値実験で、分離多重リスタート型ルックバック戦略を用いた GMRES(k)法が高速にかつ収束性が頑強になることを確認した。

以上要するに、本論文は従来の GMRES(k)法に対して、その収束性を向上させる多重リスタート型ルックバック GMRES(k)法と収束性を一層向上させる分離多重リスタート型ルックバック GMRES(k)法を提案し、その有効性を数値実験にて実証したものである。また、GMRES(k)法の改良型複合解法にも適用し、提案した二つのルックバック戦略の適用範囲を拡張した。さらに、計算量削減の工夫と残差停滞の検出と回避の具体的な策を提案し、提案戦略の有効性を一層確かなものにした。これらは情報工学上寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値すると認める。

氏 名 福 本 尚 人
 学位記番号 シ情 博甲第 450 号 (工学)
 学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
 学位論文題名 高性能マルチコア・プロセッサにおける
 コア活用法に関する研究

論文調査委員

- (主 査) 九州大学 准教授 井 上 弘 士
- (副 査) " 教授 村 上 和 彰
- " " " 福 田 晃
- " " " 青 柳 睦

論文内容の要旨

サーバ、ラップトップ PC、携帯電話などの様々な機器にマルチコア・プロセッサが導入されている。複数のプロセッサコアで並列処理を行うことで、消費電力あたりの性能を高めることができるためである。しかしながら、マルチコア・プロセッサは常に実行コア数に見合う性能を得られるわけではない。その原因の一つとして、プロセッサ主記憶間の性能差の拡大（いわゆるメモリウォール問題）の深刻化が挙げられる。主記憶の動作速度はプロセッサより低速であるため、主記憶アクセス時間は長い。また、I/Oピン数はパッケージにより物理的に制限されるため、コア

数に見合う十分なメモリバンド幅を確保することが難しい。その結果、主記憶アクセスが頻発するプログラムではメモリ性能がボトルネックとなり、実効性能が低下する。したがって、マルチコア・プロセッサでは演算性能だけでなくメモリ性能の改善も重要となる。

本論文では、低ハードウェアコストでマルチコア・プロセッサのメモリ性能を改善することを目的として、プログラムの特徴に応じてプロセッサコアの動作を適切に変更する実行方式を提案し、その有効性を評価している。従来の並列処理では、全てのコアで並列プログラムを実行する。これに対して本研究では、実行対象プログラムがメモリ性能ボトルネックであるか否かを見極め、必要に応じて一部のコアをメモリ性能向上に用いる。これにより、ハードウェアコストを抑えつつ、演算時間とメモリ参照時間の和を小さくし、性能向上を達成する。本論文では以下に述べる2つの手法を提案する。

まず、非共有オンチップメモリ搭載型マルチコア・プロセッサを対象としたオンチップメモリ貸与法を論じる。本手法では一部のコアをメモリ性能向上に活用する。当該コアでは、プログラム実行を強制的に禁止し、オンチップメモリをプログラム実行用のコアに貸し出す。メモリ性能向上用コアを増やすことでメモリ性能が改善する一方、並列プログラム実行用のコア数が減るため演算性能が低下する。そのため、高性能化を達成できるようメモリ性能向上用コアの数を適切に決定する必要がある。また、メモリ性能向上用コアの追加による性能改善効果を高めるために、貸与メモリに有用なデータを読み込む。本手法は以下の流れで適用される。まず、対象プログラムを用いて事前実行することで並列性やメモリ参照トレースなどの統計情報を取出す。そして、データ毎の参照回数を元にメモリ性能向上用コアのデータ配置を求める。次に、各統計情報を入力として各々のコア配分における性能を予測し、メモリ性能向上用コア数を決定する。本手法では、主記憶アクセス回数削減による高性能化、ならびに、一部のコアの動作停止による低消費エネルギー化を実現できる。本手法をハードウェアの変更が不要なソースコード変換により実現し、実機を用いて評価した結果、従来の全コア実行と比較して最大 46%の実行時間の削減と 32%の消費エネルギーの削減を達成した。

次に、共有オンチップメモリ搭載型マルチコア・プロセッサを対象とするソフトウェア・プリフェッチ法を提案する。本手法では一部のコアをメモリ性能向上用に用いる。メモリ性能向上用のコアでは、ソフトウェア・プリフェッチを行うヘルパースレッドを実行する。ヘルパースレッド実行によるプリフェッチ効果によりメモリ性能が改善する一方、並列プログラム実行コア数が減るため、演算性能が低くなる。したがって、メモリ参照時間の減少が演算時間の増加を上回るよう、適切にヘルパースレッドを実行す

る必要がある。これを実現するために、ヘルパースレッドを占有実行するコア数を適切に決定する。また、コアがアイドル時にヘルパースレッドを実行することで演算性能の低下を抑えつつ、メモリ性能を改善する。このヘルパースレッド実行法を OS のスレッドスケジューラの修正と 3kB 程度の FIFO バッファの導入により実装し、定量的に評価した結果、従来の全コア実行と比較して最大 42% の性能向上を達成した。

これまで、半導体微細化技術の進歩を背景としてマルチコア・プロセッサの搭載コア数は増加しており、この傾向は続くと考えられている。コア数増加により演算性能が向上する一方、コアあたりのオフチップ・メモリバンド幅の減少、コア間の同期オーバーヘッドの増加などによりコア数に見合う実効性能の達成は難しくなる。本手法ではコアをより性能向上効果の高い目的に活用することで、面積や消費電力の増加をほぼ伴わずに実効性能を高めることができる。このような技術は、多くのコアが搭載されるマルチコア・プロセッサの実効性能改善に有効であり、今後さらに重要になる。

論文調査の要旨

現在、計算機サーバやラップトップ PC、携帯電話などの様々な電子機器システムにマルチコア・プロセッサが搭載されている。複数のプロセッサコアを用いて並列処理を行うことで消費電力あたりの性能を高めることができる。しかしながら、常に使用するコア数に見合った実効性能を得られるわけではない。その原因として、プロセッサ主記憶間の性能差の拡大（いわゆるメモリウォール問題）の深刻化が挙げられる。主記憶として用いられる DRAM はプロセッサと比較して低速であるため、主記憶アクセス・レイテンシが増大する。また、半導体パッケージの I/O ピン数は物理的に制限されるため、コア数の増加に伴い十分なメモリバンド幅を確保することがより難しくなる。その結果、主記憶アクセスが頻発するプログラムでは、メモリ性能がボトルネックとなり実効性能が低下するといった問題が生じる。そのため、シングルコア時代と比較して、マルチコア時代では、演算性能とメモリ性能の改善を同時に考慮することがより重要となる。

そこで本研究では、プログラムの特性に応じて巧みにコアを活用することで、殆どハードウェアコストの増加を伴うことなくメモリ性能を改善する新しいマルチコア実行方式を提案している。従来方式では全てのコアを用いてプログラムを並列実行するのに対し、提案方式ではコアを「プログラム実行用」と「メモリ性能向上用」に使い分ける。そして、演算性能とメモリ性能のバランスを考慮することでプロセッサ性能の向上を達成する。このような概念に基づき、以下に示す 2 種類のコア活用法を提案している。

まず、非共有オンチップメモリ搭載型マルチコアを対象

としたオンチップメモリ貸与法を提案している。本手法では、メモリ性能向上用コアが有するオンチップメモリ資源をプログラム実行用コアに貸し出す。この場合、メモリ資源以外の回路の電源供給を停止することで消費電力の削減も可能となる。メモリ性能向上用コアの数を増やすことでメモリ性能が改善する一方、プログラム実行用コアの数が減るため演算性能が低下する。したがって、高性能化を達成するためには、メモリ性能向上用コアの数を適切に決定しなければならない。そこで、並列化プログラムならびに事前実行により得たプロファイルデータを入力とし、メモリ性能向上用コアの数を決定すると共に実行コードを自動生成するコンパイル環境を構築した。複数ベンチマークを用いた実機での定量的評価を行った結果、従来方式と比較して実行時間を最大 46% 削減し、また、32% の消費エネルギーの削減を達成している。このように、メモリ資源を他のコアに貸し出すといった新しいアイデアの創出に加え、コンパイル環境の構築を行い、その有効性を示していることは高く評価できる。

次に、共有キャッシュメモリ搭載型マルチコアを対象としたメモリ性能向上用スレッド実行法を提案している。メモリ性能向上用コアは、プログラム実行用コアが将来参照するであろうメモリデータを事前にキャッシュメモリにロードするプリフェッチ処理を行う。具体的には、ソフトウェアで実装されたプリフェッチ用スレッドを実行する。これを実現するために OS のスレッドスケジューラを改良すると共に、キャッシュミス情報をコア間で共有するためのハードウェア・サポートを考案した。シミュレーションによる定量的評価を実施した結果、従来方式と比較して最大 42% の性能向上を達成できることを明らかにしている。このように、マルチコアにおいて一部のコアでプリフェッチ用スレッドを実行させるという新しい方式を提案すると共に、それを可能とするハードウェア/ソフトウェア技術を確立したことは高く評価できる。

以上を要約すると、本研究は、マルチコア・プロセッサでの新しい実行方式として、プログラム実行用とメモリ性能向上用にコアを使い分ける技術を提案すると共に、これを可能とするコンパイル技術、ハードウェア・サポート技術、OS 技術を考案し、かつ、定量的評価に基づきその有効性を示したものであり、情報工学の分野、特にコンピュータアーキテクチャの研究分野に対して寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値すると認める。

氏 名 楊 凌 升
学位記番号 シ情 博甲第 451 号 (工学)
学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
学位論文題名 Small Size Broadband Planar Antennas

for Wireless Communication Systems
(無線通信システム用小型広帯域平面アンテナ)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 吉 富 邦 明
(副 査) " " 吉 田 啓 二
" " " 林 健 司
" " 准教授 金 谷 晴 一

論文内容の要旨

In order to fulfill the goal of building a ubiquitous wireless society, "to connect everybody and everything at any place and any time", the integration of existing systems like the well used 2.45 GHz WLAN and future wireless systems is highly desired. Since the Federal Communications Commission (FCC) released the 3.1-10.6 GHz bandwidth for commercial applications of ultra wideband (UWB) systems in 2002, high speed data communication for wireless personal area networks (WPAN) and wireless body area networks (WBAN) becomes possible.

The rapid development of the wireless communication systems also brings a wave of new wireless devices such as smart phone, Personal Digital Assistant (PDA), etc. So the demand for a small size and multiband antenna which can be embedded into these mobile devices becomes stronger. In recent years, many efforts have been paid in the development of small size broadband planar antennas. In order to cover the whole operation band, such as the UWB band, different shapes of the radiation patch has been introduced, such as rectangular, ellipse, triangular, etc. The ground shape is various too, sometimes just similar to the patch and the others can be seen as quasi-self-complementary or something else. In recently published papers, the size of most of the antennas which can cover the whole UWB band is always larger than $20 \times 20 \text{ mm}^2$. For multiband antennas, methods to create new resonance frequency using different shapes of open stubs connect to the radiation patch, and slots on the patch to conduct a band notch effect, etc. have been developed. But for these antennas, the size is still large, normally greater than $30 \times 30 \text{ mm}^2$. So design of smaller sized antennas which can cover the desired frequency band and fulfill the multi channel application becomes the main goal for this dissertation.

In this thesis, Chapter 1 introduces the history and development of wireless systems and recently developed antennas for these systems.

Chapter 2 begins with the basic concepts of planar broadband antennas and the several conventional methods for

broadening the bandwidth of the planar antennas are introduced.

Chapter 3 first studies the effect of the truncated ground and the notch on the ground. By using the truncated ground the impedance bandwidth characteristic can be enhanced. The notch on the ground can improve the impedance matching of the antenna. A unique structure to connect the microstrip feed line and the radiation patch is proposed. By using two circles at the lower corner of the radiating patch, a small size antenna with a total size of $12 \times 17 \text{ mm}^2$ which is much smaller than the UWB antennas reported recently has been realized. This antenna can cover the whole UWB band (3.1-10.6 GHz) and the Ku band (12.4-18.0 GHz). The measurement of the antenna's impedance bandwidth, radiation pattern and other parameters agree well with the simulation. Since the proposed antenna shows omnidirectional radiation pattern through the whole operation band, and is simple to fabricate at a low cost. It is easy to implement in today's wireless communication terminals, which make it a good candidate for UWB applications.

Chapter 4 deals with the miniaturization of a multiband antenna. First we consider the antenna miniaturization. In recent research, a symmetry printed tapered monopole antenna can be cut in the middle to form a half-size antenna, which has a similar characteristics to the original one. This method can reduce the size to 50% without significant performance loss. By using this method, a multiband antenna is designed and analyzed. This miniaturized antenna can still cover most of the UWB band.

Next we consider multiband function. In order to realize new resonance frequency at the lower band, an open L-shaped stub is connected to the radiation patch. The total size of this antenna is $19 \times 20 \text{ mm}^2$ and has two operational bands 1.32 GHz (2.42-3.74 GHz) and 4.68 GHz (5.12-9.80 GHz) which can cover the 3, 4 and 5 UWB group bands (6.336-10.560 GHz) as mentioned in the multiband orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system, WLAN (2.45GHz) band, and WiMAX (2.6/3.5/5.5 GHz) band.

In Chapter 5, another antenna which consists of a radiation patch, a feed line and ground stubs on the top side of the substrate and a truncated ground plane with stubs on the bottom side is proposed. By using notches in the radiation patch to prolong the path of the surface current, the resonance frequency for the lower band can be realized. The antenna has a total size of $10 \times 15.5 \text{ mm}^2$ which is much smaller than the multiband antennas reported recently, and is constructed on a FR4 substrate with a thickness of 1.6 mm. In this design, a dual band 0.45 GHz (2.20-2.65 GHz) and 5.23

GHz (6.52-11.75 GHz) is achieved. Measurements agree well with the simulation in impedance bandwidth, radiation pattern, gain and group delay. This antenna can be used for WLAN and UWB applications.

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

論文調査の要旨

屋外や乗り物等、あらゆる時間・場所でネットワークにつながるユビキタスネットワーク社会を推進するため、無線 LAN (Local Area Network) をはじめとして、高速データ通信を行う無線 PAN (Wireless Personal Area Network) や人体無線網 WBAN (Wireless Body Area Network) がたいへん注目されている。無線 LAN は 2.5GHz 帯域を使用するが、伝送速度は 11Mbps 程度である。無線 PAN や WBAN ではさらに高速通信が可能な通信方式として 10m 程度の短距離で 100Mbps 以上の高速な通信が可能である超広帯域無線 UWB (Ultra Wide Band) が期待されている。UWB は 2002 年に米国の連邦通信委員会により民間利用の許可が下りた 3.1-10.6GHz の帯域を利用する無線技術である。また、無線通信システムの急速な発展によりスマートフォンや携帯情報端末などの新しい小型無線機器が開発されている。これらの携帯機器の小型化と薄型化に伴い、アンテナも小型化に加え、様々なサービスに一つのアンテナで対応可能な多周波化・広帯域化が要求されている。

このためのアンテナとして、近年、小型広帯域平面アンテナの開発が活発に進められている。著者の調査によれば、UWB 帯域全体を動作帯域とする従来のアンテナの大きさは $20 \times 20 \text{mm}^2$ 以上がほとんどである。また、多周波アンテナでは複数の動作周波数帯域を得るために放射器にスタブやスロットを付加するため、アンテナの大きさは通常 $30 \times 30 \text{mm}^2$ 以上である。そのため、超広帯域または多周波帯域で動作する小型平面アンテナの開発は重要な課題であった。

著者は、新しい平面型アンテナの構造を提案し、3つの小型広帯域平面アンテナの開発に成功している。本論文は、この3つのアンテナの開発のための平面アンテナのグラウンドの小型化、放射器と給電線の接続部に関する新しい構造、アンテナの対称性を利用した小型化、スタブあるいはノッチによる多周波化についての研究をまとめたものであり、以下の点が評価できる。

第一に、平面型アンテナのグラウンドを小型にするとともに、そのグラウンドにT字型ノッチを設けることにより広帯域特性を実現し、放射器と給電線の接続部の形状を滑らかな曲線で構成することによりさらに帯域幅を広げることにより成功している。長方形で構成されたアンテナの角を円弧に変え、円弧の半径を変えて広帯域特性が得られる値を見

出すことによりアンテナ形状を決定している。滑らかな曲線で構成されたアンテナは不要な共振を避ける上で効果的な形状と考えられる。アンテナの大きさは $12 \times 17 \text{mm}^2$ であり、従来のアンテナの大きさ $20 \times 20 \text{mm}^2$ に対して 51% の小型化が達成されている。周波数帯域は UWB 帯域全体 (3.1-10.6GHz) および Ku 帯域 (12.4-18.0GHz) をカバーしており、超広帯域の小型平面アンテナの開発に成功している。

第二に、対称型のアンテナの対称面でアンテナを半分切断し、半分の大きさになったアンテナにスタブを接続して、元のアンテナの周波数帯域よりも低い共振周波数をもつ多周波動作のアンテナの開発に成功した。対称型のアンテナの対称面は磁気壁であるため、半分に切断したアンテナもほぼ元のアンテナと同じ電流分布を持つが、アンテナが小さくなるため周波数特性は高域側にずれる。そこで空いた部分にスタブを設け、元のアンテナの動作周波数帯域よりも低い共振周波数を得るという工夫を行っている。その結果、大きさが $19 \times 20 \text{mm}^2$ と小型であり、周波数帯域は 2.42-3.74GHz および 5.12-9.80GHz の 2 周波帯域をもつ多周波小型平面アンテナを実現した。このアンテナの大きさは同じ動作周波数をもつ従来のアンテナの大きさ ($30 \times 30 \text{mm}^2$) に比べて 42% という小型化を実現している。

第三に、多周波数動作を実現するためにアンテナの放射器にスタブという突起構造を付加すると元のアンテナよりも形状が大きくなるが、ノッチという切り欠きを設けると大きさが変わらないことに着目し、ノッチによってアンテナの表面電流の経路を長くすることにより、元のアンテナの大きさを大きくすることなく低い動作周波数をもつ多周波動作アンテナの開発に成功した。周波数帯域は 2.20-2.65GHz および 6.52-11.75GHz の 2 周波帯域である。このアンテナは大きさが $10 \times 15.5 \text{mm}^2$ であり、同じ動作周波数をもつ従来のアンテナの大きさ $30 \times 30 \text{mm}^2$ に対してわずか 17% である。

以上要するに、本研究は、ユビキタスネットワーク社会の実現に不可欠な無線技術の要素である小型広帯域平面アンテナの開発に成功したものであり、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) の学位に値するものと認める。

氏名 黒澤昌志
学位記番号 シ情博甲第452号(工学)
学位授与の日付 平成24年3月27日
学位論文題名 絶縁基板上における $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) 薄膜の結晶方位制御に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 准教授 佐道泰造
(副査) " 教授 浅野種正
" " " 中島寛

論文内容の要旨

大規模集積回路 (LSI: Large Scale Integrated Circuit) は、その基本回路素子である Si 電界効果トランジスタ (MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) をスケーリング則に従い微細化することで高性能化 (高速・低消費電力化) を達成してきた。しかし、極度な微細化が進んだ結果、種々の物理的限界が顕在化しており、Si-MOSFET の微細化のみで LSI の高性能化を図ることが困難になりつつある。このため、Si 半導体に IV 族の異種原子 (Ge 等) を導入し、ヘテロ半導体 (SiGe 等) を形成し、新機能 (キャリア移動度の向上等) を発現する研究が国内外で活発化している。一方、情報化社会の進展に伴い、人間と情報機器のインターフェースの重要性が飛躍的に増大している。今まで、独立に研究開発が行われてきたディスプレイや太陽電池などの異種機能デバイスを LSI と融合し、統合的集積化システム (システムオンパネル) を創製すれば、情報機器のユーザビリティが飛躍的に向上し、大きなイノベーションをもたらすと期待される。この実現には、透明な絶縁基板上に結晶方位の制御された IV 族系半導体 (Si, SiGe, Ge) を高品位形成する新しい結晶成長技術の創出が必須である。

本論文は、次世代情報機器 (システムオンパネル) の実現を目指し、その実現の鍵となる絶縁基板上における $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) 薄膜の結晶方位制御技術の研究を行ったものであり、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、金属誘起固相成長法を用い、絶縁基板上における Si 結晶の方位制御の可能性を探索した。Ni を触媒金属として用いた Ni 誘起横方向成長法では、Ni 触媒から $20 \mu\text{m}$ 以上横方向成長した領域において、非常に高い (110) 配向率 (約 95%) を有する Si 結晶が得られることを明らかにした。また、Al を触媒金属に用いた Al 誘起層交換成長 (AIC: Al-Induced Crystallization) 法に着目し、非晶質 Si/Al 界面に存在する Al 自然酸化膜 (非晶質 Al_2O_3) の膜厚を変調することで Si 結晶の配向方向を制御する界面酸化膜変調型 AIC 法を考案した。この手法を用いて、(100) 又は (111) 方位へ優先配向した Si 結晶粒 (粒径: 約 $20 \sim 100 \mu\text{m}$) を実現するとともに、界面酸化膜の固相成長が Si 結晶核の優先方位に与える効果を考慮した配向成長モデルを提案し、この現象を統一的に説明した。

第 3 章では、AIC 法を $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0 < x < 1$) 混晶系へ展開し、その基礎特性を解明するとともに、結晶方位制御の可能性を検討した。成長特性に与える Ge 濃度と界面酸化膜厚の効果を系統的に解明し、界面酸化膜厚の適正化により全 Ge 濃度域 ($0 < x < 1$) における大粒径 ($> 20 \mu\text{m}$) $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 結晶の形成を実現した。しかしながら、第 2 章で開発した界

面酸化膜変調による結晶方位制御手法は、低 Ge 濃度域 ($x \leq 0.2$) のみで有効であり、それを越える Ge 濃度域 ($x > 0.2$) ではランダム配向となった。この現象が、Al 膜中におけるランダムな SiGe バルク核の発生に起因することを明らかにし、Al 膜の薄膜化によりバルク核の発生を抑制するとともに、 SiO_2 基板との界面における (111) 優先核発生を促進する手法を考案し、全 Ge 濃度域において高い (111) 配向率 (\geq 約 70%) を実現した。

第 4 章では、絶縁基板上における方位制御された単結晶 Ge 薄膜の形成を目的とし、金属誘起固相成長法による Si 結晶の方位制御技術を SiGe ミキシング誘起溶解成長法による GOI (Ge-on-Insulator) 形成技術と重畳する手法を検討した。金属誘起固相成長法を用いて形成した Si(100), (110), 及び (111) 単結晶粒を溶解成長のシードとすることで、(100), (110), 及び (111) 面方位を有する単結晶 GOI 細線 (長さ: $200 \mu\text{m}$, 幅: $3 \mu\text{m}$) を同一絶縁膜上に混載することに成功した。本プロセスで得られた GOI 層には結晶欠陥 (転位等) は存在せず、基板との熱膨張係数差に起因する伸張 2 軸歪みが導入されていることを明らかにした。非晶質な絶縁基板上における方位制御された単結晶 Ge 薄膜の実現であり、高性能システムオンパネルや三次元集積回路の実現に直結する革新的結晶成長技術の創成である。

第 5 章では、本論文を総括し、今後の研究課題について整理した。

論文調査の要旨

トランジスタの微細化 (スケーリング) を指導原理とした大規模集積回路 (LSI: Large Scale Integrated Circuit) の性能向上が物理的限界に直面している。LSI 性能のさらなる向上を目指し、微細化に代わる新しいアプローチとして、従来材料 (シリコン (Si)) よりもキャリア伝導特性に優れたシリコンゲルマニウム (SiGe) やゲルマニウム (Ge) をチャンネルに用いた新材料トランジスタ技術の研究開発が活発化している。また、情報化社会の進展に伴い、人間と情報機器のインターフェースの重要性が飛躍的に増大している。今まで独立に研究開発が行われてきたディスプレイや太陽電池などの異種機能デバイスを超高速 LSI と融合し、集積化システム (システムオンパネル) を創製すれば、情報機器の利便性が飛躍的に向上する。トランジスタや異種機能デバイスの動作特性は、結晶方位に依存するため、システムオンパネルの実現には、透明な絶縁基板上に結晶方位の制御された IV 族半導体 (Si, SiGe, Ge) を高品位形成する新しい結晶成長技術の創出が必須となる。

本研究は、システムオンパネルの創出を目指して、新しい結晶成長プロセスの提案とその検討を行い、絶縁基板上における $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) 薄膜の結晶方位制御に成功したものである。

本研究で得られた成果は、以下の点で評価できる。

1. 金属誘起固相成長法を用い、絶縁基板上における Si 結晶の方位制御の可能性を探索した。Ni 誘起横方向成長法を検討し、Ni 触媒から 20 μm 以上横方向成長した領域において、高い(110)配向率(約 95%)を有する Si 結晶が得られることを明らかにした。また、Al 誘起層交換成長(AIC: Al-Induced Crystallization)法に着目し、非晶質 Si/Al 界面に存在する Al 自然酸化膜の膜厚を変調することで、(100)又は(111)方位へ優先配向した Si 結晶粒(粒径: 20~100 μm)を実現した。

2. AIC 法を $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) 混晶系へ展開し、その基礎特性を解明するとともに、結晶方位制御の可能性を検討した。成長特性に与える Ge 濃度と界面酸化膜厚の影響を系統的に解明し、界面酸化膜厚の適正化により全 Ge 濃度域 ($0 \leq x \leq 1$) における大粒径(>20 μm) $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 結晶の形成を実現した。さらに、Al 膜を薄膜化してランダムな核の発生を抑制するとともに、絶縁基板との界面における(111)優先核発生を促進する手法を考案し、全 Ge 濃度域において高い(111)配向率(\geq 約 70%)を実現した。

3. 金属誘起固相成長法による Si 結晶の方位制御技術を SiGe ミキシング誘起溶解成長法による GOI(Ge-on-Insulator)形成技術に重畳する手法を検討した。金属誘起固相成長法を用いて形成した Si(100),(110),及び(111)単結晶粒を溶解成長のシードとすることで、(100),(110),及び(111)面方位を有する単結晶 GOI 細線(長さ:200 μm ,幅:3 μm)を絶縁膜上に混載することに成功した。

以上要するに本研究は、絶縁膜上における $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) 薄膜の結晶成長プロセスについて詳細な検討を行い、次世代高性能デバイスの実現に不可欠な結晶方位制御に成功したもので、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(工学)の学位に値するものと認める。

氏 名 東 藤 大 樹
 学位記番号 シ情 博甲第 453 号 (情報科学)
 学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
 学位論文題名 Toward Characterization of
 False-name-proof Mechanisms under
 Cardinal Utility (基数的効用に基づく
 架空名義操作不可能なメカニズムの
 特徴付けに関する研究)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 横 尾 真
 (副 査) " " 山 下 雅 史
 " " 准教授 峯 恒 憲

論文内容の要旨

メカニズムデザインとは、複数の利己的な主体(エー

ジェント)間での合意形成手法(メカニズム)に関する理論であり、計算機科学と経済学の学際領域である。ネットワーク上での合意形成においては、一人のエージェントが複数のエージェントになりすます、架空名義操作と呼ばれる不正行為の存在が指摘されている。ネットワーク環境では各エージェントの身元を正確に認証することは困難であり、この不正行為の影響を受けない、即ち、架空名義操作不可能なメカニズムの設計理論の構築は、ネットワーク上の安全な合意形成のための重要課題である。

本研究では、架空名義操作不可能なメカニズムが満たす理論的性質を解明し、架空名義操作不可能なメカニズムの設計理論の基礎を構築することを目的とする。具体的には、各エージェントが基数的効用(定量的に測定可能な効用)を持つと仮定できる場合において、(i)複数の商品を同時に販売する組合せオークション、(ii)時間の経過と共に、動的に参加・退出するエージェントに対して商品を販売する動的オークション、(iii)エージェントの希望に応じて、エージェントが共有する施設の配置を定める施設配置問題の各問題において、メカニズムが架空名義操作不可能となるための必要十分条件を解明する。また、すべての情報が得られている理想的な場合における合意と比較してメカニズムの性能を議論する競合比解析と呼ばれる手法を用いて、架空名義操作不可能なメカニズムの性能を議論する。さらに、メカニズムに関する望ましい性質である収入単調性および無羨望性と架空名義操作不可能性との関係を考察する。より詳細には、主催者の収入が参加エージェント数に対して単調に増加することを保証する収入単調性と架空名義操作不可能性との関係を考察する。また、エージェント間の羨望の不存在性を保証する無羨望性に関して、一対一の関係に限定されていた伝統的な概念を、一対多、多対一、および多対多の関係に拡張し、架空名義操作不可能性との関係を考察する。

本論文は以下の 8 章から構成される。第 1 章では、本研究の背景と目的、および得られた結果に関して概説する。第 2 章では、伝統的なメカニズムデザインのモデルと架空名義操作不可能性の定式化を示す。第 3 章、第 4 章、第 5 章では、上記の三つの問題に対してメカニズムが架空名義操作不可能となるための必要十分条件を示し、競合比に関する解析を示す。第 6 章、第 7 章では、収入単調性、および無羨望性を満たす組合せオークションメカニズムの性質を特徴付け、架空名義操作不可能性との関係を考察する。第 8 章で結論と今後の課題を述べる。

論文調査の要旨

メカニズムデザインとは、複数の利己的な主体(エー

数のエージェントになりすます、架空名義操作と呼ばれる不正行為の存在が指摘されている。ネットワーク環境では各エージェントの身元を正確に認証することは困難であり、この不正行為の影響を受けない、即ち、架空名義操作不可能なメカニズムの設計理論の構築は、ネットワーク上の安全な合意形成のための重要課題である。メカニズムデザインの主要な適用分野として、各エージェントが基数的効用（定量的に測定可能な効用）を持つ場合が考えられる。エージェントが基数的効用を持つ場合、エージェント間の効用は共通の尺度、例えば金銭を用いて比較可能となる。本研究は、このような状況において、架空名義操作不可能なメカニズムが満たす性質を解明し、架空名義操作不可能なメカニズムの設計理論を構築することを目的とするものであり、以下の点で評価できる。

第一に、著者は (i) 複数の商品が同時に販売される組合せオークション、(ii) 時間の経過と共に、動的に参加・退出するエージェントに対して商品を販売する動的オークション、(iii) エージェントの希望に応じて、エージェントが共有する施設の配置を定める施設配置問題の各問題において、メカニズムが架空名義操作不可能となるための簡潔かつ効率的に検証可能な必要十分条件を与えている。

第二に、著者は上記の各問題において、メカニズムによって得られる社会全体の効用の総和（社会的余剰）を用いてメカニズムの性能を議論している。具体的には、エージェントに関するすべての情報が得られている理想的な場合における合意との比較を行う競合比解析と呼ばれる手法を用いて、架空名義操作不可能なメカニズムの競合比を理論的に示している。

第三に、著者は、収入単調性と無羨望性と呼ばれる二つの性質と、架空名義操作不可能性との関係を解明している。収入単調性とは、オークションにおいて主催者の収入が参加エージェント数に対して単調に増加することを保証するものである。また、無羨望性は、エージェント間の羨望の不存在性を保証するものである。著者は、収入単調性と架空名義操作不可能性は、多くの場合に両立不可能であることを示している。また、著者は、従来は一对一の関係に限定されていた無羨望性の伝統的な定義を、一对多、および多対多の関係に拡張し、架空名義操作不可能性が一对多の無羨望性を包含することを示している。

以上要するに、本論文はインターネットのような不特定多数の参加者が集まる環境で、架空名義操作と呼ばれる不正行為の影響を受けない合意形成メカニズムが満たすべき理論的性質を解明し、架空名義操作の影響を受けないメカニズムを設計する際の指針を示したものであり、情報学上寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文に値すると認める。

氏 名 ALI ISMAIL ALI AWAD
 学位記番号 シ情 博甲第 454 号 (学術)
 学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
 学位論文題名 Efficient Fingerprint Classification for On-Line Biometric Authentication
 (オンラインバイオメトリック認証のための効率的な指紋画像分類)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 村 上 和 彰
 (副 査) " " 内 田 誠 一
 " " 准教授 井 上 弘 士
 " " " 稲 永 俊 介
 " " " 馬 場 謙 介

論文内容の要旨

生体情報による個人の特定は犯罪捜査等に古くから利用されている。近年、生体情報による個人の特定が、様々なシステムでの認証（本人確認）へ適用される機会が増えている。特に、インターネットや携帯型デバイスを用いたシステムの普及により、限られた時間で、粗い画像を用いる「オンライン」型の認証が求められている。膨大な数の画像に対する照合時間短縮の単純な方法は、画像の分類を行う事である。粗い画像に対して、効率的で、精度の良い分類手法を開発できれば、高速・高精度のオンライン認証の実現につながる。

本研究は、本人確認の確実さや採取の容易さから、生体情報として指紋に着目している。また、画像の採取方法として、一般に普及している専用センサーではなく、非接触・非拘束によるものを想定している。この前提により、画像の分類では、位置や回転についてのノイズを考慮しなければならない。また、画像の分類を行うための計算環境として、信号処理に用いられる演算を高速に実行できるものと仮定している。

本論文で提案されている分類手法では、指紋画像の特異点を利用して画像を分割し、それぞれの分割画像に対して高速フーリエ変換（FFT）を適用することで、分類のための特徴量を抽出している。これによって、入力画像全体に対して FFT を適用する既存手法に比べ、高速かつ高精度の分類を実現している。提案手法では、特異点を利用して位置ずれを修正することができる。また、特異点抽出の際に特異点の向きを特定可能な手法を用いることで、回転についてのずれを修正することができる。

本論文では、まず、分類の処理時間について、入力画像全体へ FFT を適用する既存手法との比較を理論的に行っている。また、指紋画像の特異点抽出手法として提案手法に適したものを見つけるために、代表的な 2 つの特異点抽出手法について処理時間と精度を調べている。次に、提案

手法を実装し、一般に用いられる指紋画像データベースについて分類を行い、処理時間と分類精度を調べている。結果として、提案手法は既存手法に比べ、処理時間および分類精度ともに改善されることがわかった。また、実際のモバイル機器等の計算環境を考慮しても、処理時間は十分短いことがわかった。

論文調査の要旨

生体情報、特に指紋を用いた個人特定では、より高速で頑強な照合処理が必要になっている。生体情報を用いた個人特定は犯罪捜査等に古くから利用されている。近年、このような生体情報を用いた個人特定が、様々なシステムにおいて本人確認のための認証へ適用される機会が増えている。特に、インターネットや携帯型デバイスを用いたシステムの普及により、限られた時間内で処理を行う「オンライン」型の認証の要求が高まっている。膨大な数の画像に対する照合時間短縮の単純な方法は、画像の分類を行うことである。効率的かつ精度の高い分類手法を開発できれば、高速・高精度なオンライン認証の実現につながる。

本論文の第一の貢献は、入力指紋画像を4分割し、分割後の各画像から求めた特徴量を用いることで、指紋画像の高速な大分類を実現した点にある。この大分類により、データベース中の全ての指紋画像と照合する必要はなくなる。すなわち、同じタイプに分類されるものとのみ照合を行えばよく、より高速に最も類似した指紋画像を検索できる。具体的な特徴量としては、高速フーリエ変換 (FFT) によって得られる値を用いる。これによって、画像の位置の違いや回転等のノイズに対して頑強で、専用回路等による高速化が可能なアルゴリズムを実現している。

本論文の第二の貢献は、入力指紋画像を4分割する際の、分割中心点の求め方について、妥当な方法を提案している点にある。提案手法は分割中心点として、指紋の隆線の向きが大きく変化する特異点を利用している。この分割によって、入力画像全体に対して FFT を適用する手法に比べ、実際の処理時間を短縮した。また、大まかな隆線の向きが特異点を通る線を境界に変化することから、分類の精度を向上させることが可能となる。

さらに、本論文の第三の貢献として、ノイズに対する頑強性に関して、特異点を利用して位置と回転についてのずれを修正することを可能にした点が挙げられる。特異点抽出の具体的な方法としては、代表的な2つの手法、ポアンカレ・インデックス法 (Poincare index method) と複素フィルタ法 (complex filter method) について、処理時間と特異点抽出の精度を調べている。この結果、特に提案手法で求められる条件 (特異点の位置に加えて向きも求めることと、2種類ある特異点のうち片方のみを求めること) の下では、複素フィルタ法が時間・精度ともに優れていることを確認している。この部分のみについても、指紋画像の処

理で一般的に用いられる2つの特徴点抽出手法の比較を定量的に行った点で、関連分野への貢献が認められる。

以上3点の貢献について、それらの有効性を証明するべく、本論文では大規模な定量的評価実験を行っている。具体的には、複素フィルタ法を利用した提案手法の実装を行い、一般に用いられる指紋画像データベース (Fingerprint Verification Competition 2002 データベース) に対して処理時間と分類精度を調べている。処理時間については、汎用的な PC (1.87GHz CPU) 上での実行時間が、1つの指紋画像あたり平均で 0.28 秒であり、オンライン認証の観点から許容可能な時間で実行できることを検証している。また、提案手法の分類精度は 91.4% であり、既存手法の精度 (84.0 ~ 87.0%) と比較して高精度であることを確認している。本研究は、画像の位置や回転についてのノイズに対する堅牢性を持つ分類手法のうち、FFT に基づくものとして最も高速かつ高精度の手法を開発した点で高く評価できる。

以上を要約すると、本研究は、指紋画像の分類を高速・高精度に行うアルゴリズムを開発・実装しその有効性・有用性を示したものであり、本研究で得られた知見は情報科学の分野に対して寄与するところが大きい。よって、本論文は博士 (学術) の学位論文に値すると認める。

氏 名 丸 山 史 郎
 学位記番号 シ情 博甲第 455 号 (情報科学)
 学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
 学位論文題名 String Data Compression for
 Information Retrieval
 (情報検索のための文字列データ圧縮)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 竹 田 正 幸
 (副 査) " " 瀧 本 英 二
 " " 准教授 正 代 隆 義
 " 九州工業大学 " 坂 本 比 呂 志

論文内容の要旨

データ圧縮は、ディスク容量の節減やデータ転送コストの低減を目的として古くから研究され、様々な圧縮法が提案されてきた。圧縮されたデータを利用する際には、まず伸張した後に処理プログラムにかけることが一般的である。しかし、圧縮テキスト上のパターン照合アルゴリズムの開発 (Amir et al. 1996) を契機に、伸張を行わず圧縮データ上で種々の処理を行う研究が盛んになった。従来、圧縮法の評価基準は、主として、(1)圧縮率、(2)圧縮に要する計算時間/領域、(3)伸張に要する計算時間/領域の三つであったが、新たに(4)圧縮データ上での処理に要する計算時間/領域、が加わった。

この新しい評価基準に適した圧縮フォーマットを与え

る圧縮スキーマとして、文法変換に基づく圧縮(Kiefer & Yang 2000)が注目されている。このスキーマでは、入力文字列からそれを一意に生成する文脈自由文法を作成(文法変換)し、適当な方法で符号化する。文法圧縮は、入力が繰り返しを多数含む(highly-repetitive)ときに威力を発揮する。また、Lempel-Ziv 法を初めとする既存の圧縮法の多くは、文法圧縮そのものと見なせるか、または、簡単に文法へ変換できる。解決すべき研究課題は次の二つに大別される。

- (A) 基準 1-3 に照らして性能の良い文法変換アルゴリズムを開発すること。
- (B) 文法上で動作する効率の良い文字列処理アルゴリズムを開発すること(基準 4)。

本研究では、理論と実用の両面からこれらの課題に取り組む、以下に述べる研究成果を得た。

まず、課題(A)について、与えられた入力文字列を一意に生成する最小サイズの文法を求める問題は NP 困難であるため、この最適化問題に対する近似アルゴリズムの開発に取り組んだ。既存研究として、近似率 $O(\log(n/g_*))$ をもつ近似アルゴリズムが複数提案されている。ここに、 n は入力文字列長、 g_* は最小サイズの文法のサイズを表す。しかしこれらは、 $\Omega(n)$ 領域を必要とするため、大規模なデータを扱う場合に実用性を欠く。

一方、Sakamoto (2004) の開発した近似アルゴリズム LCA は、近似率は $O(\log n \log g_*)$ 、領域計算量は $O(g_* \log g_*)$ である。本研究では、この LCA を基に、理論と実用の両面から改良を行った。理論的改良としては、Edit-Sensitive-Parsing (ESP) という一種の文法変換に基づき、領域計算量 $O(g_* \log g_*)$ を維持したまま近似率を $O(\log n \log^* n)$ に改善することに成功した。一方、実用的改良としては、LCA をオンラインアルゴリズムに改変することにより、領域計算量を出力サイズに関して線形に抑えることに成功した。近似率は $O(\log^2 n)$ となるが、実験により、圧縮率はほとんど低下しないことが確認された。このアルゴリズムは、既存の文法圧縮アルゴリズムに比べ、領域に関して非常に効率的であるという長所をもつ。

次に、(B) の課題として、圧縮データ上で文字列パターン照合を効率的に行う問題に取り組んだ。文字列データに対する索引構造として、自己索引(self-index)の研究が盛んである。自己索引とは、索引が文字列データ自体を含んでいて、かつ、全体のサイズが入力データサイズより小さく圧縮されたものをいう。本研究では、文法圧縮のひとつである ESP を基に、ESP 索引と名付けた新しい自己索引を提案した。ESP の文法サイズを g とするとき、それから得られる ESP 索引のサイズは、 $(1+\varepsilon)g \log g + 4g + o(g)$ ビットとなる。ここに、 ε は 1 以下の任意の正数とする。この ESP 索引を用いると、 $O((\log^* n/\varepsilon)(m \log g + occ(\log m \log g)))$ 時間でパターンの出現回数を求めることができる。ここに、 occ

はパターンとテキストの ESP における極大共通木の個数である。さらに、 $g \log n$ ビットの領域を用いれば、全出現位置の枚数が同じ応答時間でできるように改良できる。また、長さ m の部分文字列抽出も $O((m+\log n)/\varepsilon)$ 時間で可能である。

さらに、同じく(B)の課題として、圧縮パターン照合の問題に取り組んだ。上述の自己索引が入力テキストに圧縮その他の前処理を施して得られるデータ構造を主記憶上に置くのに対し、圧縮パターン照合では、テキストデータに圧縮以外の前処理を施さず圧縮データを 2 次記憶から読み出しながら逐次処理を行う。圧縮パターン照合の第 1 の目標は、「圧縮データを伸張した後に任意のパターン照合アルゴリズムを適用する方法より高速に」であるが、より挑戦的な目標として「非圧縮テキスト上で行う文字列パターン照合よりも短い時間で動作するアルゴリズムの開発」がある。すなわち、「圧縮によるパターン照合の高速化」である。この第 2 の目標を達成するためには、パターン照合に向けた圧縮フォーマットを選ぶ必要がある。Shibata ら(2000)は、Byte-Pair-Encoding (BPE) というほとんど無名の圧縮法に着目して、BPE 圧縮テキスト上で動作する KMP 型パターン照合アルゴリズムを提案し、圧縮率にほぼ比例した割合でパターン照合時間を短縮できることを示した。しかし、この BPE 法は圧縮率があまり良くないという問題があった。本研究では、これを劇的に改善することに成功した。まず、従来の文法変換圧縮が文脈自由文法への変換を行うのに対し、制限付きの文脈依存文法への変換を行う、 Σ 依存文法変換と名付けた新しい圧縮スキーマを提唱した。次に、BPE の文法変換アルゴリズムを拡張した Σ 依存文法変換アルゴリズム、および、得られた圧縮データ上で動作する圧縮パターン照合アルゴリズムを開発した。計算機実験によると、圧縮率は、標準的な圧縮プログラムである Gzip や Repair などと同等であり、圧縮パターン照合は、BPE 上のものと比べ約 2 倍高速になった。

論文調査の要旨

機械可読データの大規模化が進む今日、データ圧縮はその重要性を増している。データ圧縮によって通信コストの低減やディスク格納時の省スペース化を図ることができるが、その代償として、データを使用する際に圧縮データを伸張する必要が生じる。もし、圧縮データを陽に伸張することなくデータ処理を高速に実行できるならば、この問題は解決する。こうして、1990 年代より、伸張を行わずに圧縮データ上で種々のデータ処理を行うアルゴリズムの研究が行われるようになった。これにより、データ圧縮法の古典的な評価基準である(1) 圧縮率、(2) 圧縮に要する時間と領域、(3) 伸張に要する時間と領域、に加えて、(4) 圧縮データに対する種々の処理に要する時間と領域、が新たに用いられるようになった。一方、近年注目を集めている

圧縮スキーマとして文法に基づく圧縮（文法圧縮）がある。このスキーマでは、入力文字列からそれを一意に生成する文脈自由文法を作成し、適切な方法で符号化する。文法圧縮は、入力が繰り返しを多数含むときに威力を発揮する。

本研究は、(A)基準(1)(2)(3)に照らして性能の良い文法圧縮アルゴリズムの開発、および、(B) 得られた文法上で効率良く動作するアルゴリズムの開発（基準(4)），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、最小サイズの文法を求める問題に対する近似アルゴリズムの開発に取り組んでいる。既存研究である LCA アルゴリズムに着目し、理論と実用の両面からその改良を行っている。理論的には、LCA の領域計算量を維持したまま近似率を改善することに成功しており、実用的には、LCA をオンラインアルゴリズムに改変し、領域計算量を出力サイズに関して線形に抑えるとともに、計算機実験によってその有効性を確認している。このアルゴリズムは、既存の文法圧縮アルゴリズムに比べ、領域に関して非常に効率的であるという長所をもっており、文法圧縮の実用性を大きく前進させた研究として高く評価できる。

第二に、(B)の課題として、圧縮データを自己索引として用いることにより、文字列パターン照合を効率的に行う問題に取り組んでいる。自己索引とは、索引が文字列データ自体を含んでいて、かつ、全体のサイズが入力データサイズより小さく圧縮されたものをいい、近年盛んに研究されている。本論文では、Edit-Sensitive-Parsing (ESP)という一種の文法圧縮手法に基づき、ESP 索引と名付けた新しい自己索引を提案し、パターンが十分長い場合、既存の自己索引と比べてパターン照合を高速に行えることを示している。ESP は、本来、編集距離の変種を効率的に求めるためのデータ構造として提案されたものであるが、本研究はこれを文法圧縮と捉え直して組合せの性質を究明したものであり、文字列の組合せ論分野における貢献は極めて大きい。

第三に、同じく(B)の課題として、圧縮パターン照合の問題に取り組んでいる。圧縮パターン照合の目標の一つとして「圧縮によるパターン照合の高速化」がある。既存研究として、Byte-Pair-Encoding (BPE)圧縮法を用いた Shibataらの手法が知られているが、BPE 法は圧縮率が低いという問題があった。本研究では、 Σ 依存文法圧縮という新しい圧縮スキーマを提唱し、その下で、文法圧縮アルゴリズム、および、圧縮パターン照合アルゴリズムを開発している。計算機実験によると、圧縮率は標準的な圧縮プログラムである Gzip や Re-pair などと同等であり、圧縮パターン照合は BPE 上のもものと比べ約 2 倍高速になった。すなわち、本研究成果は、圧縮パターン照合の効率を劇的に改善したもので高く評価できる。

以上要するに本研究は、近年注目を集めている圧縮スキ

ーマである文法圧縮について、実用的な文法圧縮アルゴリズムの開発とともに、文法を索引として用いる新しい索引手法の開発、さらに、 Σ 依存文法圧縮の提案と高速な圧縮パターン照合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 周 秉 慧
 学位記番号 シ情 博甲第 456 号（工学）
 学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
 学位論文題名 Discovering Overlapping Communities
 by Identifying Community-Connecting
 Nodes (コミュニティ連結ノードの検
 出に基づく重複コミュニティ発見)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 鈴木 英之進
 (副 査) " " 長谷川 隆 三
 " " " 廣 川 佐千男

論文内容の要旨

Many real data sets can be described in the format of graphs which capture relationships among objects. Community detection is the problem of interpreting the global organization of such graphs as the combination of communities, with many edges joining vertices of the same community and comparatively few edges joining vertices of different communities. Communities in a network often overlap to some extent instead of being disjoint so a node may belong to several communities. Such communities are called overlapping communities, e.g., two research fields that share a portion of common researchers, multiple cellular processes that require same proteins to function. We call nodes that belong to multiple communities overlapping nodes.

To discover overlapping communities, clique-based methods, fuzzy-based methods and topology-based methods are proposed. Clique-based methods consider a union of adjacent cliques as a community such that nodes belonging to multiple cliques are overlapping nodes. Fuzzy-based methods discover overlapping nodes by assigning probabilities to communities that are adjacent to nodes. Topology-based methods regard central nodes on the paths from one community to another one as overlapping nodes. However, clique-based methods fail to assign community memberships to nodes that are not members of cliques. Additionally, we have found that the existing methods discussed above lack consideration to edges that link a vertex to its neighbors

belonging to different communities, which often leads to counter-intuitive clustering results.

In this dissertation, we propose *community-connecting nodes*, which are important nodes that connect communities. According to connections in relationship with their neighbors, we divide them into *bridges*, *gateways* and *hubs*. Considering a node that connects two communities for simplicity, there can be three cases: the node that has few connections to the both communities, the node that is connected more densely with nodes in one community than nodes in the other, and the node that is densely connected to the both communities. The three cases correspond to a bridge, a gateway and a hub, respectively. We can easily extend to cases in which there exist more than two communities by allowing a node to be a gateway and a hub at the same time.

We further propose a new clustering algorithm based on community-connecting nodes to discover overlapping communities. Those vertices are regarded as clues to detecting community boundaries. The clustering algorithm discovers candidates of communities by first determining community memberships for community-connecting nodes and their neighbors in consideration of relationships between neighbors of the nodes, and then propagating the memberships to the rest of nodes. The final result of the community structure is obtained by using a fitness function, which is used to iteratively merge candidates of communities and to give the number of communities automatically.

Extensive experiments on a variety of real data sets and benchmark graphs show the effectiveness of our proposed method. Experimental results on a word association data set show that by considering overlapping nodes and nodes that do not belong to any community together, the boundaries of communities discovered by our method conform to semantics of words and fit our intuition unlike the boundaries discovered by the existing methods. From the experiments on benchmark graphs, we found that our method is more effective by 10% than the existing overlapping methods in terms of NMI when the input graph is similar to real networks, i.e., both node degrees and community sizes follow power law distributions. Also, our method achieves the best performance compared to the existing overlapping methods when the input graph has a relatively low average density of edges, which is often observed in social networks.

論文調査の要旨

社会ネットワーク、化学構造、World Wide Web などグラフで表現されるデータは数多く存在する。コミュニティ発見は、グラフのノード群をクラスタリングすることにより

隠れた構造を発見することを目的とし、重要な研究分野と広く認識されている。本論文では、コミュニティ発見で最も一般的である、コミュニティ内のエッジが密でコミュニティ間のエッジが疎となる、人間の直観に合うコミュニティを求める問題を対象とする。コミュニティ発見を目的とする既存手法では通常、ひとつのノードはひとつのコミュニティに所属すると仮定する。もっとも近年では、現実世界でのコミュニティ構造をより正確に反映するため、ひとつのノードが複数のコミュニティに所属することを許す重複コミュニティ発見が注目を集めている。ただし、既存の重複コミュニティ発見手法はコミュニティ境界に存在するノードに対する考え方が単純であるため、直観に合わない結果を返してしまう場合が多いという欠点を有し、大きな問題となっている。

本論文は、(A) コミュニティを連結するノードの考案、および、(B) 提案したコミュニティ連結ノードに基づく重複コミュニティ発見手法の開発、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、コミュニティを連結するノードを *Bridge*, *Gateway*, *Hub* という 3 種類に分類し、これらをノードの連結密度だけに基づいて定義した。既存研究は、クリークなどに基づいたコミュニティ発見の結果をふまえてこの種のコミュニティ連結ノードを検知しており、コミュニティ発見が不正確な場合には検知結果が直感に合わない点が問題となっている。本論文で提案したコミュニティ連結ノードは、コミュニティ発見の結果を要さないためにこの欠点がなく、実データを使った実験でも既存手法に比較してより直観に合うことが示されており、高く評価できる。

第二に、課題 (B) として、上記 3 種類のコミュニティ連結ノードに基づき重複コミュニティを発見する手法を確立した。この手法は、3 種類のコミュニティ連結ノードがそれぞれ表すコミュニティ境界線を用い、互いに重複しあう可能性があるコミュニティ群を発見し、どのコミュニティにも属さない特異ノードも必要に応じて検出する。さらに、新規に提案したコミュニティ構造を評価する尺度に基づいて適切なコミュニティ数を自動的に決定するため、コミュニティ数を指定する必要がない。Word Association データと DBLP データを用いた実験では、発見した重複ノードと特異ノードの妥当性を発見手法に入力していない別データを用いて確認した。実ネットワークの特性を反映して生成した人工グラフ、すなわちノードの次数とコミュニティの大きさがそれぞれべき乗則に従うベンチマークグラフを用いた実験では、正規化相互情報量の値を 10% 以上向上することを示した。さらに実データを用いた実験では、提案手法は 6 種類の最新既存手法に比較して最も高い *Modularity* 値を示し直感に合うコミュニティ構造を発見した。本成果は、新規性が高い重複コミュニティ発見手法を

提案し、多くの実験でその性能が最新既存手法に比較して大幅に良いことを実証したものであり、重複コミュニティ発見における貢献はきわめて大きい。

以上要するに本論文は、コミュニティ発見の結果を要さない3種類のコミュニティ連結ノードを考案し、それらを用いた新規性が高いコミュニティ発見アルゴリズムを確立し、さらに人工データと実データを用いた多くの実験で提案手法の有用性と実用性を確認したもので、情報工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ものと認める。

氏 名 中津川 泰 正
 学位記番号 シ情 博甲第 457 号(工学)
 学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
 学位論文題名 FeliCa IC チップ開発への実行可能な
 形式仕様記述の実践に基づく設計・構成
 法の提案

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 荒 木 啓二郎
 (副 査) " " 鷗 林 尚 靖
 " " 准教授 日下部 茂

論文内容の要旨

組織的に開発を進める必要があるソフトウェア開発現場において、上流工程の文書を中心に多くの問題を抱えており、品質の高いシステムを組織的に効率よく開発することができる手法として、フォーマルメソッドが注目されている。フォーマルメソッドの利用に関して、3段階の適用レベルが示されることがあるが、そのうち、本論文では、形式仕様記述を行うレベル 0 の段階を扱う。レベル 0 の段階とは、証明までは行わないが、数学的な記法を用いて厳密な仕様を記述する段階である。筆者らは FeliCa IC チップ開発を通してレベル 0 における形式仕様記述手法の適用の効果をj得ることができた。しかしながら、Parnas は 2010 年に発表した論文の中で、フォーマルメソッドが実践的手法として広く利用されるような「当然の技術」として、開発現場に浸透していない点を指摘した。本論文では、「当然の技術」として産業界に浸透するための課題を分析し、形式仕様記述手法を適用する際に必要不可欠となる形式仕様記述手法の設計・構成法を提案する。

形式仕様記述手法が広く利用されるためには、形式仕様記述手法の専門家ではない人が、形式仕様記述を読み、理解し、活用していく必要がある。つまり、そのような形式仕様記述を書くための技術と、活用するための技術が必要である。本論文では、以下の 3 つの提案を行う。1 つ目は、理解容易性に優れた形式仕様を記述するための、形式仕様

記述の設計・構成法の提案である。2 つ目は、従来からある既に関現場に浸透しているレビューやテスト手法といった検証技術を主体として、その中で形式仕様記述手法を活用していく方法の提案である。3 つ目は、筆者らが使用してきた形式仕様記述手法では取扱いが難しかった、動的な振る舞いに関する検証方法の提案である。

1 つ目の、理解容易性に優れた仕様を記述するためには、Hayes と Jones が指摘した「実行可能性の影響」と Jackson が指摘した「実装の影響」を考慮する必要がある。まず、「実行可能性の影響」とは、仕様アニメーションとして知られている方法により記述した仕様を動作させる場合、この「動かすこと」を仕様記述の目的に含めてしまうことにより、仕様の理解容易性に影響を与えるというものである。次に、「実装の影響」とは次のような課題である。一般に、「解決すべき問題」を定義した仕様と、「問題の解決方法」を定義した設計を分けることで、仕様策定者と設計者が分業して組織的に開発を行うことができると言われている。しかし、実際には、この 2 つを分けることは容易ではないため、仕様書に「問題の解決方法」を含めてしまうことで、設計者を過剰に制約してしまうという課題である。「実行可能性の影響」も「実装の影響」も、仕様の記述が複雑になり、過剰に設計を制約してしまうことが課題である。これらの課題を解決するために、「実行可能性の影響」に対しては、仕様伝達部と非伝達部からなる仕様記述スタイルを提案する。「実装の影響」に対しては、仕様と設計において定義するデータ構造に着目した形式仕様記述の設計・構成法を提案する。

2 つ目の提案として、形式仕様記述手法の専門家ではない、様々なレビューの目的を持った読者にとって、読みやすい仕様について分析を行い、レビューの目的とテストの目的を考慮した仕様記述フレームワークを提案する。構造が簡潔な点とテストとの親和性の点で、ディシジョンテーブルの構造を用いる方法と、仕様の概要と詳細を区別して記述する方法を提案する。また、実際に、形式仕様記述から体系的にテスト項目を作成し、テスト項目とテストスクリプトの網羅性を機械的に検証する方法を提案する。

3 つ目は、形式仕様記述手法では取扱いが容易でない動的な振る舞いに関する課題に対して、同時並行に動作する動的な振る舞いをモデル検査を用いて検証する方法を提案する。モデル検査の段階的な導入方法と、検証において課題となった検査対象の状態数の削減方法について議論する。

本論文では、これらの形式仕様を記述するための方法と活用するための方法を提案することによって、形式仕様記述手法が、産業界において適用可能で有効な手法であることを開発実践を通して示した。

論文調査の要旨

近年、情報システムの発達と普及に伴い、日常生活における情報システムへの依存度が高くなり、その結果として、情報システムの不具合が社会に及ぼす影響が大きくなっている。このため、日常生活を支える基盤としての情報システムを実現するソフトウェアの信頼性に対する要求がより高く厳しくなっている。従って、高品質のソフトウェアシステムを開発するための有効な方法を確立することは、技術的にも社会的にも重要な課題である。

本論文は、高度情報通信ネットワーク化社会を支える主要な基盤システムの一つである非接触 IC カードシステム用の FeliCa IC チップ上で動作するソフトウェアの開発に対して形式手法を適用した二度にわたる経験とそれによって得られた知見に基づいて、形式手法をソフトウェア開発の現場に効果的に適用するための方法についてまとめたもので、以下の点で評価できる。

第一に、著者らは、組込みシステムの典型例である IC カードシステム用のモバイル FeliCa IC チップのファームウェア開発に VDM++ という形式仕様記述言語を用いてシステムの仕様を厳密に記述することにより、高信頼システムの開発を行った。そこで記述された厳密な仕様に基づくことによって、当初計画の開発コストと開発期間内に開発を終了させることができ、かつ、1 億 5 千万個以上の IC チップが出荷されて多様な用途で広く利用されているにも拘わらず、開発されたファームウェアに関する不具合は発生していない。これは、形式手法を適用して高信頼システムを開発した重要な成功例の一つとして、国内外で高く評価されている。

この開発においては、開発対象の特質および問題の構造に対する考察に基づき、システムの機能と構成を明確に、かつ、厳密に記述するためのフレームワークを考案して、形式手法の初心者にも容易にシステムの仕様記述ができる方法を提示したことと、ツールの支援のもとに仕様を実行評価することにより、妥当性確認が十分になされた品質の高い仕様を作成できたことが、その成功の要因である。一方、そこで作成した VDM++ 仕様記述が有する、ツールのもとでの実行可能性と本来の仕様としての側面との未分化に起因する問題が明らかとなり、それを解決するために、拡張陽関数定義という記述スタイルに基づく仕様記述法を提案した。これにより、仕様を記述する立場と、それ以降の工程で仕様を参照する立場との間で、仕様の意味や意図の伝達共有をより効果的に行うことが可能となり、二度目の形式手法適用となる別バージョンの FeliCa IC チップ上のファームウェア開発において、その効果が実証された。

第二に、一度目の形式手法適用の際に用いた VDM++ 仕様記述のためのフレームワークを洗練して、ソフトウェア開発過程の中のレビューとテストのそれぞれにおいて有用性をもつ仕様記述フレームワークを提案した。具体的

には、ディシジョンテーブルとの対応付けがなされた仕様を記述し、さらに、ディシジョンテーブル中で列挙される条件を、VDM++ における述語として表現する。これにより、明快で理解しやすい仕様を記述することができて、効率的なレビューの実施に有効であることを示した。また、仕様記述の構造に対応したディシジョンテーブルに基づいて系統的に生成するテスト項目を用いることにより、テストにおける網羅性の確認をより容易に行う方法を提示した。ソフトウェア開発プロセス全体を見通して、仕様記述以降の工程でも有効に活用できる仕様記述のフレームワークを提示したことは、形式手法の実用的な適用の方法を示したものとして評価できる。

第三に、システムの動的振舞いの記述と解析のために、モデル検査手法を適用し、その有効性を確認した。その際に、上述の VDM++ 仕様記述の成果を活用して、導入レベルから実用レベルへとモデル検査手法の適用を進展させることができた。VDM++ とモデル検査という二つの異なる種類の形式手法を適用して、それぞれ異なる観点からのシステムの記述と分析を行い、開発対象システムの信頼性をより高めることに実用的な効果があることを示すとともに、VDM++ 仕様記述とモデル検査との連携の方法を示したもので、形式手法の実用性を高める上で評価できる。

以上、本論文は、組込みシステムの典型例である IC カードシステムの開発に形式手法を適用して高信頼システムの開発を行った経験に基づいて、実用システム開発において形式手法を効果的に適用するための具体的方法を示したもので、ソフトウェア工学上寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認める。

氏 名 Yul Martin
 学位記番号 シ情 博甲第 458 号 (工学)
 学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
 学位論文題名 Application of carbon nanotube gas sensor to partial discharges detection for gas-insulated switchgear diagnosis
 (ガス絶縁電力機器設備診断のための部分放電検出へのカーボンナノチューブガスセンサ応用)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 末 廣 純 也
 (副 査) " " 岡 田 龍 雄
 " " " 合 田 忠 弘

論文内容の要旨

Since power sources are rarely near the places that need

power, classic HVDC is an excellent and the preferred choice for transmitting large amounts of electricity over hundred or even thousand of km to where it is needed most, with much lower losses than a power link of corresponding size carrying HVAC. Today's living working, and social environments have come to depend more and more on electric power. Therefore, improvements in the reliability and quality of the power supply are more desired than ever before. Under these circumstances, GIS has been widely used in electric power transmission network in all voltage range due to advantages such as compact size, low lifetime cost, and high reliability. Despite of high reliability, insulation fault can happen in the long operation time of GIS (typically a few tens of years). Early prediction of insulation failure in GIS is important for the reliable operation of electric power distribution. Partial discharges (PD) give is an indication and effective method to evaluate the degradation on the insulation system. Therefore, the detection of insulation changes at early stages plays an important rule in increasing the service life of equipment. Up to know, many kind of PD detection methods have already been proposed to assess the insulation condition of GIS, not only the chemical analysis but also physical. Chemical by products analysis is become one of the effective method. For example: CNT gas sensor, which a new carbon material discovered recently. It has a lot of great properties in mechanical, chemical, and electrical aspect because of their outstanding properties such as fast responses, high sensitivity, and low operating temperatures.

The first parts on chapter 2 are related to diagnosis technique of GIS by PD detection. To make more reliable operations of GIS, the detection method of internal irregularities before major insulation failures are required. Many possible ways to detect a PD are selected, investigated, and developed. Those are the electrical, mechanical, acoustic, and chemical method. Each method has respective method features. A PD is generally a precipitous physical and chemical transient phenomenon. A PD typically occurs at some distance from the measuring site, and the discharges parameters are detected by sensor through media that consist of the structure of the equipment. The second part on the chapter 2 describes is about PD detection by UHF EM method. The UHF methods had been adopting for diagnosis in GIS because the EM emitted by the PD has a frequency component in the UHF band, the emitted EM can propagate over relatively long distances in GIS tank with even less attenuation compared to acoustic wave. To obtain higher PD sensitivity and greater accuracy of the system many development regarding the sensor and diagnostic algorithm

have been made. For example: X-ray Image Processing System, a new imaging technology has been developed instead of a film method, A decomposed gas sensor with improved sensitivity has been integrated in multi-function hybrid sensor, and remote monitoring system of GIS. In this study, a new PD detection using CNT gas sensor was fabricated by dielectrophoresis (DEP). One advantages of the chemical analysis is that it is not affected by electromagnetic background noises. DEP-fabricated CNT could respond to PD occurring in SF₆ generated by DC corona. Then, this work address of effect polarity on CNT gas sensor response to PD generated by DC corona was investigated. Finally, for improving of highly sensitivity of CNT gas sensor, which served as transducer in gas detection were separated from commercially available mixture of semiconducting and metallic ones and enriched by using a spin column and dextran-based gel.

The whole thesis is composed of seven chapters:

Chapter 1 introduced background HVDC-GIS, the objectives and outline of the study

Chapter 2 will gives a review of diagnosis technique of GIS which to describe with detail including background of this research, gas insulated substation, relates study on PD detection, theories of adsorption phenomenon and mechanism of CNT gas response.

Chapter 3 describes the experimental setup and methods commonly used in this study are described in detail, including fabrication method of CNT gas sensor, measurement of CNT gas sensor responses to gases, detection of PD generated in SF₆ with on-line.

Chapter 4 describe about clarify whether CNT gas sensor based chemical analysis of SF₆ decomposition was applicable to diagnosis of HVDC-GIS. At first, CNT gas sensor responses to positive and negative DC corona generated in SF₆ gas were measured and compared. Secondly, the decomposition gas molecules adsorbed on CNTs were analyzed by Fourier transformation infrared (FTIR) spectroscopy as well as using gas detection tube.

Chapter 5 discussed the analysis of SF₆ decomposition products generated by DC corona discharges that including corona current dependent to CNT gas sensor response and how the CNT sensor response depend on the corona discharge energy, which is evaluated as the total charge quantity calculated by numerical time integration of the corona current at both polarity. The strong polarity effect was evident in the CNT gas sensor response to DC corona discharges. There are some possible explanation is follows: a. Negative corona may produce a SF₆ decomposition product,

which is more reactive with CNT and may induce higher conductance change. b. Negative corona may produce the same, but more concentrated SF₆ decomposition products than positive one or combination each other. In order to clarify this point, SF₆ decomposition products adsorbed on CNTs were identified and quantified using FTIR Spectroscopy.

Chapter 6, improving of CNT gas sensor with semiconducting that separating using spin column chromatography for detection SF₆ decomposition gases were studied. The method employed a spin column filtration in which dextran-based gels were packed. The method can enrich the s-SWCNTs in the column by simply repeating the filtration of the SWCNTs suspension. It was clearly demonstrated that the effect of s-SWCNTs in I-V characteristic and gas sensing.

Chapter 7 results obtained in this study are conclusion and some future work topics about this study are mentioned.

論文調査の要旨

SF₆ (六弗化硫黄) ガスは絶縁性と消弧能力に優れ、かつ化学的に安定で毒性もないことから 1970 年代以降、世界中で広くガス絶縁システム(GIS)の絶縁媒体として使用されてきた。今後、欧米や我が国の GIS は設備更新の時期を迎えるが、近年の電力自由化によるコスト削減の観点からは、適切な設備診断結果に基づく効率的な設備運用が望まれている。現在、GIS の設備診断法として、GIS 内部の欠陥などに起因する異常放電現象である部分放電を検出する手法が各所で検討されている。なかでも、部分放電によって発生する SF₆ 分解ガスの検出は GIS 外部で発生する電磁ノイズの影響を受けにくいなどといった、他方式に比べ優れた特徴を有している。これまでに、現在主流となっている交流高電圧送変電システムで用いられる交流 GIS 内の部分放電によって発生する SF₆ 分解ガスをカーボンナノチューブ (CNT) ガスセンサで検出できることが報告されている。しかしながら、今後増加が予想される直流高電圧送変電システムで用いられる直流 GIS 内の部分放電によって発生する SF₆ 分解ガスを CNT ガスセンサで検出できるかどうかは明らかにされていなかった。

著者は、CNT ガスセンサによる SF₆ 分解ガス検出に基づく直流 GIS 設備診断技術の開発を目的として、直流部分放電によって発生した SF₆ 分解ガスに対する CNT ガスセンサの応答の調査、電圧極性が CNT ガスセンサ応答および SF₆ 分解ガス種や濃度に与える影響の解明、半導体 CNT の分離濃縮による CNT ガスセンサの高感度化などに関する一連の研究を行い、多くの新しい知見を得ている。本論文は、それらの成果をまとめたもので、次の諸点で評価できる。

第一に、直流部分放電に対する CNT ガスセンサ応答を調査し、交流部分放電と同様に直流部分放電によって CNT ガスセンサのコンダクタンスが上昇することを見出し、更に同じ放電エネルギー条件下で比較した場合、負極性部分放電に対する CNT ガスセンサの応答が正極性部分放電に比べ約 2 倍大きいことを明らかにしている。

第二に、フーリエ変換赤外分光法による CNT に吸着した SF₆ 分解ガス種の同定と定量を行い、直流部分放電によって SF₄ と SOF₂ が発生しており、その濃度は正極性部分放電の方が負極性部分放電に比べ約 6 倍大きく、前述の CNT ガスセンサ応答とは逆の極性効果を示すことを明らかにしている。

第三に、SF₆ 分解ガス種の一つでありフーリエ変換赤外分光法による検出が困難な HF のガス検知管による定量を行い、その濃度は負極性部分放電の方が正極性部分放電に比べ大きく、前述の CNT ガスセンサ応答と同様の極性効果を示すことから、CNT ガスセンサの応答に寄与する主たる SF₆ 分解ガスは HF である可能性が高いことを指摘している。

第四に、GIS 設備診断精度の向上を目的として、スピнкаラムクロマトグラフィを用いた半導体 CNT の分離濃縮法を新たに提案し、同手法により SF₆ 分解ガスに対する CNT ガスセンサ応答を最大で約 5 倍に増大できることを明らかにしている。

以上要するに、CNT ガスセンサによる SF₆ 分解ガス検出に基づく直流 GIS 設備診断技術の開発を目的として、直流部分放電によって発生した SF₆ 分解ガスに対する CNT ガスセンサ応答メカニズムの解明、電圧極性が CNT ガスセンサ応答および SF₆ 分解ガス種や濃度に与える影響の解明、半導体 CNT の分離濃縮による CNT ガスセンサの高感度化などを実現したもので、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 麻 川 倫 広
 学位記番号 シ情 博甲第 459 号 (工学)
 学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
 学位論文題名 電子粉流体ディスプレイの駆動法に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 吉 田 啓 二
 (副 査) " " 内 田 誠 一
 " " " 服 部 励 治

論文内容の要旨

液晶ディスプレイ (Liquid Crystal Display, LCD) をはじめとする薄型ディスプレイ (Flat Panel Display, FPD) は、

TV や PC, 携帯電話から業務用機器, デジタルサイネージに至るまで身の回りのあらゆるものにも組み込まれ, コンピュータと人をつなぐユーザーインターフェイスの役割を果たしている. 近年では, タブレット端末やスマートフォンなど FPD を中心に据えた機器が普及しつつあり, その重要性はますます高まっている. 一方で, 強い外光下での視認性や, 高い製造コストなど, 既存の FPD には依然として解決すべき課題があるのも事実である. このような中, 紙に近い自然な表示品質と, 極めて低い消費電力を実現できる反射型双安定性ディスプレイ“電子ペーパー”が注目されている.

電子ペーパーの有望な方式の一つである電子粉流体ディスプレイは, 帯電した着色粒子が電極間を移動することで表示を行うもので, 電界に対する明確な閾値を備えるためパッシブマトリクス駆動が採用可能である. このため, TFT 基板が不要であり, 低コストで大型・高精細を実現できる. さらに, ガラス基板の代わりにプラスチック基板を用いることで, フレキシブルなディスプレイも容易に実現可能である.

しかしながら, 電子粉流体ディスプレイには次のような課題が存在する. まず, 電子粉流体ディスプレイの駆動には, 70V と比較的高い駆動電圧が必要である. このため, 駆動 LSI に高耐圧プロセスが必須となる. 電子粉流体ディスプレイでは, 周辺回路も含めたフル・フレキシブル化が検討されているが, これを実現する手法として, 既存のドライバ LSI チップを研磨により, 薄膜化することが提案されている. この際, チップの薄型化が, LSI 上の高耐圧のトランジスタの動作へ何らかの影響を与えることが懸念される.

また, 電子粉流体ディスプレイはパッシブマトリクス駆動を採用するため, 表示時間が走査線数に比例する. 電子粉流体ディスプレイは双安定性を供えるため, 更新を頻繁に行う必要がないが, パネルの高精細化, 大型化に伴い, 更新時間の大幅な増加が無視のできないものとなっている.

本論文では, 電子粉流体ディスプレイの駆動に関する上記二つの課題について検討した. 具体的には, ウェハの研磨により薄型化した LSI 上の高耐圧 LDMOS (Laterally Diffused MOS) トランジスタの電気特性の解析, および圧縮マルチライン駆動 (Shrunk Multiline Addressing, を用いた更新時間の短縮についての検討を行った. 本論文は以下の 4 章から構成される.

第 1 章では, 電子ペーパーの代表的な方式である電気泳動方式と, 我々が研究の対象とする電子粉流体ディスプレイについて, それぞれの表示の原理や駆動法を解説するとともに, 両者を対比し, 電子粉流体ディスプレイの優位点, すなわち, パッシブマトリクス駆動を採用できるため, 低コストであり, フレキシブル化が容易である点を示した.

また, 第 2 章以降で検討する課題について説明した.

第 2 章では, 電子粉流体ディスプレイ用駆動用ドライバ LSI のフレキシブル化が, LSI に用いられる高耐圧 LDMOS トランジスタに与える影響を解析した結果を示した. まず, ウェハ研磨により 35 μ m まで薄くした TEG チップを用いて, 高耐圧 LDMOS の電気的特性を測定し, チャンネル領域における自己発熱効果により, 高 V_{ds} 領域でドレイン電流が減少することを明らかにした. 次に, TEG チップを所定の曲率半径で曲げ応力を付加し, LDMOS の電気的特性を測定し, 曲率半径に比例して電流が変化することを示した. そして, ピエゾ効果と LDMOS のレイアウトをもとに求めた応力による理論的な電流の変化率と, 測定により得られた電流の変化率を比較し, 測定値がおおよそ理論値と一致することを示した.

第 3 章では, 電子粉流体ディスプレイ向けの SMLA について検討した. まず, 単純な 2 値データの SMLA について, 最適な SMLA データ生成アルゴリズムを示した. 次に, この 2 値ベクトル用 SMLA アルゴリズムを多階調向けに展開したアルゴリズムを提案した. そして, この多階調向け SMLA アルゴリズムを用いて, サンプル画像の SMLA データを生成した結果, 従来の駆動法に比べて理論上約 45% まで更新時間を短縮できることを明らかにした. さらに, アルゴリズムの演算時間短縮のために, 画像を複数の領域に分割して個々に SMLA データを生成する手法を提案し, この手法を用いることで演算時間を大幅に減らすことができることを確認した. 最後に, SMLA アルゴリズムで生成した SMLA データで実際の電子粉流体ディスプレイを駆動し, 理論どおり計算時間を削減できることを示した.

第 4 章では, 本論文から得られた知見を総括している.

論文調査の要旨

紙に近い自然な表示品質と, 極めて低い消費電力を実現できる反射型双安定性ディスプレイとして電子ペーパーが注目されている. その電子ペーパーの有望な方式の一つである電子粉流体ディスプレイは, 帯電した着色粒子が電極間を移動することで表示を行うものである. このディスプレイは電界に対する明確な閾値を備えることでパッシブマトリクス駆動が可能であり, 低コスト化, 大型化, 高精細化が実現できる. さらに, ガラス基板の代わりにプラスチック基板を用いることで, フレキシブルなディスプレイも容易に実現可能である.

しかしながら, これに付属する周辺回路が剛直なままでは, パネルのフレキシブル性は著しく損なわれる. これを解決するために, 既存の LSI チップを薄型化し, フレキシブル性を持たせることが提案されている. しかし, この際, チップの薄型化がその中に含まれるトランジスタの動作へ何らかの影響を与えることが懸念される.

また, 電子粉流体ディスプレイはパッシブマトリクス駆

動を採用するため、表示時間が走査線数に比例する。したがって、パネルの高精細化、大型化に伴い、更新時間の大幅な増加が無視のできないものとなっている。

本論文では、電子粉流体ディスプレイ駆動に関する上記 2 つの課題について、LSI チップの薄型化が高耐圧横方向拡散 MOS (Laterally Diffused MOS: LDMOS) トランジスタに与える電気的特性の解析、および、更新時間の短縮のための圧縮マルチライン駆動 (Shrunk Multiline Addressing: SMLA) の提案と開発を行っている。その結果、以下の有用な成果が示されている。

1. 電子粉流体ディスプレイを駆動する高耐圧 LDMOS トランジスタにおいて、チップ厚を 35 μm まで薄くし、曲率半径を 20 mm まで曲げたとき、曲率半径に比例してドレイン電流が変化することが示された。また、この変化はトランジスタにかかる応力とピエゾ効果により理論的に解析され、その変化が最大±3%以内に収まり実用的許容範囲内であることが示された。この実験と解析により、周辺回路を含めたフレキシブルディスプレイが実現可能であることが初めて示されたものである。

2. 電子粉流体ディスプレイの更新時間短縮のために、SMLA という新しいマルチライン駆動方法を提案し、2 値と多階調のデータ画像におけるデータ生成アルゴリズムを確立させた。また、その多階調向け SMLA データ生成手法を用いて、複数のサンプル画像の SMLA データを生成した結果、従来の駆動法に比べて平均 45%まで更新時間を短縮できることを計算で示し、さらに、実際のパネルを駆動させこれを実証した。

3. SMLA データを生成するための計算時間を短縮するため、画像を複数の領域に分割して個々に SMLA データを生成する手法を提案し、この手法を用いることで圧縮率を保ったまま計算時間を 1/30 にまで低減できることを示した。

以上要するに、本論文は、電子ペーパーの駆動法に関して、周辺回路を含めたフレキシブルディスプレイの実現性と、更新時間短縮のための圧縮マルチライン駆動法の有効性を実証したものであり、電子デバイス工学上、価値ある業績である。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文に値するものと認める。

氏 名 岡 嶋 成 司
学 位 記 番 号 シ情 博甲第 460 号 (情報科学)
学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
学位論文題名 Study on Interactive Retrieval Systems
for 3D Multimedia Data
(3 次元マルチメディアデータの対話
型検索システムに関する研究)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 准教授 岡 田 義 広
(副 査) " 教 授 竹 田 正 幸
" " " 瀧 本 英 二
" " " 志 堂 寺 和 則

論文内容の要旨

近年のグラフィクスハードウェアやソフトウェア技術の急速な発達により、ビデオゲーム、映画、ウェブコンテンツ等、様々な場面において、3 次元 CG(Computer Graphics)が利用されるようになった。3 次元形状データやモーションデータを含む膨大な数の 3 次元マルチメディアデータが計算機上に蓄積されてきている。こうして蓄えられたデータを利用するためには、膨大な数のデータから必要なものを効率よく探し出す検索システムの開発が必要不可欠である。3 次元マルチメディアデータの検索では、データのもつ意味や内容を表す特徴を抽出し、検索クエリとして入力されたデータに近い特徴をもつデータを検索する類似検索が用いられるのが普通であるが、ユーザの必要とするデータがあいまいな場合や、検索クエリとして入力できるデータを保持していない場合には、検索クエリの入力による類似検索が行えない。そこで本論文では、ユーザとの対話操作で必要とするデータを絞り込むことにより 3 次元マルチメディアデータを検索するシステムの研究開発を行った。従来、静止・動画像データや音楽データに関して絞り込み検索の研究はあるが、形状データやモーションデータに関する絞り込み検索の研究は十分に成されていない。

本論文では、まず、ブラウジングによる対話操作により 3 次元マルチメディアデータを検索する Treecube アルゴリズムに基づくシステムを紹介している。Treecube は田中らによって提案された階層構造データの可視化手法である。Treecube アルゴリズムでは、まずディレトリ階層構造を直方体の入れ子構造として 3 次元空間に配置し、次にディレトリに含まれるデータを対応する直方体の内部に配置することにより得られたレイアウト画像をユーザに提示する。しかし、その配置方法 (レイアウト) にはデータの類似度が反映されていないため、1 つのディレトリに多数のデータが含まれる場合には、その中から目的のデータを見つけ出すことが困難であるという問題がある。本論文では自己組織化マップによるレイアウト及び、自己組織化マップによるクラスタリングを Treecube アルゴリズムに適用することでこの問題を解決した。自己組織化マップによるレイアウトでは、同じ特徴を持つデータが近くに配置されるため、ブラウジングによりデータを見つけ出すことが容易になると考えられる。

また、本論文では、対話型進化計算を用いた 3 次元マルチメディアデータの検索システムを提案している。本検索システムは、検索クエリとして入力できるデータを保持し

ていない場合やユーザの必要とするデータがあいまいな場合に有用である。対話型進化計算とは、システムがユーザの主観的評価に基づいてデータを最適化する手法であり、システムによるデータの提示とユーザによる提示データの評価が繰り返されることによりデータの最適化が行われる。最適化手法としては、多くの場合、対話型遺伝的アルゴリズムが用いられる。提案システムでは、対話型遺伝的アルゴリズムに基づく対話型進化計算を検索クエリとなるデータに適用して最適化することによりユーザの要求するデータを検索する。実証システムとして形状データおよびモーショndataの検索システムを開発し、ユーザによる検索実験によりその有用性を明らかにした。

さらに、本論文では、データの特徴量に基づき再帰的にクラスタリングを行うことでデータベース中のデータを木構造化し、その木を辿る対話操作によって必要とする3次元マルチメディアデータを見つけ出す階層型視覚的検索システムを提案している。本検索システムは、対話型進化計算を用いた検索システムとは違い、ユーザの必要とするデータが明確な場合により有用であると考えられる。本システムによりユーザは、自身の求めるデータに近いデータを選択することで木を辿り、求めるデータを見つけ出すことができる。実証システムとしてモーショndataの検索システムを開発し、ユーザによる検索実験によりその有用性を明らかにした。また、モーショndataを圧縮して転送することにより分散したデータベースにも対応可能となるように検索システムの拡張を行った。

本論文は以下の6章より構成される。第1章では、研究の背景と目的、関連研究、研究成果の要点ならびに論文の構成について述べた。第2章では、形状データとモーショndataの特徴量について詳述した。第3章では、自己組織化マップによるレイアウトおよびクラスタリングをTreecubeアルゴリズムに適用して、ブラウジングによる対話操作により3次元マルチメディアデータを検索するシステムの効率化を図る方法について述べた。第4章では、対話型進化計算を用いた3次元マルチメディアデータの検索システムについて述べた。開発した形状データとモーショndataの検索システムの構築方法、採用した特徴量と検索実験の結果を記述し、それぞれの有用性を示した。第5章では、階層型視覚的検索システムについて述べた。開発したモーショndata検索システムの構築方法、採用した特徴量と検索実験の結果を記述し、その有用性を示した。また、分散データベースへ対応するようにシステムを拡張した方法を述べた。最後の第6章では、結論と今後の研究課題について述べた。

論文調査の要旨

本論文は、3次元マルチメディアデータの対話型検索システムに関するものである。近年における計算機の3次元

グラフィックス性能の急速な発達により、従来の静止画像や動画ばかりでなく、形状モデルやモーショndataといった3次元マルチメディアデータを扱うことが容易になっており、現在ではそれらを用いた多くのアプリケーションが存在する。同時に計算機上に蓄積される3次元マルチメディアデータの量は膨大になっており、ユーザが必要とするデータを効率よく見つけ出すための検索システムの研究開発が必要不可欠である。形状データやモーショndataの検索に関する研究として、それらのデータから特徴量を抽出し、特徴量の類似度を計算することにより、検索クエリとして入力されたデータに似た特徴をもつデータをデータベースから検索する類似検索の研究が数多くある。しかし、ユーザの必要とするデータがあいまいな場合や検索クエリとして入力できるデータを保持していない場合には、検索クエリの入力による類似検索が行えない。そこで本論文では、ユーザの対話操作によるデータの閲覧やデータの絞り込みにより3次元マルチメディアデータを検索するシステムの研究開発を行っている。従来、静止・動画像データや音楽データに関して絞り込み検索の研究はあるが、形状データやモーショndataに関する絞り込み検索の研究は十分に成されていない。

まず、本論文では、ブラウジングにより3次元マルチメディアデータを見つけ出すTreecubeアルゴリズムに基づく検索システムの拡張を行い、閲覧によりデータを見つけ出す際の効率の向上を図っている。Treecubeは田中らによって提案された階層構造データの可視化手法である。Treecubeアルゴリズムでは、ディレクトリ階層に基づいた直方体の入れ子構造としてファイルシステムに含まれるデータを3次元空間内に配置しユーザに提示する。しかしながら、1つのディレクトリに多数のデータが含まれる場合には、その中から目的のデータを見つけ出すことが困難であるといった問題がある。本論文では自己組織化マップによるレイアウト及び、自己組織化マップによるクラスタリングをTreecubeアルゴリズムに応用することでこの問題を解決している。自己組織化マップによるレイアウトでは、同じ特徴を持つデータが近くに配置されるため、閲覧によりデータを見つけ出す際の効率が向上する。

次に、本論文では、対話型進化計算を用いた3次元マルチメディアデータの検索システムを提案している。対話型進化計算とは、システムがユーザの主観的評価に基づいてデータを最適化する手法であり、システムによるデータの提示とユーザによる提示データの評価が繰り返されることによりデータの最適化が行われる。提案システムでは、遺伝的アルゴリズムに基づく対話型進化計算を検索クエリとなるデータに適用して最適化することによりユーザの要求するデータを検索する。したがって、検索クエリとして入力できるデータを保持していない場合やユーザの必要とするデータがあいまいな場合に有用であると言え

る。実証システムとして形状データおよびモーションデータの検索システムを開発し、ユーザによる検索実験によりその有用性を明らかにしている。形状データの場合は、約 1,800 のデータの中から 5 分以下の操作時間でユーザの必要とするデータと同じクラスに属するデータの検索が行えており、モーションデータの場合には、約 2,500 のデータの中から 10 分以下の操作時間でユーザの必要とするデータと同じクラスに属するデータの検索が行えており、ともに十分に実用的であると言える。

さらに、本論文では、データの特徴量に基づき再帰的にクラスタリングを行うことでデータベース中のデータを木構造化し、その木を辿る対話操作によって必要とする 3 次元マルチメディアデータを見つけ出す階層型視覚的検索システムを提案している。対話型進化計算を用いた検索システムは、ユーザの必要とするデータがあいまいな場合に特に有用であるが、ユーザの必要とするデータがより明確な場合には、データの特徴量にしたがってより厳密にデータの提示を行う方が効率が良いと考えられる。本システムによりユーザは、自身の求めるデータに近いデータを選択することで木を辿り、求めるデータを見つけ出すことができる。実証システムとしてモーションデータの検索システムを開発し、ユーザによる検索実験によりその有用性を明らかにしている。約 2,500 のデータの中から 12 分以下の操作時間で、ユーザの必要とするものと同じモーションデータを検索できており、十分に実用的であると言える。また、モーションデータを圧縮して転送することにより分散したデータベースにも対応可能となるように検索システムの拡張を行っている。

以上のように、本論文では、3次元マルチメディアデータの対話型検索システムについて、自己組織化マップを応用した Treecube アルゴリズムの拡張により、閲覧によるデータ検索の効率の向上を図り、また、対話型進化計算による検索システムと階層型視覚的検索システムをそれぞれ提案し、実証システムの開発とユーザ評価実験によりそれらの有用性を明らかにした。これらは、情報科学上価値ある業績である。よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文に値するものと認める。

氏 名 野 中 良 哲
 学位記番号 シ情 博甲第 461 号 (工学)
 学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
 学位論文題名 有限グラフ上のランダムウォークの最適化

論文調査委員
 (主 査) 九州大学 教授 山 下 雅 史
 (副 査) " " 竹 内 純 一
 " " " 瀧 本 英 二

” 福岡教育大学 ” 中 田 寿 夫

論文内容の要旨

グラフ上のランダムウォークは、与えられたグラフの上をトークンがある推移確率行列に従ってランダムに推移する離散時間の確率過程であり、ネットワーク探索、ランダムサンプリング、株価やブラウン運動のシミュレーションなど様々な応用を持ち、これらのアルゴリズムの性能は利用されるランダムウォークの性能に本質的に依存する。本論文の主題はランダムウォークの速さである。グラフ G 、グラフ上の 2 頂点 u, v 、推移確率行列 P に対して、 u から v に至る(平均) 到達時間 $H_G^P(u, v)$ を u から出発するランダムウォークが v に到達するために必要な平均ステップ数、 G の(平均) 到達時間 H_G^P を任意の頂点の組 (u, v) に対する $H_G^P(u, v)$ の最大値とし、 u からの(平均) 全訪問時間 $C_G^P(u)$ を u から出発するランダムウォークが G のすべての頂点を少なくとも一度ずつ訪問するために必要な平均ステップ数、 G の(平均) 全訪問時間 C_G^P を任意の頂点 u に対する $C_G^P(u)$ の最大値とする。 G の到達時間や全訪問時間はランダムウォークの速さを測る代表的な指標であり、推移確率行列 P に強く依存する。すべての隣接頂点へ等確率で推移する単純ランダムウォークでは、位数 n の任意のグラフに対して到達時間および全訪問時間が $\Theta(n^3)$ であることが知られている。本論文では、以下の 2 つの自然な問題を検討した:

- 1) 与えられたグラフ G に対して高速な、すなわち小さい到達時間や全訪問時間を持つ推移確率行列の提案、すなわち到達時間や全訪問時間の上界の導出。
- 2) 与えられたグラフ G に対する高速化の限界、すなわち到達時間や全訪問時間の下界の導出。

まず、メトロポリスウォークと呼ばれるランダムウォークの到達時間および全訪問時間を検討した。メトロポリスウォークはマルコフ連鎖モンテカルロ法の代表的手法であるメトロポリス-ヘイスティングス法によって定義されるランダムウォークであり、任意に与えられたグラフ G とその頂点上の確率分布 π に対して、 π を定常分布とする推移確率分布 P を構成する。 G 上の P に従うランダムウォークがメトロポリスウォークである。メトロポリスウォークについてはその混合時間が綿密に調べられていたが、到達時間と全訪問時間については研究がなかった。本論文では任意のグラフに上のメトロポリスウォークについて、到達時間が $\Theta(fn^2)$ 、いて、全訪問時間が $\Theta(fn^2 \log n)$ であることを示した。ここで、 n はグラフの位数、 f は π の最大値と最小値の比である (π の最小値は正であると仮定する)。

つぎに、木上のランダムウォークの全訪問時間の下界を示した。与えられたグラフに対する到達時間や全訪問時間の下界はその構造に依存する。例えば、全訪問時間を $n - 1$

とできるものがある一方、同じ頂点数および辺数でも、全訪問時間が $\Omega(n^2)$ あるグラフも存在する。本論文では、木上の任意のランダムウォークが可逆ランダムウォークとよばれるランダムウォークであることを示し、その結果を用いて位数 n の任意の木に対する任意のランダムウォークの全訪問時間の下界 $\Omega(n \log n)$ であることを示した。

最後に、木における単純ランダムウォークの良さを検討した。与えられたグラフに対して到達時間や全訪問時間最小のランダムウォークを設計することは一般には難しい。そこで単純ランダムウォークを到達時間や全訪問時間最小化問題に対する近似解とみなし、その近似比を解析した。一般のグラフの到達時間および全訪問時間に関しては単純ランダムウォークが $\Theta(n^2)$ 近似となる非常に悪い例が存在する一方で、単純ランダムウォークが最適であるグラフも存在するなど、近似比はグラフに大きく依存する。本論文では、グラフを木に限定したとき単純ランダムウォークは到達時間に関して $\Theta(\sqrt{n})$ 近似、全訪問時間に関しては $O(\sqrt{n \log n})$ 近似であることを示した。

論文調査の要旨

有限グラフ上のランダムウォークは、与えられたグラフの上をトークンがある推移確率行列にしたがってランダムに遷移する確率過程である。ランダムウォークはネットワーク探索、ランダムサンプリング、株価やブラウン運動のシミュレーションなど情報学の様々な分野に応用があり、これらのアルゴリズムの性能は利用するランダムウォークの性質に本質的に依存する。たとえば、インターネットクローラなどに実装されるネットワーク探索アルゴリズムの探索速度を決める主要な要因は、到達時間や全訪問時間を用いて測られるランダムウォークの速度である。ここで、ある頂点から出発して別の頂点に到達するのに必要なステップ数の期待値が到達時間、ある頂点から出発してすべての頂点を少なくとも一度訪問するのに必要なステップ数の期待値が全訪問時間である。このような理由から、つぎの訪問頂点を隣接頂点の中から等確率で選択する標準ランダムウォークの到達時間と全訪問時間が従来から詳しく調べられてきた。しかし、標準ランダムウォーク以外の推移確率行列を持つランダムウォークの速度は研究例が乏しい。本研究は、このような状況において、与えられたグラフに対して高速なランダムウォークを実現する推移確率行列を設計するための理論を構築することを目的として行われており、以下の点で評価できる。

第一に、著者は、ランダムサンプリングの代表的アルゴリズムであるメトロポリスウォークと呼ばれるランダムウォークの到達時間および全訪問時間を初めて解析し、そのタイトな限界を求めている。与えられたグラフの頂点数 n とするとき、これらの限界は、標準ランダムウォークに対するそれぞれの限界を $1/n$ および $(\log n)/n$ に縮めたもの

になっている。これは、メトロポリスウォークが高速ランダムウォークの設計手法として利用できることの発見と位置付けられる。

第二に、著者は、木の上のランダムウォークについて解析し、任意の木上の、任意の推移確率行列を用いるランダムウォークの全訪問時間が少なくとも $n \log n$ に比例することを証明している。したがって、全訪問時間が n に比例するような高速なランダムウォークが存在するにはグラフに閉路がなければならないことが分かる。

第三に、著者は、木の場合について、標準ランダムウォークの到達時間および全訪問時間を、最速なランダムウォークの到達時間および全訪問時間と比較し、最悪でもこれらの間の比がそれぞれ、 \sqrt{n} および $\sqrt{n \log n}$ の定数倍で抑えられることを示している。一般のグラフでは最悪の場合にはこれらの比はどちらも n^2 に比例することから、一般のグラフに比べて木上では標準ランダムウォークを高速ランダムウォークとして用いることが妥当であると分かる。したがって、木は、高速化が困難であるが、標準ランダムウォークが効率よく働く構造である。

以上要するに、本論文は有限グラフ上で高速なランダムウォークを実現する推移確率行列が満たす性質を解明するとともに、実現できる速度の限界も明らかにしたものであり、情報工学上寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値すると認める。

氏 名 吉 岡 隆 宏
 学位記番号 シ情 博甲第 462 号 (工学)
 学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
 学位論文題名 運転危険度推定を目的とした反応時間の確率密度分布に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 森 周 司
 (副 査) " " 志堂寺 和 則
 " " " 川 邊 武 俊
 " 福岡工業大学 准教授 松 木 裕 二

論文内容の要旨

自動車による交通事故は重大な社会問題である。日本における交通事故は年間で 70 万件を超え、そのうちの約 8 割は自家用車が関係する事故である。また、事故発生時の状態別死傷者数を見ると、自動車乗車中の死傷者数が最も多い。自動車による事故を軽減させるための研究は、現代の自動車社会において非常に重要である。

自家用車が関係する事故のうち、最も発生率が高いのは追突事故である。追突事故の主な原因の一つは、危険事象に対する反応の遅れである。反応の遅れは、運転者の居眠りや、加齢による認知・運動機能の衰えなどにより生じる。

これまでの研究では、反応の遅れを警告するための指標が検討されてきた。その一つに、衝突確率 (Probability of Collision, 以降 POC) がある。POC は、運転者の反応時間の確率密度分布に基づいて算出した自車の停止距離と、車間距離とを比較することで衝突の可能性を計算する。POC では先行車との衝突の可能性が 0 から 100% の数値として表現されるため、運転の安全性を運転者が直感的に知ることができる。しかしこれまでの POC は運転中の反応時間の確率密度分布を対数正規分布と仮定しており、その仮定の妥当性は検討されてこなかった。また、反応時間の確率密度分布は運転者の覚醒状態や加齢によって変化すると考えられるが、その点を運転中の反応時間の確率密度分布について詳細に検討した研究はこれまでにない。

従って本研究では、自動車運転中の安全指標の精度の向上を最終的な目標とした。具体的には、運転中の反応時間の確率密度分布の特定、また覚醒状態や加齢による反応時間の確率密度分布の変化を詳細に検討することを主たる目的とした。ここで、本論をすすめるにあたり、運転中の運転者の覚醒状態を推定する必要がある。覚醒状態を推定するための方法もこれまで多く検討されてきた。中でも運転者が特別な操作や装置の装着を必要としない、開眼率 (Eye-opening Ratio, 以降 EOR) は運転中に計測するのに適している。EOR は上瞼と下瞼の距離であり、画像処理によって実時間的に計測され、EOR が大きいほど眼を見開いている状態にある。EOR が小さくなるほど反応時間が長くなることは分かっているが、EOR が覚醒状態を正確に反映するという確証は得られていない。そこで本研究ではまず、覚醒状態の指標としての EOR の妥当性を検討した。

具体的には、先行車の急停止に対する反応時間とその時点の EOR を計測する実験を行い、実験参加者に自身の眠気を主観評価させ、それぞれの関係を調べた。また、実験参加者の表情を連続的に撮影し、顔表情評定基準に従い第三者が実験参加者の眠気を逐次評価し、連続的に計測した EOR と比較した。その結果、主観評価及び顔表情評定基準で眠気の程度が強いほど EOR が低下し、それとともに反応時間が長くなった。以上の結果は、EOR が覚醒状態の指標として妥当であることを示している。

運転中の反応時間の確率密度分布を表現する最適な分布関数を調べ、覚醒状態や加齢による確率密度分布の変化を検討するため、若年者と高齢者を対象に、先行車の急停止に対する反応時間とその時点の EOR を同時に計測した。取得した反応時間データの確率密度分布を推定し、それに 6 種類の分布モデルをあてはめた結果、ex-Gaussian 分布が最もあてはまりが良いことが分かった。この分布は反応時間における刺激認知から判断までの過程と、それ以降の反応選択や遂行等の過程の 2 つの過程を仮定したものであり、危険認知に対するブレーキ反応という運転中の反応時間を適切に表現している。また、実験で得られた反応時間

データを、EOR が高い状態と EOR が低い状態の 2 群に分類し、それぞれに ex-Gaussian 分布をあてはめた。その結果、若年者と高齢者それぞれで、EOR が低い状態の ex-Gaussian 分布の平均が有意に大きかった。さらに、ex-Gaussian 分布の分散は高齢者の方が若年者より有意に大きかった。各人のデータから得られた ex-Gaussian 分布を基に POC を計算すると、若年者と高齢者それぞれで、EOR が高い状態の POC よりも EOR が低い状態の POC は高く (すなわち運転が危険である)、若年者の POC よりも高齢者の POC の方が高くなった。

以上の結果より、運転中の反応時間の確率密度分布を最もよく表現している分布モデルは ex-Gaussian 分布であること、ex-Gaussian 分布の平均は運転者の覚醒状態が低いと大きくなり、分散は運転者が高齢であるほど大きいことが明らかになった。本研究の成果を活用すれば、反応時間の確率密度分布を ex-Gaussian 分布によって適切に表現することで、自動車運転の安全指標の精度を向上させることができる。さらに本研究は、運転者の年齢や覚醒状態によって反応時間の確率密度分布が大きく変化することを示しており、運転者それぞれの特徴を考慮した安全基準の必要性を強く示唆する。

論文調査の要旨

自動車による交通事故は重大な社会問題であり、その防止対策は早急の課題である。防止対策の一つとして、運転中の運転危険度を適切に推定し、運転者に効果的に提示する方法がある。これまでも、車間距離や自車の速度を用いて運転危険度を推定する方法が提案されてきた。しかし、運転危険度は、車間距離や速度ばかりでなく、危険事象に対する運転者の反応の遅れにも大きく影響される。この反応の遅れを考慮した運転危険度の推定方法として、衝突確率 (Probability of Collision, 以降 POC) がある。POC は運転者の反応時間の確率密度分布に基づいており、危険事象への反応の遅れが反映される。POC を用いた先行研究では、POC を運転者に提示することで車間距離が大きくなり、POC の提示が有効な防止対策であることが示唆されている。しかし、これまでの POC の計算手法には以下の問題点がある。第一に、反応時間の確率密度分布として対数正規分布が仮定されているが、この仮定の妥当性は検証されていない。第二に、運転者の反応時間は覚醒状態により変化すると考えられるが、これまでの POC の計算手法ではこの点が考慮されていない。第三に、加齢によっても運転者の反応時間は変化すると考えられるが、これまでの計算手法ではこの点も考慮されていない。先行研究では反応時間の平均が加齢により変化することは示されているが、反応時間の確率密度分布を用いて加齢の効果を検討したものはない。

本研究は、これらの問題点の解決を目的としたもので、

以下の点で評価できる。

第一に、著者は運転中の反応時間の確率密度分布を検討し、反応時間データに則した確率密度分布として ex-Gaussian 分布が妥当であることを実証している。ex-Gaussian 分布は指数分布とガウス分布を畳み込んだ分布であり、刺激認知と反応遂行の二段階で反応時間が決定されることを表している。本研究では、運転中の反応時間を計測し、そのデータに対数正規分布を含む複数の確率密度分布をフィッティングした。赤池情報量規準に従って各分布の良さを理論的に比較するとともに、推定誤差分散の観点で実験的に各分布のフィッティング精度を比較した結果、ex-Gaussian 分布が運転中の反応時間の確率密度分布として最も妥当であることが分かった。

第二に、著者は運転者の覚醒状態の指標として開眼率を使用し、覚醒状態による反応時間の変化を明らかにしている。開眼率とは瞼の開き具合の相対値であり、任意の時点での上瞼と下瞼の距離で表される。開眼率は運転中に画像処理によって実時間的に計測され、その値が大きいくほど眼を見開いている状態にあることを示す。他の覚醒度の指標と比べ、特別な装置を運転者に装着する必要はなく、運転中の反応時間や POC の変化に良く対応する。本研究では、運転中の開眼率の測定と同時に運転者自身の眠気の主観評価、及び運転者の顔表情評定による眠気の客観評価を行い、開眼率と眠気の評価値の間に有意な相関があることを示した。そして、開眼率によって運転者の覚醒が高い状態と低い状態に分け、それぞれで反応時間の確率密度分布を求めたところ、高い覚醒状態よりも低い覚醒状態で分布の平均が大きくなった。

第三に、著者は、運転中の反応時間の分散が運転者の年齢により変化することを明らかにしている。若年者群と高齢者群の運転中の反応時間に ex-Gaussian 分布をフィッティングしたところ、若年者群と高齢者群の間で分布の平均には有意な差はなかったが、分散は高齢者群で大きくなった。また、運転者の覚醒状態が下がると、年齢に関わらず分布の平均が大きくなった。これらの結果から POC を算出すると、高齢者群のほうが若年者よりも運転危険度が高く、特に覚醒状態が低い時には高齢者群の運転が危険であることが分かった。

以上要するに、本論文は交通事故防止のための運転危険度推定の精度を高めるため、運転者の反応時間の確率密度分布に着目し、運転中の反応時間には ex-Gaussian 分布が妥当であることを示した上で、覚醒状態と加齢により反応時間が変化し、それに伴い運転危険度も変化することを示したものであり、交通科学上寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値すると認める。

氏 名 郭 誠 祐
学位記番号 シ情 博甲第 463 号 (学術)
学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
学位論文題名 Automatic Generation of Contact State Graphs and Assembly Motion for Robotic Assembly of Polyhedral Objects (ロボットによる多面体物体組立のための接触状態グラフと組立動作の自動生成)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 長谷川 勉
(副 査) " " 倉 爪 亮
" " " 山 本 元 司

論文内容の要旨

Traditional methods for generating contact states using faces require large computation to plan robotic assembly tasks of two polyhedral objects. In this thesis, a new framework is proposed to effectively generate contact states. At the beginning, the faces of the polyhedral objects are triangulated, and two subcontacts are defined as the vertex-triangle contact and the edge-edge contact. Then contact states are generally represented as a set of these sub-contacts. The vertex-triangle contact and the edge-edge contact are classified into ten types and seven types according to the convexity or concavity of three edges composing a triangle, respectively. New contact states are generated using adjacent subcontacts according to the types, and a contact state graph is made by evolutionary transfers of the new contact states from an initial contact state to a target contact state.

A contact state graph generally consists of a large number of contact states and includes a lot of unnecessary contact states. To effectively obtain contact state graphs, a method to eliminate the unnecessary contact states is presented. The adjacency of vertex, edge and triangle is defined to get different priorities of vertices, edges and triangles according to a particular assembly task. When a contact state graph is completed only with the highest priority, we obtain a compact contact state graph. A minimum sequence of contact states is obtained from the compact contact state graph. This thesis presents procedures and algorithms to automatically triangulate faces, eliminate unnecessary contact states and generate a contact state graph.

A procedure to plan a final assembly motion is proposed. Distance functions are defined according to three motion conditions that are maintaining the current contact state, approaching the next contact state and avoiding collisions in

the assembly sequence. The distance functions are determined by finding the shortest Euclidean distance between vertices, edges and triangles, where the triangulation simplifies the procedure for determining these distance functions. The optimal assembly motion is planned using differential distance functions at discrete steps.

This triangulation-based framework is compared with a face-based method through statistically analyzing the contact state graphs and assembly motion. Finally, it is concluded that the proposed framework results in a significant improvement in the performance.

論文調査の要旨

機械部品の組立の自動化は、産業ロボットの重要な応用の 1 つである。部品の CAD モデル、組立前の初期状態、および最終組立状態から、その組立手順を自動生成することができれば、工業の生産性の向上だけでなく、幅広い分野へのロボット導入にも有効である。組立作業は、分離した 2 つの部品を接触させた後、それらの接触を維持しつつ相互の空間配置を変化させて最終拘束状態を作り上げることと定義できる。一般に、ロボットの位置制御精度よりも部品間のクリアランスが小さいことから、物体間の接触に伴う反力を検出して接触状態変化を検知し、その接触状態を維持しつつ次の接触状態を実現するという手順を繰り返して目標組立状態を達成する。本研究は、ロボットによる自動組立に関し、多面体部品を対象とした組立手順の自動生成と動作軌道の自動計画を行う新手法を提案したもので、以下の点で評価できる。

第一は、多面体を構成する多角形面を三角形に分割することにより、2 物体間の接触状態と可能な遷移を簡潔な手続きで数え上げる手法を考案したことである。接触判定は、穴の有無、凹凸など物体形状の複雑さに関わらず、表面を分割して得られた三角形間の接触可能性だけを考えれば良い。考慮すべき状態の種類が少なくなり、見通しのよいシンプルなアルゴリズムで物体間の接触状態遷移グラフが生成できるようになっている。

第二は、組立における 2 物体の初期接触状態と目標接触状態とに基づいて、実行可能な組立手順を含む小さなグラフの生成に成功したことである。組立対象部品の構成要素である頂点群、稜群、分割後の三角形群について、個別のタスクに関わるヒューリスティックな優先度を定義したうえで階層構造化することにより、展開ノード数を制限しつつ、目標ノードを含む接触状態遷移グラフの生成アルゴリズムを考案している。

第三は、組立部品について、他部品との衝突を回避しつつ、生成された組立手順を実現する動作の計画手法を考案したことである。部品形状を規定する要素である頂点群、稜群、三角形群のうち、接触を維持すべき要素群、動作を

妨げる接触を回避すべき要素群、目標状態として新たに接触すべき要素を特定したうえで、それらの間の距離関数に基づいた最適化過程として動作計画手法を定式化している。

第四は、自動組立のシミュレーションを行い、物体表面を多角形のままで扱う従来手法との比較を行い、提案手法の有効性を検証したことである。物体に開けられた穴へのペグの挿入作業について、初期接触状態を変えて実行した 100 回の手順生成において、接触状態数と状態遷移回数がそれぞれ 31.5%, 40.1% 削減されている。また、ヒューリスティックな優先度を導入した場合には 53.2%, 66.4% の削減に成功している。突起のある物体との組立でも同様な削減結果が得られている。

以上要するに本論文は、ロボットによる多面体部品の自動組立動作計画に関し、多面体を構成する全ての多角形面を三角形に分割したうえで、2 物体間の接触状態とその可能な状態遷移を簡潔かつ統一的に取り扱う新手法と、これを用いた組立状態遷移グラフの生成、組立手順の探索、および動作軌道の計画の各手法を提案し、シミュレーションによりその有効性を明らかにしたもので、ロボット工学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士（学術）の学位論文に値するものと認める。

氏 名 金 光 日
 学位記番号 シ情 博甲第 464 号 (工学)
 学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
 学位論文題名 無線バックホールシステムにおける
 多段無線中継

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 古 川 浩
 (副 査) " " 岡 村 耕 二
 " " 准教授 堀 良 彰

論文内容の要旨

次世代ブロードバンド無線通信に求められる数百 Mbps の伝送レートを実現するためには、守備半径が数十メートルの狭小セル基地局（スモールセル基地局）を多数敷設することが必要となる。スモールセル基地局の敷設コスト削減は次世代ブロードバンド無線通信を実現する鍵と言っても過言ではない。この目的のため、スモールセル基地局を無線で多段中継接続するセルラシステムが検討されている。基地局群のうち幾つか（コアノード）を有線で基幹網へと接続し、その他（スレーブノード）はコアノードを介した多段無線中継により基幹網と接続される。基地局と基幹網を接続するための有線回線の敷設数を削減できるため、システム全体の敷設コストを低減することができる。また基地局が有線で縛られないため、基地局の再配置や追

加が楽に行える利点も有する。当該無線中継網は通称、無線バックホールと呼ばれている。無線中継可能な段数が多ければ多いほど、システムの敷設に必要な有線回線の敷設量を削減できる。また欧州などで数多く現存する歴史的建造物等の一部の建物における無線エリア構築では、有線回線の敷設が不可能な場合があり、無線中継可能な段数が多ければ多いほど、当該無線システムの適用可能範囲を拡大することができる。すなわち許容可能な無線中継段数は、無線バックホールの性能を測るもっとも重要な指標である。

多段無線中継を阻害する最大の課題は電波干渉である。我々の研究室では無線バックホールにおいて多段無線中継を高効率に行う手法として、周期的間欠送信法 (IPT: Intermittent Periodic Transmission) を提案している。IPT は、パケットの送信源となるノードにおいて一定の送信周期 (IPT 送信周期) を持って間欠的に送信することにより、中継経路上での同一周波数リユース間隔を調整し、最適な送信周期を設定することで電波干渉によるパケット衝突を回避することを特徴とする。IPT による中継伝送効率の改善効果は実証実験によっても確認されており、10 段以上の多段中継も可能であることが実機上で示されている。本論文では IPT によりもたらされた多段無線中継の性能を更に向上させるため、3つの研究について取り組んだ。

第一の研究は、安定した IPT の運用を保証するための中継経路の安定性改善である。IPT はツリー構造の中継経路上で運用され、中継経路の設定 (ルーティング) は IPT の伝送性能を大きく左右する。無線バックホールシステムでは各基地局は固定的に設置されるため、基地局間の伝搬路特性は変動しないものと誤解される場合があるが、実際には人の移動やドアの開閉等によって変動する。従来のルーティング手法では、無線伝搬路特性の時間変動を考慮しておらず、経路を構築した瞬間の伝搬路特性によって構築された中継経路は、それ以降も最適である保証はない。動的な伝搬路特性の変動に追従しようと、ルーティングを繰り返すと、中継経路が不安定となってしまう。本論文では無線伝搬路特性が時間変動する環境でも安定したルートを構築するためのルーティング手法を提案し、システムスループットの改善について評価を行った。提案手法は、一定間隔でシステムの中継経路の更新を行い、その際、ノード間の伝搬損を過去の履歴を加味した逐次平均で表すことで、漸近的に安定した中継経路へと収束させることを特徴とする。提案手法を実機上で評価した結果、伝搬路が動的に変動する実環境において安定した中継経路が構築でき、システムのスループットが改善されることが確認できた。

第二の研究は、IPT の効果を最大化する最適送信周期の自動設定プロトコルについてである。無線バックホールにおいて、IPT に基づいた多段無線中継を行う場合、IPT 送信周期は最も重要なパラメータであり、適切に設定しない

と IPT の効果は発揮できない。IPT 送信周期は、ノード配置や周辺環境などに依存するため、机上計算であらかじめ適切な数値を設定することは難しい。IPT 送信周期を自動的に設定する手法が必要となる。本論文ではコアノードが各スレーブノードに対しトレーニングパケットを送信することにより、コアノードから各スレーブノードまでのスループットが最大になる IPT 送信周期を設定する手法を提案し、実験とシミュレーション両方で評価を行った。その結果、提案手法によって獲得された IPT 送信周期は常に最適な送信周期となることを確認した。

第三の研究は、指向性アンテナにより電波干渉を物理的に抑制した状態での IPT の実現についてである。指向性アンテナは送信電力を一定方向へ集中させることにより、他ノードへの干渉を軽減できる長所を有する。指向性アンテナの適用により IPT の性能は更に向上するものと期待されるが、全方位接続性を担保するためには異なる主軸方向の複数の指向性アンテナを装備する必要があり、その適応的な切り替え処理で生じる遅延時間の影響によって中継伝送効率の低下が生じる問題があった。本論文では各ノードに複数の無線インタフェースを搭載し、インタフェース毎に固定的な指向性を持ったアンテナを接続することにより、この切り替え処理遅延の影響を軽減できる手法 (FDA: Fixed Directional Antenna) を提案した。さらに FDA が適用された無線中継ノードに適したルーティング手法を提案し、これと IPT を併用することによって高い中継伝送効率を達成した。提案手法を実機テストベッドにより評価し、無指向性アンテナを適用した場合に比べて約 30% の性能改善が確認できた。

スマートフォンの爆発的普及に伴うトラフィックの急増により、無線通信のブロードバンド化への要求は一層高まってきている。本論文の成果は、無線バックホールの多段無線中継時の性能を向上させるものであり、無線バックホールが適用できる建造物の対象範囲を広げるものである。これによってスモールセルの導入が促進され、大容量な無線通信網の実現を容易なものとする。

論文調査の要旨

無線通信システムのブロードバンド化は、基地局の守備範囲を減少させ (スモールセル化)、その結果、必要な基地局数が増加し、システムの構築費用が増す。スモールセル基地局の敷設コスト削減のため、基地局を無線で多段中継接続する手法が検討されている。基地局群のうちいくつか (コアノード) を有線で基幹網へと接続し、その他 (スレーブノード) はコアノードを介した多段無線中継により基幹網と接続する。基地局と基幹網を接続するための有線回線の敷設数を削減できるため、システム全体の敷設コストを低減できる。当該無線中継網は、通称、無線バックホールと呼ばれている。許容可能な無線中継段数は無線バ

クホールの性能を決定づける最も重要な指標である。たとえば、無線中継可能な段数が多ければ多いほど有線回線の敷設量を削減でき、システムの構築にかかるコストを低減できる。

無線バックホールにおける多段無線中継を阻害する最大の要因は電波干渉である。同問題を解決する手法として周期的間欠送信法 (Intermittent Periodic Transmission, IPT) が知られている。IPT では、パケットの送信源となるノードが一定の送信周期 (IPT 送信周期) により意図的に間欠送信を行うことで、中継経路上での同一周波数リユース間隔を調整することを特徴とする。電波干渉の発生を抑制する最短の送信周期を設定することで、中継伝送効率を最大化される。IPT は、伝搬路が安定で、なおかつ適切な IPT 送信周期が設定されていれば、原理上、無線中継段数に依らず一定のスループットをもたらす。しかし、現実には伝搬路は不安定であり、また IPT 送信周期を最適化するための手法も提案されていなかった。本論文は、これらの課題を解決し、実環境において IPT の性能をより一層向上させることを目的としている。

まず著者は、不安定な伝搬路の下でも安定した IPT の運用を可能とする新たなルーティングプロトコルを提案した。IPT はツリー構造の中継経路上で運用され、ルーティングの安定性はその性能を左右する。無線バックホールにおける基地局間の無線伝搬路は、人の移動やドアの開閉によって変動する。IPT と組み合わせられる従来のルーティングプロトコルでは、このような無線伝搬路の時間変動を考慮していなかった。本論文が提案したルーティングプロトコルは、伝搬損をメトリックとするベルマン・フォードアルゴリズムを基本とし、一定間隔で中継経路の更新を行い、その際、ノード間の伝搬損を過去の履歴を加味した逐次平均で表すことで、漸近的に安定した中継経路へと収束させることを特徴とする。実機上で提案手法を評価した結果、伝搬路が動的に変動する環境下でも安定した中継経路が構築され、IPT 適用の下で安定した多段無線中継が可能となった。

次に著者は、IPT 送信周期を最適化する自動周期設定プロトコルを提案した。IPT 送信周期はノード配置や周辺環境に依存するため、机上計算で事前に適値を設定することは困難である。本論文ではコアノードが各スレーブノードに対してトレーニングパケットを送信することでコアノードから各スレーブノードまでのスループットが最大となるような IPT 送信周期を自動で設定するプロトコルを提案した。実機とシミュレーションの両方で評価を行った結果、提案プロトコルによって獲得された IPT 送信周期によってスループットを最大化する多段無線中継が可能となった。

最後に著者は、IPT の性能を更に向上させるために指向性アンテナを適用する手法を提案した。指向性アンテナを

用いる場合、各基地局では全方位接続性を担保するために異なる主軸方向の複数の指向性アンテナを装備する必要がある。指向性アンテナの適用は電波干渉を抑制してスループットを向上させる効果をもたらすが、指向性アンテナの切り替え処理で生じる遅延がその効果を減じてしまう問題があった。本論文では、切り替え処理遅延問題を解決するため、各ノードに複数の無線インターフェースを用意し、各無線インターフェースに一つの指向性アンテナを固定的に接続することで、アンテナ切り替え処理を無線インターフェースの選択処理に置き換える手法 (Fixed Directional Antenna, FDA) を提案した。FDA と IPT を併用して多段無線中継時のスループット特性を評価した結果、両者を用いない場合との比較において大幅なスループット特性の改善が得られた。

以上を要約すると本論文は、無線バックホールにおける多段無線中継を可能とする IPT 方式に着目し、同方式を実環境下で安定的に動作させるためのルーティングプロトコルならびに最大のスループット特性を得るための IPT 送信周期の自動設定プロトコルを提案し、さらに IPT 方式に指向性アンテナを適用することで電波干渉を抑制し更なるスループット特性の向上が達成できることを示した。本研究成果は、多段無線中継を可能とする高性能無線バックホールの実現に貢献し、ブロードバンド無線通信の発展に寄与するものである。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文に値するものと認める。

氏 名 小 寺 康 平
学位記番号 シ情 博甲第 465 号 (工学)
学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
学位論文題名 シングルキャリア伝送における伝搬路等化の計算量削減

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 古 川 浩
(副 査) " 准教授 藤 崎 清 孝
" " " 實 松 豊
" " " 牟 田 修

論文内容の要旨

近年、携帯電話や無線 LAN の普及に見られるように、無線通信の利用者数は著しく増加している。無線通信を活用した高度なアプリケーションの普及とともに、通信速度の更なる高速化が求められている。高速無線通信技術として注目されているのが、マルチキャリア伝送の一つである直交周波数分割多重 (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) である。OFDM は高い周波数利用率を実現でき一時に大容量のデータ通信が可能である。しかしながら、OFDM 信号はピーク電力対平均電力比が高く、

送信電力増幅器(PA: Power Amplifier)の電力効率が大きく低下することが問題となる。

マルチキャリア伝送に対して、4 位相偏移変調(QPSK: Quadrature Phase Shift Keying)信号や最小偏移変調(MSK: Minimum Shift Keying)信号などを単一キャリア周波数により伝送する方式は、シングルキャリア伝送と呼ばれる。これらはいずれも OFDM に比べて電力効率が低い特長を持つ。特に送信信号の振幅変動がない MSK 等の定包絡線変調は、電力効率の高い非線形 PA を送信 PA として適用できるため、他の変調方式に比べ電力効率の大幅な向上が見込める。しかしながら、シングルキャリア伝送ではマルチキャリア伝送に比べて送信シンボル周期が短くなるため、マルチパス伝搬路に起因する遅延波の影響すなわち伝搬路歪みの影響を受けやすい。このためシングルキャリア伝送では受信機において伝搬路歪みを補償するための伝搬路等化が必須とされる。

伝搬路等化は線形等化と非線形等化に大別される。線形等化とは線形フィルタにより等化の目的を果す手法であり、代表的な手法としては伝搬路の逆特性となるフィルタを用いる ZF(Zero Forcing)等化と、送信信号と線形フィルタ出力との平均二乗誤差を最小にする MMSE(Minimum Mean Square Error)基準による MMSE 等化が存在する。一般に MMSE 等化は ZF 等化に比べ良好な伝送特性を示す。特に、複数のシンボル系列から成る伝送ブロックを定め、それぞれの末端に一切の信号を伝送しない時間ギャップを設け(ZP: Zero padding)、時間領域でブロック単位の MMSE 等化を行う MMSE-ZP(Minimum Mean Square Error-Zero Padding)等化は優れた伝送特性を示すことが知られている。一方、線形等化に属さない等化手法を非線形等化と呼び、代表的な手法としては受信したシンボル系列から最も尤度の高い系列を探索する最尤系列推定(MLSE: Maximum Likelihood Sequence Estimation)がある。ここで遅延広がり長い伝搬路においては、線形等化あるいは非線形等化の種別に関わらず、いずれの等化手法も計算量が増大し装置構成が複雑となる問題があった。特に MLSE の場合、遅延広がり長い長さとともに計算量が指数関数的に増加する問題があった。

そこで本研究では、シングルキャリア伝送における伝搬路等化の計算量削減について検討した。

第一に、伝搬路等化として線形等化である MMSE-ZP 等化を適用した場合の計算量削減について検討を行なった。本検討では、推定伝搬路に対し信号レベルの高い伝搬路パスのみを選択することで MMSE-ZP 等化の計算量を削減する手法を提案した。提案手法を適用した MMSE-ZP は、計算量を従来の MMSE-ZP のおよそ 1/4 にまで削減できると同時に、一般的な線形等化に比べ良好な等化性能も得られることが分かった。

第二に、送受信共に高い電力効率を得ることが可能な定

包絡線変調(CEM: Constant Envelope Modulation)システムに、MLSE を適用した場合の計算量削減について検討した。CEM 信号の包絡線は一定であることに着目し、受信 IF(Intermediate Frequency)帯信号に対して簡素な低分解能 ADC(Analog-Digital Converter)を適用することとした。検討する CEM システムにおいては、低分解能 ADC に起因する非線形歪みを補償するため MLSE を導入し、さらに MLSE の計算量削減手法としてよく知られている Viterbi アルゴリズムを適用した(Viterbi 等化)。このとき ADC の非線形処理を考慮した評価メトリックの計算が必要となるが、IF 帯信号を対象とするため、計算量が大幅に増大する問題があった。遅延広がり長い伝搬路においては、この問題がさらに深刻となる。これに対し本検討は、IF 帯 ADC の非線形処理をベースバンド帯での量子化誤差の印加による簡易な線形モデルで近似することを提案した。ここで、量子化誤差の大きさと受信信号の振幅との間に負の相関があることに着目し、簡易な量子化誤差推定関数を導入した。さらに特性改善のため、量子化誤差推定関数を用いた評価メトリックのうち尤度の高いものに対し、IF 帯 ADC の非線形処理を厳密に模擬して尤度計算を行う手法を提案した。提案手法を適用した Viterbi 等化は、伝送特性の劣化を抑制しつつ、評価メトリックの計算量削減を行わない場合に比べ計算量を 1/32~1/128 程度に削減できることが分かった。

本研究で達成したこれらの研究成果は、電力効率が死活問題となる高速モバイル端末やスモールセル基地局向けの無線インターフェースへの適用が考えられる。これらは次世代モバイルの根幹をなす装置群であり、すなわち本研究は次世代モバイルの実現に大きく貢献するものである。

論文調査の要旨

携帯電話や無線 LAN は、その普及とともに更なる高速通信が求められている。無線通信の高速化を阻害する最大の要因は伝搬路歪みである。マルチキャリア変調の一つである OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) は、サブキャリアを複数束ねることで変調波を生成し、各サブキャリアの狭帯域性により伝搬路歪みの影響を受けにくいことを特徴とする。その一方で、OFDM 信号はピーク電力対平均電力比が高く、電力付加効率の低い、線形性の高い送信電力増幅器を必要とする。これに対して、QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 等のシングルキャリア変調は OFDM に比べて送信電力増幅器への線形性の要求基準が低く、近年再び注目を集めている。シングルキャリア伝送は伝搬路歪みの影響を受けやすいため、複雑な信号処理を要する伝搬路等化の適用が不可欠となる。

伝搬路等化は線形等化と非線形等化に大別される。線形等化とは線形フィルタにより等化を行う手法であり、代表的な手法としては送信信号と線形フィルタ出力との平均

二乗誤差を最小にする MMSE (Minimum Mean Square Error) がある。MMSE のなかでも、複数のシンボル系列から成る伝送ブロックを定め、それぞれの末端に一切の信号を送信しない時間ギャップを設けてブロック単位の MMSE を行う MMSE-ZP (Zero Padding) は、ブロック端において符号間干渉が低減されるため、遅延波合成によるパスダイバーシチ効果が得られることを特徴とする。一方、線形等化に属さない等化手法を非線形等化と呼び、代表的な手法としては受信したシンボル系列から最も尤度の高い系列を探索する MLSE (Maximum Likelihood Sequence Estimation) がある。遅延広りの長い伝搬路においては、線形等化ならびに非線形等化、いずれの等化手法も計算量が増大し装置構成が複雑となる問題があった。そこで本論文ではシングルキャリア伝送における伝搬路等化の計算量削減について検討を行った。

まず著者は、線形等化である MMSE-ZP の計算量削減について検討した。MMSE-ZP では、受信ベクトルに等化行列を乗算することで等化处理が行われる。この等化行列は、伝搬路の離散時間インパルス応答を成分に持つ伝搬路行列を含む複数の行列の積により与えられることが知られている。本研究では、当該伝搬路行列を、受信側で推定した離散時間インパルス応答の各成分のうち SNR (Signal to Noise power Ratio) の高い成分のみが含まれるように疎行列化し、行列の乗算処理にかかる計算量を削減する手法を提案した。提案手法が適用された MMSE-ZP の計算量を、適用しない場合に比べておよそ 1/4 にまで削減できた。更に、高い SNR を有する離散時間インパルス応答の成分を用いた等化を実現したことにより、提案手法を適用しない通常の線形等化に比べて優れたビット誤り率特性が得られた。

次に著者は、非線形等化である MLSE の計算量削減について検討した。前提とする変調方式は、極めて高い電力付加効率を有する非線形電力増幅器が適用可能な定包絡線変調(Constant Envelope Modulation, CEM)とした。CEM 信号の包絡線は一定であることに着目し、受信 IF (Intermediate Frequency) 信号に対して簡素な 1bit-ADC(Analog-Digital Converter)を適用することとした。MLSE では、全ての候補シンボル系列に対して尤度を計算する必要がある、その処理量は膨大なものとなる。特に尤度計算に必要な 1bit-ADC に伴う量子化誤差の計算処理にかかる計算量が大きい。本検討では、当該量子化誤差とゼロ IF 表示された受信信号の振幅との間に負の相関があることに着目し、線形近似による簡易な量子化誤差推定手法を提案した。当該手法を MLSE の計算量削減手法としてよく知られている Viterbi アルゴリズムと組み合わせることで、更なる計算量削減を達成した。

以上を要約すると本論文は、シングルキャリア伝送無線通信における伝搬路等化の計算量削減に関する検討を行

い、線形等化である MMSE-ZP に関しては伝搬路のパス選択による疎行列化によって計算量が削減できることを示し、また非線形等化である MLSE に関しては線形近似による簡易な量子化誤差推定手法により計算量が削減できることを示した。これらの成果は、省電力性が極めて重要な性能要件とされるモバイル端末の無線インターフェースへの適用が考えられ、その発展に大きく貢献するものである。よって、本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏 名 富岡 章
学位記番号 シ情 博甲第 466 号(工学)
学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
学位論文題名 66kV 級イットリウム系高温超伝導変圧器の開発

論文調査委員

(主 査) 九州大学 准教授 岩 熊 成 卓
(副 査) " 教授 船 木 和 夫
" " " 木 須 隆 暢

論文内容の要旨

近年、地球温暖化防止対策として CO₂ 排出量削減が喫緊の課題となっており、電力系統においても、既存系統に分散型電源を取り入れた際の運用効率向上とともに個々の機器の高性能化、高効率化が求められている。超伝導技術はこれを実現するための手段として期待されている。超伝導化は機器の高効率化に加えて、小型・軽量化を可能にする。逆に、同寸法であれば容量増大が可能である。

超伝導機器の研究開発はこれまで世界中で精力的に行われてきたものの、実用化されたのは MRI や磁気浮上列車、高エネルギー物理用加速器など直流仕様のものに限られ、送電ケーブルや変圧器などの交流仕様の超伝導電力機器は研究開発段階である。この要因としては、超伝導線材が電気抵抗ゼロでありながら、変動電流・磁界印加時、すなわち交流環境下では電気抵抗ゼロの発現機構である磁束ピンニング現象に起因して損失を発生すること、さらに極低温下では比熱が小さいために安定性が低く、常電導状態に転移しやすいことなどが挙げられる。1986 年に酸化物高温超伝導体が発見されたことにより、動作温度の向上に併せて冷媒に液体窒素を使用することが可能となり、安定性の問題は解決された。しかし、当初開発が進められたビスマス系酸化物超伝導線材は、多芯線構造であるもののフィラメント間の超伝導結合により損失は低減できなかった。一方、現在、次世代超伝導線材として開発が進められているイットリウム系酸化物超伝導線材は、材料学的および製造上の制約により扁平なテープ形状をしており、従来の低交流損失化、大電流量化等の手法は適用できなかったが、

従来の多芯化とは異なる手法の低損失化法が提唱され、巻線における低損失性も実証されている。

また、近年、超伝導変圧器では限流機能が注目されている。これは、事故時に限界電流以上の過大電流により即座に巻線に常電導抵抗を発生させ、事故電流を抑制するとともに、事故点における電圧降下の拡大すなわち瞬低の防止にも寄与し、電力品質の向上をもたらす。さらに限流機能の付加により、事故時には巻線の常電導転移により高インピーダンスが確保されることから、通常運転時の%インピーダンスを下げることができ、電圧変動を小さく、すなわち電力システムの安定性向上も期待できる。しかし、この実現には、イットリウム系線材を用いた超伝導巻線の過大電流に対する応答特性の解明と限流機能を発揮するための設計手法の確立が必要である。

本研究は、低損失性、限流特性を有するイットリウム系の超伝導線材を用いた配電系統用 66kV-20MVA 級限流機能付き超伝導変圧器の開発を目的とし、主な開発項目として、①高電圧化：66kV 級に求められる耐電圧性能(交流 140kV、雷インパルス 350kV：JEC 規定)の確保、②大電流容量化：二次巻線(1673A)を目指した巻線の大電流容量化および電流の均流化、③耐短絡電流及び限流機能付加：短絡電流(定格電流の約 7 倍)に耐えられる導体構成法及び、短絡電流を定格電流の 3 倍以下に限流するための導体構成法並びにその解析手法の確立、を掲げて実施したものである。

高電圧化では、サブクール液体窒素中における一次巻線と二次巻線間、ターン間及び電流リード・ブッシングの絶縁構造について技術開発を行い、モデルコイル等で検証した。最大の課題であった一次巻線と二次巻線間の耐交流過電圧対策では、詳細な電界解析を行い、電界強度を 25kV/mm 以下にすることで耐電圧特性を確保できることを明らかにし、これを実現するために超伝導巻線端部に電界緩和リングを設置することとした。これにより、サブクール液体窒素を冷却・絶縁媒体とする 66kV 級電力用変圧器の絶縁設計手法を確立した。

大電流容量化では、イットリウム系超伝導テープ線材を多層並列化した際に、素線のインダクタンスを均等化するための転位方法について検討し、24 本並列導体のモデルコイルを試作して素線の通電、分流特性を評価した。その結果、直流 2000A、交流 1100A まで(電源性能の制約による)の安定通電と、素線間±20%以内の均等分流を確認し、テープ形状超伝導線材を用いて kA 級までの大電流容量導体を構成することに成功した。

耐短絡及び限流機能付加では、まず長さ 10m 級のモデルコイルを作成して限界電流を超える過電流通電試験を行い、限界電流の 7 倍程度の過電流に耐える導体構成法、および、短絡電流を約 1/3 に限流する導体構成法を明らかにした。さらに、限流機能に関しては、巻線を全長に渡って常電導転移させるために、電界 5V/m 以上及び最初の電流

ピークを限界電流の約 3 倍以上に設定すれば良いことを明らかにし、6.9kV/2.3kV-400kVA 超伝導変圧器を設計、試作して突発短絡試験を行い、設計通りに動作することを確認した。これにより、限流機能付き超伝導変圧器の設計手法を会得した。

以上の要素技術を用いて 66kV/6.9kV-20MVA 級超伝導変圧器の設計を行った。次年度、電流容量のみを 1/3 とした 66kV/6.9kV-6MVA 級超伝導変圧器モデル(容量は線材特性に依存)を製作し、特性を評価する予定である。本器では、従来変圧器に比べ、設置面積は 85%、重量は 67%となった。また、国内の 66kV 級常電導変圧器を超伝導変圧器に置き換えることで、CO₂削減効果は約 107 万 ton/年となった。

本研究により、66kV-20MVA 級限流機能付き超伝導変圧器の設計技術を確立した。次年度の特性評価により製造技術の検証も行う予定である。本研究から実用化に向けて明らかになった課題は、超伝導線の品質向上、冷却装置の小型軽量化などである。両者は超伝導変圧器のみならず超伝導機器全体に関係する技術であり、超伝導機器の実用化に向けて一層の技術開発を期待する。

論文調査の要旨

近年、地球温暖化防止対策として CO₂ 排出量削減が喫緊の課題となっており、電力系統においても、既存系統に分散型電源を取り入れた際の運用効率向上とともに個々の機器の高性能化、高効率化が求められている。超伝導技術はこれを実現するための手段として期待されている。超伝導化は機器の高効率化に加えて、小型・軽量化を可能にする。逆に、同寸法であれば容量増大が可能である。

超伝導機器の研究開発はこれまで世界中で精力的に行われてきたものの、実用化されたのは MRI や磁気浮上列車、高エネルギー物理用加速器など直流仕様のものに限られ、送電ケーブルや変圧器などの交流仕様の超伝導電力機器は研究開発段階である。この要因としては、超伝導線材が直流環境下では電気抵抗ゼロでありながら、交流環境下では磁束ピンニング現象に起因して損失を発生すること、さらに極低温下では比熱が小さいために安定性が低く、常電導状態に転移しやすいことなどが挙げられる。1986 年に酸化銅系超伝導体が発見されたことにより、動作温度の向上に併せて冷媒に液体窒素を使用することが可能となり、安定性の問題は解決された。しかし、当初開発が進められたビスマス系酸化物超伝導線材は、多芯線構造であるもののフィラメント間の超伝導結合により損失は低減できなかった。一方、現在、次世代超伝導線材として開発が進められているイットリウム系酸化物超伝導線材は、材料学および製造上の制約により扁平なテープ形状をしており、従来の低交流損失化、大電流容量化等の手法は適用できなかったが、従来の多芯化とは異なる手法の低損失化法が提唱され、巻線における低損失性も実証された。

また、近年、超伝導変圧器では限流機能が注目されている。これは、事故時に臨界電流以上の過大電流により即座に巻線に常電導抵抗を発生させ、事故電流を抑制するとともに、事故点における電圧降下の拡大すなわち瞬低の防止にも寄与し、電力品質の向上をもたらす。さらに限流機能の付加により、事故時には巻線の常電導転移により高インピーダンスが確保されることから、通常運転時の%インピーダンスを下げることができ、電圧変動を抑制し電力システムの安定性向上も期待できる。しかし、この実現には、イットリウム系線材を用いた超伝導巻線の過大電流に対する応答特性の解明と限流機能を発揮するための設計手法の確立が必要であった。

本研究は、低損失性、限流特性を有するイットリウム系の超伝導線材を用いた配電系統用 66kV-20MVA 級限流機能付き超伝導変圧器の開発を目的とし、主な開発項目として、①高電圧化：66kV 級に求められる耐電圧性能(交流 140kV、雷インパルス 350kV：JEC 規定)の確保、②大電流量化：二次巻線の大電流量化(1.7kA)および素線間電流分流の均等化、③耐短絡電流及び限流機能付加：短絡電流(定格電流の約 7 倍)に耐えられる導体構成法及び、短絡電流を定格電流の 3 倍以下に限流するための導体構成法並びにその解析手法の確立、を掲げて行ったものである。本論文はこれらの成果をまとめたものであり、以下の点で評価できる。

- (1) 高電圧化では、サブクール液体窒素中における高圧巻線と低圧巻線間、ターン間及び電流リード・ブッシングの絶縁構造について技術開発を行い、モデルコイル等で検証した。最大の課題となった高圧巻線と低圧巻線間の耐交流過電圧対策では、詳細な電界解析を行い、耐電圧特性を確保するには電界を 25kV/mm 以下にしなければならないことを明らかにし、超伝導巻線端部に電界緩和リングを設置することでこれを実現しうることを示した。これにより、サブクール液体窒素を冷却・絶縁媒体とする 66kV 級電力用変圧器の絶縁設計手法を確立した。
- (2) 大電流量化では、イットリウム系超伝導テープ線材を多層並列化した際に、素線のインダクタンスを均等化するための転位方法について検討し、24 本並列導体のモデルコイルを試作して素線の通電、分流特性を評価した。その結果、直流 2kA、交流 1.1kA まで(電源性能の制約による)の安定通電と、素線間±20%以内の均等分流を確認し、テープ形状超伝導線材を用いて kA 級までの大電流量導体を構成することに成功した。
- (3) 短絡及び限流機能付加では、まず長さ 10m 級のモデルコイルを作製して臨界電流を超える過電流通電試験を行い、臨界電流の 7 倍程度の過電流に耐える導体構成法、および、短絡電流を約 1/3 に限流する導体

構成法を明らかにした。さらに、限流機能に関しては、巻線を全長に渡って常電導転移させるために、電界 5V/m 以上及び最初の電流ピークを臨界電流の約 3 倍以上に設定すれば良いことを明らかにし、6.9kV/2.3kV-400kVA 超伝導変圧器を設計、試作して突発短絡試験を行い、設計通りに動作することを確認した。これにより、限流機能付き超伝導変圧器の設計手法を確立した。

- (4) 以上の要素技術を用いて 66kV/6.9kV-20MVA 級超伝導変圧器の設計を行った。従来変圧器に比べ、設置面積は 85%、重量は 67%であり、変圧器の小型・軽量化を達成した。

以上要するに、本論文は、66kV-20MVA 級限流機能付き超伝導変圧器を実現するための要素技術開発を行い、種々の課題についてその解決手法を提案・検証し、その設計・製作技術を確立したものであり、電気システム工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏 名 戸 畑 享 大
 学位記番号 シ情 博甲第 467 号(工学)
 学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
 学位論文題名 移動ロボット群による環境構造の 3 次元計測に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 倉 爪 亮
 (副 査) " " 長谷川 勉
 " " " 山 本 元 司

論文内容の要旨

日常生活環境で人間に対して様々なサービスを提供するサービスロボットや、大震災等で被災した建物内部で生存者の捜索を行うレスキューロボットなど、移動機構を持ち様々な環境で種々の作業を行う知能ロボットの実現が期待されている。知能ロボットが人と共存し、豊かで安心、安全な社会を実現する新たな社会基盤となるためには、時々刻々、様々に変化するロボット周囲の状況を、ロボットあるいはロボットを取り巻くシステムが的確に把握し、必要な時に必要な情報をロボットに提供する機能の実現が不可欠である。なかでも、例えば壁や柱、ドア、什器の位置、移動経路上の段差や障害物の有無など、作業環境の幾何構造を記した環境地図は、ロボットが移動および作業を行う上で最も基本的かつ不可欠な情報である。すなわち、効率的かつ安全な移動や作業の実行には、必要十分な精度、解像度を有する環境地図が常にロボットに提供されなければならない。しかし、従来、知能ロボットに提供される地図は、移動に目的を限定した 2 次元環境地図や、部屋内

の机や椅子の配置などを記した小規模な 3 次元環境地図が主であった。特に 3 次元環境地図は、CAD データを基に人手により作成されることが多く、移動ロボットの作業環境を記した大規模な 3 次元環境地図の作成には多くの手間とコストが必要であった。しかし、この 3 次元環境地図が移動ロボットにより自動的に作成できれば、大幅な地図作成コストの低減が期待できる。本論文は、知能ロボットによる作業に必要な高精度な 3 次元地図を、ロボット自ら計測し、構築するシステムに関するものである。

本論文は 5 章から構成される。第 1 章は序論である。第 2 章では倉爪らによって提案され、本研究の基盤技術である、群移動ロボットによる高精度位置同定手法（群ロボットによる協調ポジショニング法）が詳説されている。本手法は複数台の移動ロボットを交互に移動、静止させ、移動前後のロボット間の相対位置をそれぞれ計測することで、移動後の各ロボットの位置を高精度に決定するものである。第 3 章では、第 2 章で示した群移動ロボットによる高精度位置同定手法と、ロボットに搭載したレーザ測距装置を組み合わせた、移動ロボット群による 3 次元環境地図の構築手法を提案している。本手法は、ロボット群が移動、静止、多地点での周囲環境のレーザ計測を繰り返すことで、ロボット群により移動経路周囲の 3 次元環境地図を高精度で獲得するものである。さらに提案手法を実装した機械モデルを構築し、機械モデルを用いた屋内外環境での 3 次元環境地図作成実験の結果を示している。本機械モデルは、1 台の親ロボットと 2 台の子ロボットの計 3 台の移動ロボットからなる群ロボットシステムであり、親ロボットには子ロボットとの相対位置を高精度で計測するための測量用レーザ測距器と環境計測用 3 次元レーザ測距器が搭載されている。一方、子ロボットには、親ロボットの測量用レーザ測距器から投射されたレーザ光を正確に測量用レーザ測距器の方向へ反射するためのコーナキューブが搭載されている。この群ロボットシステムを用いて、屋内環境、起伏のある屋外環境における 3 次元地図作成実験を行い、計測された 3 次元環境地図の精度を評価している。また、高精度の 3 次元計測に必要なロボット群の移動、観測計画についても検討し、子ロボットの移動と親ロボットによる計測の手順と計測精度の関係について議論している。第 4 章では、ある時刻までに計測された 3 次元地図を、オペレータによる計測作業の指示や、ロボットによる観測計画の自動立案に利用することで、大規模な 3 次元環境地図を効率的に作成する手法を提案している。オペレータによる計測作業の遠隔指示、および自動化された 3 次元環境地図の計測実験を行い、獲得された 3 次元地図が計測計画の立案に有用であ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総括し、今後の展望について述べている。

論文調査の要旨

日常生活環境で人間に対して様々なサービスを提供するサービスロボットや、大震災等で被災した建物内部で生存者の捜索を行うレスキューロボットなど、移動機構を持ち多様な環境で種々の作業を行う知能ロボットの実現が期待されている。知能ロボットが人と共存し、豊かで安心、安全な社会を実現する新たな社会基盤となるためには、時々刻々変化するロボット周囲の状況を、ロボットあるいはロボットを取り巻くシステムが的確に把握し、必要な時に必要な情報をロボットに提供する機能の実現が不可欠である。なかでも、例えば壁や柱、ドア、什器の位置、移動経路上の段差や障害物の有無など、作業環境の幾何構造を記した環境地図は、ロボットが移動および作業を行う上で最も基本的かつ不可欠な情報である。すなわち、効率的かつ安全な移動および作業の実行には、必要十分な精度、解像度を有する環境地図が常にロボットに提供されなければならない。しかし、従来、知能ロボットに提供される地図は、移動に目的を限定した 2 次元環境地図や、部屋内の机や椅子の配置などを記した小規模な 3 次元環境地図が主であった。特に 3 次元環境地図は、CAD データを基に人手により作成されることが多く、移動ロボットの作業環境を記した大規模な 3 次元環境地図の作成には多くの手間とコストが必要であった。

本論文は、知能ロボットの作業に必要な高精度な 3 次元環境地図を、移動ロボット群が多地点からのレーザ計測に基づき作成するシステムを提案しており、以下の点で評価できる。

まず第一に、従来倉爪らにより提案されている群移動ロボットによる高精度位置同定法（群ロボットによる協調ポジショニング法）と、ロボットに搭載したレーザ測距装置を組み合わせた、移動ロボット群による 3 次元環境地図の作成手法を提案している点である。本手法は、ロボット群が移動、静止、多地点での周囲環境のレーザ計測を繰り返すことで、移動経路周囲の 3 次元環境地図を高精度で獲得するものである。知能ロボットの移動や作業に必要な高精度な 3 次元環境地図がロボット自身により作成でき、地図作成コストが大幅に低減できる。

第二に、提案手法を実装した機械モデルを構築し、屋内外環境での 3 次元環境地図作成実験の結果を示した点である。本機械モデルは、1 台の親ロボットと 2 台の子ロボットの計 3 台の移動ロボットからなる群ロボットシステムであり、親ロボットには子ロボットとの相対位置を高精度で計測するための測量用レーザ測距器と環境計測用 3 次元レーザ測距器が搭載されている。一方、子ロボットには、親ロボットの測量用レーザ測距器から投射されたレーザ光を正確に測量用レーザ測距器の方向へ反射するためのコーナキューブが搭載されている。この群ロボットシステムを用いて、屋内環境、および起伏のある屋外環境にお

ける 3 次元地図作成実験を行い、計測された 3 次元環境地図の精度を評価している。また、高精度の 3 次元計測に必要なロボット群の移動、観測計画についても検討し、ロボットの移動や計測の手順と計測精度の関係を明らかにしている。

さらに第三に、ある時刻までに計測された 3 次元地図を、オペレータによる計測作業の指示や、ロボットによる観測計画の自動立案に利用することで、大規模な 3 次元環境地図を効率的に作成する手法を提案した点である。オペレータによる計測作業の遠隔指示、および自動化された 3 次元環境地図の計測実験を行い、獲得された 3 次元地図が計測計画の立案に有用であることを確認している。

以上要するに、本研究は、ロボット群の協調動作とロボットに搭載したレーザ測距装置により、知能ロボットの作業遂行に必要な広域かつ高精度な 3 次元環境地図を、多地点からのレーザ計測に基づき作成するシステムを提案し、実験を通してその有効性を示したものであり、ロボット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 濱 田 了
 学位記番号 シ情 博甲第 468 号 (工学)
 学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
 学位論文題名 Development of Rapid Bacteria
 Detection Method Using
 Dielectrophoresis and Impedance
 Measurement
 (誘電泳動とインピーダンス計測を用いた迅速細菌検出法の開発)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 末 廣 純 也
 (副 査) " " 圓 福 敬 二
 " " " 林 健 司

論文内容の要旨

This research put focus on exploiting a principle and several derived applications of detection method of biological particles suspended in liquid medium utilizing DEP combined with impedance measurement. The method called dielectrophoretic impedance measurement (DEPIM). The DEPIM method has potential to realize rapid and low-cost bacteria detection device because it uses only electrical phenomenon to enrich and detection of bacteria. In addition, DEPIM can realize fast and simple bacteria inspection using only electrical phenomena and instruments without any preliminary chemical treatment. The DEPIM can also realize highly sensitive detection combined with

electropermeabilization(EP), EP-assisted DEPIM (EPA-DEPIM), and selective detection of biological cells according to their species by combining with an antigen-antibody reaction. In general, bacteria detection methods require pretreatment using reagents, however, DEPIM method does not require pretreatment because it uses only electrical phenomenon. In addition, detection time of DEPIM method is relatively quicker comparison to other methods in the same reason. Sensitivity and selectivity is also compare favorably with other methods by using improved EPA-DEPIM and antigen combined DEPIM method, respectively.

The first part of this research is basic principle of DEPIM method. In the DEPIM method, bacteria are trapped on a micro-electrode array by positive DEP. The trapped bacteria are electrically connected to the electrode and possess electrical impedance depending on their dielectric properties as well as their geometric form in the electrode array. By monitoring the transient variation of the circuit impedance, it is possible to detect the bacteria and quantitatively evaluate their concentration in suspension. By utilizing DEP, it is possible to enrich the bacterial population on the microelectrode beyond that in bulk, realizing highly sensitive detection of bacteria suspended in the aqueous medium. Quantitativity of DEPIM method is investigated by considering experimental results and model of bacteria trap by DEP onto the microelectrode.

The next part is improvement of DEPIM method to realize selective detection of viable and nonviable bacteria without using any reagents. Selective DEPIM inspection of viable and nonviable bacteria may also be possible if dielectric properties of viable and nonviable bacteria are so different from each other that the target cell population can be selectively enriched by making use of the positive DEP effect. It is well known that electrical conductivity of inner bacteria decreases with losing the viability. It suggests that differences in the dielectric properties of cells result in DEP force variations that can be utilized for selective cell manipulation. In this part, selective DEPIM inspection of viable bacteria from a mix of viable and nonviable bacteria was examined.

The third part is development of rapid oral bacteria detection device utilizing DEPIM method. A sample obtained from the oral cavity may include saliva that contains a large amount of electrolytic ions. In general, the positive DEP force becomes weak in a suspension medium with higher electrical conductivity. In order to realize DEPIM-based oral bacteria inspection, special attention was paid to the influence of

suspension conductivity as well as electric field frequency on the DEP bacteria trapping process. The DEP condition was optimized for oral bacteria detection and a hand held DEPIM apparatus was newly designed and developed, aiming at the practical application of DEPIM for the rapid and automated inspection of oral bacteria in hospitals or clinics.

The forth part is improvement of sensitivity of DEPIM method by bacterial concentration. It includes method to improve DEP trapping efficiency of DEPIM by combining negative DEP-based concentration of bacteria. Finite element method (FEM) simulations of bacteria motion in the DEPIM fluid channel is employed in order to clarify if negative DEP-based concentration could improve DEP trapping efficiency of DEPIM. Experimental results are presented and compared with the simulation results to discuss if negative DEP-based concentration can improve sensitivity of DEPIM method.

The whole thesis is composed of six chapters:

Chapter 1 gives background as well as some basic introduction and applications of dielectrophoresis (DEP).

In chapter two, the principle of DEP and DEPIM method have been described.

In chapter three, experimental set-up of DEPIM, experimental results, and consideration on quantitative detection of DEPIM methods have been described.

In chapter four, selective detection of viable and non-viable bacteria using DEPIM method based on their difference of dielectric property has been described.

In chapter five, development of oral bacteria detection device utilizing DEPIM method has been shown.

In chapter six, improvement of sensitivity of DEPIM method utilizing concentration based on negative DEP phenomenon has been described.

In chapter seven, it has been summarized of this study.

論文調査の要旨

う蝕（虫歯）と並んで口腔の 2 大疾患の 1 つである歯周病は、歯周病菌による感染症であり、歯周病予防のためには歯周病菌の迅速な検出が必要である。また、食品衛生管理などの分野でも細菌検出技術に関する同様のニーズが存在する。これまでも電気的な現象を利用して細菌を検出する方法として、コールターカウンターやインピーダンス法などが実用化されており、検出の迅速化・簡易化などの点で大きなメリットがある。

著者は、誘電泳動現象と電気インピーダンス計測を組み合わせた新しい電氣的細菌検出法である誘電泳動インピーダンス計測 (Dielectrophoretic Impedance Measurement, DEPIM) 法の提案と口腔内細菌検出への応用を目的として、

大腸菌の定量検出、生菌・死菌の選択的検出法の提案と実証、高導電率サンプルに適用するための最適電界周波数の決定法、負の誘電泳動による細菌濃縮を応用した高感度化法の提案と実証に関する一連の研究を行い、多くの新しい知見を得ている。本論文はそれらの成果をまとめたもので、次の諸点で評価できる。

第一に、大腸菌をサンプルとして DEPIM 法による細菌検出実験を行い、細菌懸濁濃度 10^5 - 10^7 個/ml の範囲内で定量的な細菌検出が 10 分以内で可能であることを明らかにしている。

第二に、細菌の誘電特性がその活性度に依存することを利用した DEPIM 法による生菌・死菌の選択的検出技術の原理を新たに提案し実験によりその有効性を実証している。

第三に、DEPIM 法を口腔内細菌検出技術として応用する際に問題となる高導電率唾液サンプルによる誘電泳動力低下を抑制するために、誘電泳動に用いる高周波電界の周波数を最適化する手法を提案し、理論と実験の両面でその有効性を明らかにしている。更に、同結果に基づき、医療現場で口腔内細菌を簡易かつ迅速に検出可能な DEPIM 装置のプロトタイプを開発している。

第四に、負の誘電泳動を利用した細菌濃縮を応用した DEPIM 法の高感度化を提案し、数値計算による理論解析と実験の両面でその有効性を明らかにしている。

以上要するに、新しい電氣的細菌検出法である DEPIM 法の原理確立と口腔内細菌検出応用を目的として、大腸菌の定量検出、細菌の誘電特性がその活性度に依存することを利用した生菌・死菌の選択的検出法の提案と実証、高導電率サンプルに適用可能とするための最適電界周波数決定法の提案と実証、負の誘電泳動による細菌濃縮を応用した高感度化法の提案と実証を行ったもので、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 井 智 弘
 学位記番号 シ情 博甲第 469 号 (理学)
 学位授与の日付 平成 24 年 4 月 30 日
 学位論文題名 Combinatorial Properties on Strings and
 Their Applications
 (文字列の組合せ的性質とその応用)

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 稲 永 俊 介

論文内容の要旨

人類によって創出されるデータの量が爆発的に増大している。氾濫するデータの多くは、定まった形式をもたないいわゆる非定型データであるため、表形式などの定型データを対象に発展してきた従来のデータベース技術では十分に対応できない。非定型データは、明示的な構造をもたないが、何らかの記号やイベント等の連鎖とみなすことができる。本論文では、これを文字列(string)とよぶ。文字列は最も基本的なデータの形態であり、文字列処理技術は計算機科学の様々な分野において最も重要な基盤技術の一つである。

文字列に関わる問題は、素朴なアルゴリズムを適用すると計算量が組合せ的に増大することが多い。そこで、文字列の組合せ的性質に着目し、それに基づいて効率的アルゴリズムを開発する方法がとられてきた。たとえば、古典的な文字列照合問題では、パターンのもつ周期性に着目し、パターンからボーダ配列とよばれるデータ構造を予め構築しておくことにより、任意のテキストに対してテキスト長の線形時間で文字列照合を行うことができる。また、テキストの部分文字列全体の集合上で同値関係を定義し、その同値関係に基づいてテキストから接尾辞木や接尾辞配列などのデータ構造を予め構築しておくことにより、任意のパターンに対してパターン長の線形時間で文字列照合を行うことができる。これらのデータ構造は、目的とする文字列処理に必要な情報を凝縮したものである。したがって、これらデータ構造のもつ組合せ的性質の究明は文字列処理のさらなる効率化に寄与するものと期待できる。そこで、本論文では文字列処理に用いられるデータ構造に関する逆問題と列挙問題に取り組んだ。

文字列データ構造における逆問題とは、データ構造が与えられたときに、そのデータ構造をもつ文字列を求める問題であり、列挙問題とはある条件が与えられたときに、条件に合う文字列あるいはデータ構造を過不足なく列挙する問題である。逆問題と列挙問題の解決は、データ構造と文字列を対応付ける必要十分条件を解明することに繋がり、2002年にFranekらがボーダ配列の逆問題を解決して以来、様々なデータ構造に対する逆問題と列挙問題が盛んに研究されている。本研究では、(A)パラメタ化ボーダ配列の逆問題/列挙問題、(B)回文構造の逆問題、(C)接尾辞木の逆問題/列挙問題の三つに取り組む、以下に述べる研究成果をあげている。

(A)のパラメタ化文字列照合とは、アルファベット上の置換を許容した文字列照合の一般化であり、ソフトウェアのメンテナンスや盗作検知、RNAの構造解析など幅広く応用できる。パラメタ化ボーダ配列とは、パターンを前処理することでパラメタ化文字列照合問題を効率的に解くアルゴリズムにおいて核となるデータ構造である。本研究では、パラメタ化ボーダ配列の逆問題と列挙問題に初めて効率的な解を与えた。また、ここで得られたパラメタ化文字列

の組合せ的性質を応用し、パラメタ化接尾辞配列とパラメタ化最長共通接頭辞配列を構築する効率的アルゴリズムを提案し、計算機実験により従来手法に比べ最大で数百倍高速に動作することを示した。パラメタ化接尾辞配列およびパラメタ化最長接頭辞配列は、テキストを前処理することでパラメタ化文字列照合問題を効率的に解くアルゴリズムにおいて核となるデータ構造である。

(B)では回文構造の逆問題に取り組む線形時間アルゴリズムを提案した。また、共通の回文構造をもつ文字列集合において成り立つ特性を究明し、アルファベットサイズが3以下の場合、共通の回文構造をもつ文字列同士はパラメタ化照合するという興味深い知見を得た。さらに、この研究から、回文構造の一致によって照合を定義する回文照合問題の着想を得て、回文照合を線形時間で解くアルゴリズムを提案した。RNA配列において回文をなす部分は相補的結合によってヘアピン状の三次元構造を形成するため、回文照合は三次元構造が類似したRNAの発見に応用できる。

(C)では、10年間の未解決問題である接尾辞木の逆問題と列挙問題に取り組んだ。すなわち、根付き順序木 T と T の内部ノード上の遷移関数 f が入力として与えられ、入力の木と同型の接尾辞木をもつ文字列を一つ求める問題(逆問題)およびそのような文字列を全て列挙する問題(列挙問題)に取り組んだ。素朴な解法として各辺に対応する文字列ラベルを適切に推測する方法が考えられるが、特に葉ノードに向かう辺の文字列ラベルはその長さすら定まっていないため、可能な対応付けの数が指数的に爆発し非常な困難を伴う。本論文では、入力として与えられる順序木を変形して得られるグラフからオイラー閉路を構成する手続きによって、入力と同型の接尾辞木をもつ文字列が計算できることを明らかにした。さらに、アルファベットサイズが2以下の場合に、接尾辞木の逆問題と列挙問題をそれぞれ入力サイズの線形時間と出力サイズの線形時間で解くアルゴリズムを提案した。

論文調査の要旨

情報爆発時代と呼ばれ、大量・非定型・不均質という特徴をもつ機械可読データが氾濫している。定型データを対象に発展してきた従来のデータベース技術は、これらのデータをうまく扱えない。非定型データは、明示的な構造をもたないが、何らかの記号やイベント等の連鎖、すなわち、文字列(string)と捉えることができる。

文字列に関わる問題は、素朴なアルゴリズムを適用すると計算量が組合せ的に増大することが多い。そこで、文字列の組合せ的性質に基づいたデータ構造(文字列データ構造)を導入し、それをういた効率的アルゴリズムが開発されてきた。たとえば、古典的な文字列照合問題では、パターンの周期性に基づくデータ構造であるボーダ配列を予め構築することで、任意のテキストに対してテキスト長の

線形時間で文字列照合を行うことができる。また、テキストの部分文字列全体の集合上の同値関係に基づいたデータ構造である接尾辞木（または接尾辞配列）を予め構築することで、任意のパターンに対してパターン長の線形時間で文字列照合を行うことができる。これらの文字列データ構造は、目的とする文字列処理に必要な情報を凝縮したものであり、その組合せ的性質の究明は文字列処理のさらなる効率化に寄与するものと期待できる。

本研究は、文字列データ構造として(1)接尾辞木、(2)パラメタ化ボーダ配列、(3)回文構造の三つを取り上げ逆問題および列挙問題に取り組んだもので、次の点で評価できる。

第一に、10年間未解決問題であった接尾辞木の逆問題と列挙問題に取り組んでいる。すなわち、内部節点上の遷移関数が付与された根付き順序木が入力として与えられたとき、入力の木と同型の接尾辞木をもつ文字列を一つ求める問題（逆問題）およびそのような文字列を全て列挙する問題（列挙問題）に取り組んでいる。素朴な解法として各辺に対応する文字列ラベルを推測する方法が考えられるが、特に葉に向かう辺の文字列ラベルはその長さすら定まっていないため、可能な対応付けの数が指数的に爆発する。本論文では、入力順序木を変形して得られるグラフからオイラー閉路を構成する手続きによって入力と同型の接尾辞木をもつ文字列が計算できることを明らかにしている。また、アルファベットサイズが 2 以下の場合に接尾辞木の逆問題と列挙問題を、それぞれ、入力サイズの線形時間と出力サイズの線形時間で解くアルゴリズムを開発している。すなわち、本研究成果は、10年間の未解決問題に取り組む、特殊な場合に対する効率的解を与えるとともに、一般の場合について解決の端緒となる知見を与えたもので、高く評価できる。

第二に、パラメタ化文字列照合問題のためのデータ構造であるパラメタ化ボーダ配列について逆問題と列挙問題に取り組んでいる。パラメタ化文字列照合問題とは、アルファベット上の置換を許容した文字列照合の一般化であり、ソフトウェアメンテナンスや盗作検知、RNA の構造解析など幅広く応用できる。本研究では、パラメタ化ボーダ配列の逆問題と列挙問題に対し効率的アルゴリズムを開発している。また、その過程で明らかになったパラメタ化文字列の組合せ的性質を活用し、パラメタ化接尾辞配列とパラメタ化最長共通接頭辞配列を構築する実用的アルゴリズムを案出し、計算機実験により従来手法に比べ最大で数百倍高速に動作することを示している。これらの研究成果は、パラメタ化照合アルゴリズムの実用化を大きく前進させた研究として高く評価できる。

第三に、回文構造の逆問題に取り組んでいる。回文構造は文字列に関する重要な組合せ的性質の一つである。RNA 配列において回文をなす部分は相補的結合によってヘアピン状の 3 次元構造を形成するため、回文照合は 3 次元構

造が類似した RNA の検出に応用できる。本研究では、回文構造の逆問題を解く線形時間アルゴリズムを考案している。また、共通の回文構造をもつ文字列集合において成り立つ特性を示し、アルファベットサイズが 3 以下の場合、共通の回文構造をもつ文字列同士はパラメタ化照合するという興味深い知見を得ている。さらに、この研究から、回文構造の一致によって照合を定義する回文照合問題の着想を得て、線形時間回文照合アルゴリズムを開発している。このように、回文構造およびパラメタ化照合をめぐる文字列の組合せ論分野における貢献は極めて大きい。

以上要するに本研究は、文字列データ構造の逆問題と列挙問題に対する効率的アルゴリズムを開発するとともに、文字列データ構造のもつ組合せ的性質を究明したもので、情報科学に寄与する所が大きい。よって、本論文は博士（理学）の学位論文に値するものと認める。

氏 名 EHAB MAHMOUD MOHAMED MAHMOUD
学位記番号 シ情 博甲第 470 号 (工学)
学位授与の日付 平成 24 年 4 月 30 日
学位論文題名 MIMO BASED WIRELESS BACKHAUL NETWORKS (MIMO を用いた無線バックホールネットワーク)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 古 川 浩
(副 査) " 准教授 藤 崎 清 孝
" " " 實 松 豊
" " " 牟 田 修

論文内容の要旨

Wireless backhaul has received much attention as an enabler of future broadband mobile communication systems because it can reduce deployment cost of small-cells, an essential part of high capacity system. However, several challenges remain in allowing wireless backhaul networks to match the throughput and delay guarantees of wired backhuls. Higher throughput and lower delay are appreciated for wireless backhaul networks to sustain the increasing proliferation in multimedia transmissions. This study concerns about enhancing the performance of wireless backhaul networks through using MIMO. MIMO robust performance against interference and noise gives us a greater benefit when it is adopted as a wireless interface to wireless backhaul in which interference highly affects the network performance. Also, a low complexity with low power consumption MIMO transmission scheme is needed in order

to design a high speed with low power consumption wireless backhaul.

In the first part of the study, we improve the network performance through utilizing MIMO-OFDM (IEEE 802.11n standard) as a wireless interface for the wireless backhaul nodes. After proving the effectiveness of using MIMO as a wireless interface for wireless backhaul, we further improve the performance of this MIMO-backhaul using the highly efficient Intermittent Periodic Transmit (IPT) forwarding protocol. IPT is a packet forwarding protocol with a more efficient relay performance than conventional method in which packets are transmitted continuously from the source nodes. Dual Channel-IPT (DCH-IPT) is also proposed as a packet forwarding protocol suitable for the proposed MIMO based wireless backhaul for further performance enhancements. As a result of this study, we proved that MIMO based wireless backhaul has a higher throughput, lower average delay and lower packet loss rate than the SISO based one even if they operated under the same transmission rate and same bandwidth.

In the second part of this study, we concern about enhancing the wireless interface of the proposed MIMO-backhaul, to overcome the drawbacks of the MIMO-OFDM (IEEE 802.11n) interface through introducing the MIMO-Constant Envelope Modulation (CEM). One of the major disadvantages of OFDM is the high peak to average power ratio (PAPR) transmitted signal which requires high power consumption analog devices especially for RF power amplifier (PA) and high resolution analog to digital converter (ADC). All these drawbacks prevent OFDM from enabling a scalable design when it is extended to MIMO due to hardware complexity and power consumption, which limits the throughput of the resulting wireless backhaul. In MIMO-CEM, we suggest using Constant Envelope Modulation (CEM) as a method to improve power-efficiency at PA, using non-linear PA on the transmitter side, and reduce power consumption at ADC, using low resolution ADC on the receiver side. We suggest using 1-bit ADC operated at IF sampling as CEM default operation. Consequently, there will be a great reduction in power consumption and hardware complexity. Therefore, high MIMO branches can be applied to the CEM system resulting in power efficient with high throughput wireless backhaul nodes. Due to the 1-bit ADC receiver, MIMO-CEM channel estimation is considered as one of the major challenges toward its real application. In this study, as a solution to channel estimation problem in MIMO-CEM, we propose an adaptive MIMO-CEM channel estimation scheme where

iterative adaptive channel estimation is carried out to minimize the error between the received preamble signal and the replicated one. We also prove that Code Division Multiplexing (CDM) preambles transmission is effective in estimating MIMO-CEM channel parameters in presence of large quantization noise. Although wireless backhaul channel conditions are theoretically considered as static and quasi-static, it suffers from some channel fluctuations in real applications due to some impairments result from people motion around nodes. Therefore, Decision Directed Channel Estimation (DDCE), using the proposed CDM based adaptive channel estimator, is also proposed to track MIMO-CEM channel in dynamic channel conditions with high Doppler frequencies and prove the effectiveness of MIMO-CEM in time varying channel conditions. As a result of this study, we proved the effectiveness of the proposed channel estimator under different channel scenarios using MSK and GMSK frequency modulation and different ADC resolutions.

In conclusion, I expect that this study will contribute in greatly enhancing wireless backhaul performance through adopting MIMO transmission resulting in high throughput with minimum delay wireless backhaul. In addition, I expect that the proposed MIMO-CEM will contribute in solving the high complexity and power hungry problems of the wireless backhaul if it is used instead of the MIMO-OFDM interface, which further contributes in launching ultra-high speed wireless backhaul.

論文調査の要旨

無線通信システムのブロードバンド化は、基地局の守備範囲を減少させ（スモールセル化）、その結果、必要な基地局数を増加させ、システムの構築費用を増大させる。スモールセル基地局の敷設コスト削減のため、基地局を無線で多段中継接続する手法が検討されている。当該無線中継網は、通称、無線バックホール網と呼ばれている。無線バックホール網は、複数の無線中継装置が互いに無線中継回線で接続されることによって形成される。各無線中継回線の伝送性能が高ければ高いほど、無線バックホール網の性能は向上する。本論文では、無線中継回線に MIMO (Multiple-Input Multiple-Output、送受信共に複数のアンテナを用いることで、同一時刻、同一周波数に異なる情報を伝送可能とする無線伝送技術) を適用することで、無線バックホール網の性能を向上させた。

まず著者は、MIMO が適用された標準的無線通信規格である IEEE802.11n を無線中継回線に採用した場合の無線バックホール網のシステム容量を調べ、SISO (Single-Input Single-Output、送受信共に一本のアンテナを用いる無線伝送技術) との対比の上で、MIMO 適用の効果が得られる条

件を調べた。その結果、単位周波数あたりの伝送速度は高くても干渉に弱い 64QAM(Quadrature Amplitude Modulation)以上の多値変調伝送モードよりも、伝送速度は低くても干渉に強い 16QAM 以下の多値変調伝送モードを選択した方が、SISO に対する MIMO の適用効果が顕著に表れることを明らかにした。また、アンテナ間の相関が 0.75 以下に保たれていれば、完全無相関の場合からの性能劣化は僅少であることを明らかにした。

次に著者は、上下回線にそれぞれ異なる無線機を個別に割り当てる手法、DCH (Dual CHannel) 方式を提案し、IEEE802.11n を適用した無線バックホール網の性能を向上させた。MIMO による伝送速度向上の恩恵は、ペイロード部分のみに有効で、同期処理に必要なプリアンブル部分には作用しない。このため、MIMO によってフレーム全体に対する正味の信号の時間占有率が著しく低下する。そこで IEEE802.11n では、複数の部分フレームを結合させてペイロード長を拡大する手法、フレームアグリゲーションが適用される。しかし無線バックホール網において上下回線フレームが混在する状況下でフレームアグリゲーションを実行すると、一方の回線の部分フレームの伝送失敗による再送処理が、他方の回線の伝送のために障害され、これが中継伝送効率の低下を引き起こした。DCH 方式は、上下回線フレームをそれぞれ異なる無線機により分けて伝送することで同問題を解決し、その結果、高い伝送特性が達成できた。

更に著者は、無線バックホール網に適した MIMO 伝送方式として MIMO 定包絡線変調方式(MIMO-CEM, MIMO-Constant Envelope Modulation)に着目し、同変調方式のための適応伝送路推定方式を提案することで無線バックホール網の性能を向上させた。MIMO-CEM は MIMO と組み合わせられる変調方式として定包絡線変調を用いることを特徴とする。これにより、送信側では高い電力付加効率が得られる非線形パワーアンプの適用が可能となり、一方、受信側では簡易な構成で消費電力が低い 1 ビット ADC の適用が可能となる。そこで、1 ビット ADC の適用により振幅情報が失われた状態であっても高速かつ正確に伝送路を推定可能な適応伝送路推定アルゴリズムを提案し、従来の整合フィルタを用いる場合に比べて受信特性を大幅に改善した。

最後に著者は、前述の適応伝送路推定方式に改良を加え、伝送路が動的に変動する場合においても優れた受信特性を保障する動的適応伝送路推定方式を提案し、無線バックホール網の性能を向上させた。人の往来やドアの開閉等によって無線中継装置間の電波伝搬特性は変動する。そこで、各伝送フレームに含まれるプリアンブル部のみならず受信フレームの判定結果をも伝送路推定時の誤差計算に活用することで変動する伝送路へ高速に追従できるようにした。本適応伝送路推定方式によって伝搬路が動的に変動

する場合でも安定した無線バックホール網の運用が可能となった。

以上を要約すると本論文では、MIMO 適用による無線バックホール網の性能向上に関する検討を行い、IEEE802.11n を適用した場合には、MIMO 適用の効果が得られる条件の明確化と DCH 方式の提案により、一方、MIMO-CEM を適用した場合には、適応伝送路推定方式と動的適応伝送路推定方式の提案により無線バックホール網の性能が向上することを明らかにした。本研究成果は、高性能無線バックホールの実現に貢献し、ブロードバンド無線通信の発展に寄与するものである。よって、本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏 名 柳 壹 善
 学位記番号 シ情 博乙第 104 号(工学)
 学位授与の日付 平成 24 年 3 月 27 日
 学位論文題名 Design and analysis of mobile internet security protocol by using formal verification methodology
 (形式検証手法を用いたモバイルインターネットセキュリティプロトコルの設計と分析)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 櫻 井 幸 一
 (副 査) " " 古 川 浩
 " " " 高 木 剛
 " " 准教授 堀 良 彰

論文内容の要旨

Due to the proliferation of wireless technologies and mobile devices, mobility management has gained considerable popularity, thus becoming an important function in networks. It consists of location management and handover management. While location management plays a role of tracking and updating mobile nodes' current location, handover management maintains mobile nodes' active connections whenever they change their location. Mobility management can be implemented at different *Open Systems Interconnection*. Compared to others layers, the network layer can provide essential mobility management because address change happens at itself. Also, its mobility management is transparent to upper layers, *i.e.*, application programs need not be modified, and is independent on the lower layers. In this layer, there are two representative mobility management solutions, *Mobile Internet Protocol Version 4* (MIPv4) and *Mobile Internet Protocol Version 6* (MIPv6). It is highly anticipated that MIPv6 will be widely deployed in the near

future due to the rapid exhaustion of IPv4 address space.

With such anticipation, we study securing mobile IP networks, *i.e.*, network layer mobility management, while focusing on MIPv6 and its fast handover extensions. Mobile IP networks, if not protected, are exposed to various attacks. Especially, malicious intruders can try to deceive involved nodes into redirecting traffics at their will by registering fake location information. In addition, there is no global security infrastructure or certificate authority in those networks. Thus, in mobile IP networks, it is necessary to authenticate mobile nodes and their location without depending on any security infrastructure.

On the other hand, we rationalize the analysis and design of security protocols for mobile IP networks by making use of the symbolic approach, which is one of major formal security analysis techniques. This approach defines the security properties of a target protocol as a set of abstract symbols, and then processes them with a formal logic method or an automatic tool to verify the protocol's formal correctness. Compared to the computational approach, its verification procedure is not complex and can be well automated. Especially, we adopt BAN logic and SVO logic from various methods based on the symbolic approach. BAN logic is a simple, easy, and practical modal logic, which has become highly popular and influential while successfully discovering security flaws in various authentication protocols. SVO logic takes the advantages of the BAN and BAN-like logics by seamlessly unifying them, thereby achieving both the more expressiveness and broader application scope in addition to the solid theoretical foundation.

For this study, we first analyze the important security properties and attacks in MIPv6, and present the nine propositions and three definitions about MIPv6 security. And then, we explore the existing security protocols for MIPv6 fast handover extensions while proposing the new protocols which improve the previous ones' drawbacks. During the analysis and design, BAN logic is used to verify the security protocols, and then the new theorems are obtained by applying the propositions and definitions to the verification results. The obtained theorems allow us to check if their protocol achieves the security properties and dependability against possible attacks.

Moreover, we study the formal analysis on the security protocols for MIPv6 and its extensions while focusing on modal logic. MIPv6 security protocols have the following unique security features. First, a home address is used as a certificate to authenticate the public key of its owner. Second, to prevent the redirect attacks, a mobile node is checked if it

exists at its argued address. To our best knowledge, there has been lack of the formal verification method to correctly verify the MIPv6 security protocols while considering these security features. Motivated by this, we enhance SVO logic by defining the new notations and axioms to reason about the new security features. While the new notations are added for expressing address ownership and relation between an addresses and a public key, the new axioms are presented to reason about verifying address based public keys, address ownership, and presence at a claimed address. From the formal analysis on the four typical MIPv6 security protocols, it is shown that the enhanced logic performs more exact and thorough verification than BAN logic does.

Even though this thesis focuses on MIPv6, the introduced security technologies can be applied to other mobility management solutions. Note that YHSP is adopted to improve MISP, which is the link layer security protocol. More importantly, the enhanced SVO can be utilized for formally analyzing security protocols that use address based public key methods and location verification.

論文調査の要旨

無線通信技術とモバイル機器の発達により、ネットワークは移動性を提供し機器の移動時においても継続した通信を提供することが期待されている。アプリケーションやデータリンクに依存せず移動性を確保するにはネットワーク層プロトコルに移動性を備える必要がある。現在のインターネットで用いられているインターネットプロトコル(IP)は、IPアドレスがノードの識別子であると同時に、ネットワーク上の位置を意味している。このため、移動ノードが別のネットワークにつながるとIPアドレスが変更され通信が途絶する。この対策としてモバイルIP(MIP)では、移動ノード毎に不変なホームIPアドレスを定めると同時に、移動ノードが接続に使う気付IPアドレスとのマッピングを実施する移動管理により移動性を実現している。

本研究では、近い将来IPv4のアドレスの枯渇が予期されるため、重要性が増しているIPv6における移動性を提供するモバイルIPv6(MIPv6)プロトコルの安全性確保技術に焦点をあてる。MIPv4の移動ノードに関するトラヒックはすべてホームエージェントを経由する。これに対し、MIPv6においては、移動ノードから通信相手先ノードへ直接送るため、より脅威ある攻撃が可能となり、安全性対策が要求される。暗号技術を応用しその安全性を強化したセキュアモバイルインターネットプロトコルも、活発に研究されその一部は規格化されている。しかし、安全性の評価が十分ではなく、多くの提案方式に対して脆弱性が指摘され、逐次改良しては攻撃されるという状況にある。このよ

うな背景の下、本研究ではモバイルインターネットプロトコルの設計と解析のために形式的手法を用いたものであり、以下の三つの点で評価できる。

第一に、形式的手法を用いて既存の MIPv6 プロトコルの脆弱性を発見した。MIPv6 では、アドレスの改ざんを防ぐために、一方性関数の出力値 CGA (Cryptographically Generated Address) を利用する方式が IETF でも推奨されている。著者はこの方式に対して BAN (Burrows-Abadi-Needham) 論理を使って、サービス不能攻撃や再送攻撃が可能であることを発見し、CGA だけでは安全な方式の設計が困難であることを明らかにした。

第二に、既存方式の脆弱性を克服する改良方式を提案した。この改良のために著者は認証認可記録 (AAA: Authentication, Authorization, and Accounting) と呼ばれる基盤に注目した。AAA 基盤だけを用いた MIPv6 方式はすでに提案されていたが、安全性の点で完全ではないことも指摘されている。これに対して、著者は AAA 基盤を CGA と組み合わせる手法を提案し、一貫性、秘匿性、認証、位置情報検証を提供し、モバイルノードのハンドオーバー鍵と気付アドレスを強固に関係づける方式を設計した。さらに、成りすましによるメッセージ改変、再送攻撃、サービス不能攻撃、リダイレクト攻撃への耐性を、BAN 論理を用いて検証し、提案方式が確かに既存方式の脆弱性を克服していることを数理論的に示した。

第三に、MIPv6 セキュリティプロトコルの検証のために、新たな論理を開発した。MIPv6 プロトコルでは、アドレス所有者とその公開鍵との対応が安全性の基盤となる。しかし、既存の BAN 論理などでは、この点を検証できないという課題がある。著者は、それらの対応を表現する新たな記法と公理を、既存の SVO (Syverson and van Oorschot) 論理に導入することでこの検証を可能にした。著者は、この拡張した論理を用いて、4 種の MIPv6 プロトコルの形式的安全性評価を実施し、より厳密に安全性を検証できることを確かめた。

以上要するに、本論文は、移動性を提供する無線ネットワークを実現するために形式的手法を用いて既存プロトコルの脆弱性を発見し、安全なプロトコルの設計を行い、かつ、それらの安全性を形式的手法により検証したものであり、情報工学上寄与するところが大きい。よって本論文は、本学府の博士課程を修了し、学位を授与される者の論文と同等以上の内容を有し、博士 (工学) の学位論文に値すると認める。