

## 学位論文審査報告

沖野, 健太

上田, 俊

郝, 東

柴田, 憲治

他

<https://hdl.handle.net/2324/1564289>

---

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 19 (1), pp.13-39, 2014-01-24. 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 沖野 健太  
学位記番号 シ情 博甲第 504 号 (工学)  
学位授与の日付 平成 25 年 6 月 30 日  
学位論文題名 移動無線通信におけるシステム容量拡大に関する検討

### 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、モバイルデータトラフィックは急激に増加しており、モバイル通信システムの大容量化は喫緊の課題である。誤り訂正符号などの無線伝送技術の高度化による大容量化は、既に実用域において理論上の上限であるシャノン限界に近づきつつあり、これ以上の大幅な改善を期待することはできない。さらなるシステム容量の拡大には、新たな技術の開拓が必要である。この要請に応える技術として、近年、複数のアンテナ素子を用いて通信を行うマルチアンテナ技術と、送信出力の異なる基地局をエリア内に混在させる異出力基地局ネットワークが注目されている。マルチアンテナ技術では、無線伝送方式の変更無しに、もしくは、小さな変更のみで、システム容量をアンテナ素子数に応じて拡大させることが出来る。異出力基地局ネットワークでは、高トラフィックのエリアに低出力基地局を配置することによって、高出力基地局によるサービスエリアの広域性を維持しつつ、低出力基地局によってシステム容量を拡大させることが出来る。本論文では、モバイル通信システムの大容量化に資するこれら 2 つの技術に着目し、以下の検討を行った。

まず本論文では、送信処理にマルチアンテナ技術を適用するモバイル通信システムにおいて、高速移動端末の通信特性を向上させることで大容量化を目指した。マルチアンテナ技術では、伝搬路状態に基づき、各アンテナ素子で受信される信号の位相と振幅（アレーウェイト）を制御する。送信マルチアンテナ技術では、過去の伝搬路状態に基づいて送信アレーウェイトを決定するため、端末が高速に移動すると、過去と現在の伝搬路状態の相関が低下し特性が劣化する。そこで本研究では第 1 に、端末の受信にもマルチアンテナ技術を適用することで基地局の送信アレーウェイトの精度劣化を補償する手法について検討を行い、計算機シミュレーションとフィールド試験の両方により

改善効果を確認した。本研究では第 2 に、端末が高速に移動する場合の送信マルチアンテナ技術の特性向上に資する技術として、時間変動する伝搬路の高精度予測について検討を行った。現在の伝搬路状態を予測して送信アレーウェイトを決定すれば、端末が高速に移動する場合の特性劣化を抑制することができる。伝搬路予測技術は、近年のモバイル通信システムのマルチアンテナ化に伴い新たな手法が研究されており、基地局と端末の各アンテナ素子間の伝搬路をそれぞれ独立に予測するのではなく、仮のアレーウェイト（伝搬路予測用アレーウェイト）を固定的に設定し、マルチアンテナ素子間の伝搬路を重み付け合成したのに対して予測を行うことを特徴とする。なぜなら、伝搬路は多数の反射・散乱波によって構成されており、直接予測しようとするところらが均一に合成されることによって伝搬路が複雑に変動し、高精度な予測が困難となるからである。伝搬路予測用アレーウェイトでマルチアンテナ素子間の伝搬路を重み付け合成すると、複数の反射・散乱波が抑制されることで伝搬路変動の複雑さが軽減される。本研究では、伝搬路予測用アレーウェイトを固定的に設定するのではなく、電波の放射・到来方向に対して適応的に設定することで伝搬路の予測精度を向上させる手法を提案した。リンクレベル計算機シミュレーションによりその効果を確認した。

最後に本論文では、異出力基地局ネットワークにおける下りリンク通信の大容量化について検討した。モバイルデータトラフィックに対して周波数リソースを十分に確保できない場合、高出力セルのトラフィックの多い領域に低出力基地局を追加配置し、同一の時間・周波数リソースを高出力セルと低出力セルの両方に割り当てると、低出力セルは高出力セルからの強い干渉波に晒されるものの、低出力セルの分だけシステム容量を拡大させることが出来る。高出力セルと低出力セルのセル選択基準の設定、すなわちセル端の決定手法によっては、さらなる改善が期待出来る。しかし、特に希望波受信電力が低下するセル端において干渉の影響が顕著となる。そこで本研究では、セル端の決定手法の考察と併せて、低出力セルが高出力セルから受ける干渉波を抑制する手法の検討を行い、両手法の相乗効果によるシステム全体としてみた容量拡大について検討した。システムレベル計算機シミュレーションにより大容量化が達成出来ることを確認した。

以上、要するに本論文は、マルチアンテナ技術による容量改善、特に高速移動端末に対する伝送特性を改善することによる容量改善と、異出力基地局ネットワークによる容量改善について検討を行い、前者については基地局と端末におけるマルチアンテナ技術の併用と高精度な伝搬路変動予測手法によって改善効果を得て、後者については異出力セル間のセル端決定手法と干渉抑制技術によって改善効果を得た。これらの成果は、トラフィック爆発問題が深

刻な社会問題となりつつあるモバイル通信の世界に一石を投じるものである。

### 論文調査の要旨

近年、モバイルデータトラフィックは急激に増加しており、モバイル通信システムの高容量化は喫緊の課題である。誤り訂正符号などの無線伝送技術の高度化による高容量化については、既に実用域において理論上の上限であるシャノン限界に近い性能を有する誤り訂正符号方式が出現しており、これ以上の大幅な改善を期待することはできない。さらなるシステム容量の増大には、新たな技術の開拓が必要である。この要請に応える技術として、近年、複数のアンテナ素子を用いて通信を行うマルチアンテナ技術と、特徴の異なる基地局をエリア内に混在させる異種セルサイズネットワークが注目されている。マルチアンテナ技術では、無線伝送方式の変更無しに、もしくは、小さな変更のみで、システム容量をアンテナ素子数に応じて増大させることが出来る。異種セルサイズネットワークでは、高トラフィックのエリアにマイクロセルを配置することによって、マクロセルによるサービスエリアの広域性を維持しつつ、周波数利用効率の高いマイクロセルによってシステム容量を増大させることが出来る。本論文は、モバイル通信システムの高容量化を達成するべく、マルチアンテナ技術と異種セルサイズネットワークに関連した種々の検討を行っており、以下の点で評価できる。

第一に、基地局が送信処理にマルチアンテナ技術を適用するモバイル通信システムにおいて、高速移動端末の受信性能を向上させることで高容量化を達成した点である。マルチアンテナ技術では、伝搬路状態に基づき各アンテナ素子の信号の位相と振幅（アレーウェイト）を制御する。上りリンクと下りリンクの通信を同一周波数で時分割して行う時分割復信システムでは、上下リンク間に伝搬路の可逆性が存在する。そのため、基地局が上りリンク受信のために決定したマルチアンテナの受信アレーウェイトを、下りリンクの送信アレーウェイトにも適用でき、マルチアンテナ技術による改善効果を基地局のみならず端末でも得ることができる。しかしながら、端末が高速に移動すると、上下リンクの通信時刻差による伝搬路変動が送信アレーウェイトの精度劣化を引き起こす。そこで本研究では、端末の受信にもマルチアンテナ技術を適用することで基地局の送信アレーウェイトの精度劣化を補償する手法について提案を行い、シミュレーションとフィールド試験の両方により改善効果を確認した。

第二に、時間変動する伝搬路の高精度予測手法を提案し、端末が高速に移動する場合の送信マルチアンテナ技術の特性を向上させることで高容量化を達成した点である。送信マルチアンテナ技術では、過去の伝搬路状態に基づいて送信アレーウェイトを決定する。端末が高速に移動すると、

過去と現在の伝搬路状態の相関が低下し特性が劣化する。したがって過去の伝搬路状態から現在の伝搬路状態を正確に予測することが重要となる。本研究では、伝搬路予測用アレーウェイトを固定的に設定するのではなく、電波の放射・到来方向に対して適応的に設定することで伝搬路の予測精度を向上させる手法を提案し、リンクレベルシミュレーションによりその効果を確認した。

第三に、異種セルサイズネットワークにおける下りリンク通信の高容量化を達成した点である。マクロセルのトラフィックの多い領域にマイクロセルを追加配置し、同一の時間・周波数リソースを両セルに割り当てるとセルサイズが小さいマイクロセルの分だけシステム容量を拡大させることができる。マクロセルとマイクロセルのセル選択基準の設定によっては、さらなる改善が期待できる。しかし、マイクロセル内の端末がマクロセル内の基地局からの強い干渉波に晒される。特に希望波受信電力が低下するセル端において干渉の影響が顕著となる。そこで本研究では、セル選択基準の決定手法の考察、ならびにマイクロセル内の端末がマクロセルの基地局から受ける干渉波を抑制する手法の検討を行い、両手法の相乗効果によるシステム全体としてみた容量拡大について検討した。システムレベルシミュレーションにより高容量化が達成できることを確認した。

以上、要するに本論文は、マルチアンテナ技術による容量改善、特に高速移動端末に対する伝送特性を改善することによる容量改善と、異種セルサイズネットワークによる容量改善について検討を行い、前者については基地局と端末におけるマルチアンテナ技術の併用と高精度な伝搬路変動予測手法によって改善効果を得て、後者については異種セル間のセル選択基準の決定手法と干渉抑制技術によって改善効果を得た。これらの成果は、深刻な社会問題となっているトラフィック爆発問題を解決する有効策を提供するものであり、知能システム学上、価値のある成果である。

氏 名 上田 俊  
 学位記番号 シ情 博甲第 505 号 (情報科学)  
 学位授与の日付 平成 25 年 7 月 31 日  
 学位論文題名 Computational Coalition Formation:  
 Compact Representation and  
 Constrained Matching  
 (提携形成における問題記述法と制約  
 付きマッチングに関する研究)

## 論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 横尾 真  
 (副 査) " " 長谷川 隆三  
 " " " 山下 雅史

## 論文内容の要旨

協力ゲーム理論は、複数のプレイヤーがどのように協力関係（提携）を形成し、提携内で得られた利得をどのように配分するかに関する理論である。協力ゲーム理論はフォン・ノイマン以来の伝統ある研究分野であり、近年のインターネットの発展により、その適用分野が拡大している。従来、協力ゲーム理論はミクロ経済学の一分野として研究が行われてきたが、既存の理論は問題の記述量、問題を解くための計算量に関する検討が不十分であった。例えば、既存の協力ゲーム理論では、問題を記述する際に、提携の利得を与える特性関数と呼ばれる抽象化された関数が存在することを前提としていた。ユーザーが大規模な問題を記述する際には特性関数を簡潔に記述する方法を与えることが必須となる。また、問題が抽象化された特性関数で与えられている場合には、望ましい提携の構成方法を求める問題（提携構造形成問題）や、望ましい利得の配分方法（協力ゲームの解概念）を求める問題を効率的に解く方法は存在しない。

本論文では、協力ゲームにおける問題の簡潔な記述方法を提案し、与えられた記述の元で最適な提携構造形成や解概念を求めるアルゴリズムを提案する。具体的には、提携の利得がプレイヤー間の組合せ最適化問題の解として与えられることを前提とした問題の記述方法や、プレイヤーの特性（タイプ）に着目した問題の記述方法を提案する。さらに、提携構造形成問題の特殊な場合であり、研修医配属や学校選択制等の重要な応用が存在する両方向マッチングに関して、従来から扱われていた上限制約に加えて、下限制約を満足するアルゴリズムを開発する。

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、伝統的な協力ゲーム理論のモデルと既存の簡潔表記法の概略を示す。第 3 章、第 4 章では、新たな簡潔表記法とアルゴリズムを提案し、既存の簡潔表記法との比較を行う。第 5 章、第 6 章では、既存の簡潔表記法を用いたアルゴリズムの改良を行う。第 7 章では、下限付きマッ

チングのためのアルゴリズムの提案を行う。最後に第 8 章で結論と今後の課題を述べる。

## 論文調査の要旨

協力ゲーム理論は、複数のプレイヤーがどのように協力関係（提携）を形成し、提携内で得られた利得をどのように配分するかに関する理論である。協力ゲーム理論はフォン・ノイマン以来の伝統ある研究分野であり、近年のインターネットの発展により、その適用分野が拡大している。従来、協力ゲーム理論はミクロ経済学の一分野として研究が行われてきたが、既存の理論は問題の記述量、問題を解くための計算量に関する検討が不十分であった。例えば、既存の協力ゲーム理論では、問題を記述する際に、提携の利得を与える特性関数と呼ばれる抽象化された関数が存在することを前提としていた。ユーザーが大規模な問題を記述する際には特性関数を簡潔に記述する方法を与えることが必須となる。また、問題が抽象化された特性関数で与えられている場合には、望ましい提携の構成方法を求める問題（提携構造形成問題）や、望ましい利得の配分方法（協力ゲームの解概念）を求める問題を効率的に解く方法は存在しない。本論文では、協力ゲームにおける問題の簡潔な記述方法、および簡潔な記述を活用した効率的なアルゴリズムを開発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、著者はプレイヤーを、例えばその能力により、いくつかのタイプに分類し、タイプを用いた特性関数の記述方法を提案している。プレイヤーの数が増加しても、タイプの数が一定であれば問題の記述量の増加はわずかであり、既存の方法と比較して指数オーダーの記述量の削減が可能となっている。また、著者は、タイプを用いて特性関数が記述されている場合に、協力ゲームの解概念および最適な提携構造を求めるアルゴリズムを開発しており、これらのアルゴリズムの計算量は、エージェント数に関して多項式時間となることを示している。

第二に、著者は特性関数の値がプレイヤー間の組合せ最適化問題の解として与えられる状況を対象とし、マルチエージェントシステムで広く用いられている問題の定式化方法である分散制約最適化問題に基づいた特性関数の記述方法を提案している。この特性関数の表現を用いた場合、単純にすべての可能な提携に関して特性関数の値を求めようとすると、NP 困難な問題を繰り返し解く必要が生じる。著者は、すべての提携の特性関数の値を求めることなく、準最適な提携構造を求める近似アルゴリズムを提案し、制約グラフの性質の特徴に基づく提案アルゴリズムの近似率を示している。

第三に、著者は提携構造形成問題の一例であり、研修医配属や研究室配属等の重要な応用が存在する両方向マッチングに関して、従来から扱われていた上限制約に加えて、

下限制約を満足するアルゴリズムを開発している。下限制約を満たすことは、例えば、研修医配属において離島の病院に一定数の研修医が配属されること、研究室配属において、各研究室に最低一名の学生が配属されること等を保証することに相当し、実用上、極めて重要であるにも関わらず、従来は適切なアルゴリズムが存在しなかった。著者の開発したアルゴリズムは九州大学工学部電気情報工学科での卒業研究配属において継続して用いられている。

以上要するに、本論文は協力ゲームにおける問題の簡潔な記述方法、およびそれを活用した協力ゲームに関する種々の問題を解く効率的なアルゴリズムを開発したものであり、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 郝 東  
 学位記番号 シ情 博甲第 506 号 (工学)  
 学位授与の日付 平成 25 年 7 月 31 日  
 学位論文題名 Analysis and Optimization of Future Generation Wireless Networks Based on Dynamic Game Theory  
 (動的ゲーム理論による次世代無線ネットワークの解析と最適化に関する研究)

論文調査委員

- (主 査) 九州大学 教授 横尾 真
- (副 査) " " 竹内 純一
- " " " 古川 浩

**論文内容の要旨**

次世代無線ネットワークは、コグニティブ無線ネットワークとも呼ばれ、複数種類の無線システムと動的な周波数アクセスの活用により、広帯域の通信をユーザーに提供する。次世代無線ネットワークでは、各ユーザーの補助を行う知的なエージェントが存在することが予想される。これらのエージェントは、ネットワーク環境と他のエージェントの行動を観測し、互いに影響しあう。次世代無線ネットワークのモデル化、解析及び最適化のために、このようなエージェントの相互作用の影響を解析することは重要な課題である。ゲーム理論は、相互作用を及ぼしあう複数の主体の振る舞いに関して研究する応用数学の一分野であり、上記の課題を扱える強力なツールである。次世代無線ネットワークに関するゲーム理論を用いた研究事例は多いが、エージェント間の長期的関係に着目した研究は数少ない。エージェント間の長期的関係を考慮するゲーム理論の一分野として、繰り返しゲームと微分ゲームがある。こ

れらは一回限りの静的なゲームとの対比により、動的ゲームと呼ばれる。

本研究では、動的ゲームに基づいて、次世代無線ネットワークに関する以下に示す種々の問題の解析を行う。(1) アプリケーションレイヤを対象に、実時間での周波数の価格付けの問題を微分ゲームを用いて解析し、ナッシュ均衡となる価格設定戦略を求める。(2) ネットワークレイヤを対象に、パケット転送の問題を繰り返しゲームを用いて解析し、サブゲーム完全均衡となる、選択的転送の戦略を求める。また、この結果を活用したセキュリティポリシーを提案する。(3) 物理レイヤを対象に、複数チャネルのコグニティブ無線ネットワークにおいて、一次ユーザになりすまして Denial-of-Service (DoS) 攻撃を行う攻撃者と、二次ユーザ間の相互作用を定和微分ゲームとして定式化し、それぞれのナッシュ均衡となる戦略を求める。この結果を用いて、二次ユーザは適切なチャンネルセンシング戦略を用いることにより、攻撃者が存在しても望ましいチャンネルの使用率を実現することが可能であることを示す。

**論文調査の要旨**

次世代無線ネットワークは、複数種類の無線システムと動的な周波数アクセスの活用により、広帯域の通信をユーザーに提供し、その具体的な実現形態の一つとしてコグニティブ無線ネットワークが存在する。次世代無線ネットワークでは、各ユーザーの補助を行う知的なエージェントが重要な構成要素の一つとなる。これらのエージェントは、ネットワーク環境と他のエージェントの行動を観測し互いに影響を与え合う。次世代無線ネットワークの適切なモデル化、解析及び最適化のために、このようなエージェントの相互作用の影響を明らかにすることは重要な課題である。

ゲーム理論は、相互作用を及ぼしあう複数の主体の振る舞いに関して研究する応用数学の一分野であり、上記の課題を扱える強力なツールである。次世代無線ネットワークに関するゲーム理論を用いた研究事例は多いが、エージェント間の長期的関係に着目した研究は数少ない。エージェント間の長期的関係を考慮するゲーム理論の一分野として、繰り返しゲームと微分ゲームがある。これらは一回限りの静的なゲームとの対比により、動的ゲームと呼ばれる。

本研究では、動的ゲームに基づいて、次世代無線ネットワークに関する種々の問題の解析を行い、ネットワーク設計における指針を与えることを目的としたものであり、以下の点で評価できる。

第一に、著者はアプリケーションレイヤを対象に、実時間での周波数の価格付けの問題を微分ゲームを用いて解析している。具体的には、一次ユーザと呼ばれる、多数のチャンネルの利用権を持つ利用者が、二次ユーザと呼ばれる小規模な需要を持つ利用者に対してチャンネルの利用権を譲渡する状況を対象として、複数の事業者が競争的に実時

間で価格設定を行う際に、互いに最適反応となる（ナッシュ均衡となる）価格設定戦略を求めている。

第二に、著者はネットワークレイヤを対象に、パケット転送の問題を繰り返しゲームを用いて解析している。具体的には、マルチホップワイヤレスネットワークにおいて、悪意を持つ複数のノードが選択的にパケットを廃棄する状況を想定し、悪意を持つノードが用いることが予想される選択的転送の戦略を求めている。また、この戦略が、ナッシュ均衡の条件を強化し、逐次的な意思決定の任意の時点で最適反応となることを意味するサブゲーム完全均衡を構成することを示している。さらに、この結果を活用したセキュリティポリシーを提案している。

第三に、著者は物理レイヤを対象に、複数チャネルのコグニティブ無線ネットワークにおいて、一次ユーザになりすまして Denial-of-Service (DoS) 攻撃を行う攻撃者と二次ユーザ間の相互作用を定和微分ゲームとして定式化し、それぞれのナッシュ均衡となる戦略を求めている。この結果を用いて、二次ユーザは適切なチャネルセンシング戦略を用いることにより、攻撃者が存在する場合であっても望ましいチャネルの使用率が実現可能であることを示している。

以上要するに、本論文は次世代無線ネットワークの物理レイヤ、ネットワークレイヤ、アプリケーションレイヤのそれぞれで生じる問題に関して、動的ゲームに基づく解析を行い、均衡で生じるユーザの行動を予測し、ネットワーク設計に利用可能な有益な知見を与えたものであり、情報学上寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値すると認める。

氏 名 柴田 憲治  
 学位記番号 シ情 博甲第 507 号 (工学)  
 学位授与の日付 平成 25 年 8 月 31 日  
 学位論文題名 (K,Na)NbO<sub>3</sub> 鉛フリー圧電薄膜の圧電定数向上に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 白谷 正治  
 (副 査) " " 岡田 龍雄  
 " " " 木須 隆暢

## 論文内容の要旨

圧力を電圧に変換し、電圧を圧力に変換する圧電効果を持つ圧電材料を薄く形成した圧電薄膜は、現在、デジタルカメラの手ぶれ検知、カーナビ、自動車のロール検知などに用いられている角速度センサや、圧電式インクジェットプリンタのヘッドなどに使用されている。また、今後は、

プロジェクター用 MEMS ミラーや小型振動発電機（エナジーハーベスター）などの新たな用途への展開も期待されている。現在、圧電薄膜にはチタン酸ジルコン酸鉛（Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>, PZT）という材料が使われている。この PZT 薄膜は鉛を高濃度に含有するため環境上問題視されつつも、特性的に代替可能な鉛フリー圧電薄膜は全く見出されていない状況であった。そのような中、筆者らは、鉛フリーの圧電材料としてニオブ酸カリウムナトリウム（(K,Na)NbO<sub>3</sub>, KNN）に注目して研究を進めており、製品にそのまま適用できる単結晶シリコン（Si）基板上に、世界で初めて圧電定数 100pm/V 以上という実用レベルの特性を実現した。本論文は、筆者らが進めてきた KNN 薄膜の圧電特性向上に関する研究成果を纏めたもので、以下の 7 章から構成されている。

第 1 章では、まず圧電材料および圧電薄膜分野の現状を述べ、本研究で鉛フリー圧電薄膜の開発に着手した背景を述べた。その後、鉛フリー圧電薄膜の材料として KNN を選定し、製膜方法としてスパッタ法を選定した経緯を述べ、最後に、本研究での目標と目標実現の方針を示した。

第 2 章では、KNN 薄膜の配向に注目し、配向と圧電定数の相関を調査した結果について述べている。KNN 薄膜の配向率評価に適した XRD 広域逆格子空間マップ測定を用いた新規配向率評価方法を提案し、この新規配向率評価方法で KNN 薄膜の正確な(001)配向率を算出した。その結果、KNN 薄膜は(001)配向率が高くなるに従い圧電定数が向上する傾向があることを見出した。

第 3 章では、KNN 薄膜の組成に注目し、組成制御および組成と圧電定数の相関について調査した結果を述べた。まず、Na/(K+Na)組成の制御を試み、ターゲットの Na/(K+Na)組成を変えるという比較的容易な方法で厳密に KNN 薄膜の Na/(K+Na)組成が制御できることが分かった。その後、Na/(K+Na)組成と圧電定数及び比誘電率の相関を調べた結果、Na/(K+Na)組成=0.55 付近の時、圧電定数と比誘電率の値が最も高くなることを明らかにした。

第 4 章では、KNN 薄膜の膜応力に注目し、膜応力制御および膜応力と圧電定数の相関について調べた結果について述べた。まず、スパッタ KNN 薄膜の膜応力が、①スパッタ製膜の最中に大きな圧縮応力が導入される工程と、②製膜後の冷却過程で KNN 薄膜と Si 基板の熱膨張係数の違いから導入される工程の 2 つで決まっていることを明確にした。続いて、スパッタ KNN 製膜において、製膜温度、(001)配向率、アニール温度、シード層挿入などで膜応力が制御できることを示した。最後に、膜応力と圧電定数の相関を調べた結果、膜が大きな圧縮応力を持つ場合は圧電定数が非常に低くなり、応力フリーに近づくに従って圧電定数が向上するが、逆に膜が引張り応力になると圧電定数に大きな印加電圧依存性が現われることが分かった。つまり、幅広い印加電圧（印加電界）範囲で高い圧電定数を実

現するためには KNN 薄膜の膜応力はフリーに近い状態であることが望ましいことを明らかにした。

第 5 章では、KNN 薄膜へのアニール処理の効果に注目し、アニール処理が圧電特性、リーク電流特性、膜の素性（組成、配向性、膜中不純物）に与える影響について調べた結果を述べた。まず、アニール処理前後の KNN 薄膜の圧電特性およびリーク電流特性を調べた結果、アニール処理によって、①圧電定数の値が向上し、圧電定数の印加電界依存性が大きくなること、②リーク電流密度が劇的に減少すること、が分かった。また、アニール処理によって KNN 薄膜の素性がどのように変化するかを調べた結果から、圧電特性の変化はアニールによる膜応力変化が引き起こしており、リーク電流特性の変化は不純物（H、C 濃度）の低減か、結晶粒界の隙間消失の両方またはいずれかが原因である可能性が高いことを示した。

第 6 章では、これまでに得た知見を元に、高い圧電定数の KNN 薄膜を実現すべく、(001)優先配向、 $\text{Na}/(\text{K}+\text{Na})=0.55$ 、応力フリーの KNN 薄膜を試作した結果、圧電定数  $d_{31}$  が  $96.3\sim 138.2\text{pm/V}$  という PZT 薄膜とほぼ同等レベルの圧電定数を実現した。また、KNN 圧電薄膜の諸特性を測定した結果を述べた。キュリー温度  $T_c$  は約  $360^\circ\text{C}$  であり、寿命特性、耐水性にも問題がないことが分かった。また、KNN 薄膜の MEMS 製品応用の際に必要な 2 軸弾性係数と熱膨張係数の値を得た。

第 7 章では、本研究で得られた成果を纏め、今後の展望と現在進行中のウエハサイズの大口径化および KNN 薄膜微細加工技術開発について述べた。

## 論文調査の要旨

圧力を電圧に変換し、電圧を圧力に変換する圧電効果を持つ圧電材料を薄く形成した圧電薄膜は、デジタルカメラの手ぶれ検知、カーナビゲーションシステムの方角検知、自動車のロール検知などに用いられている角速度センサや、圧電式インクジェットプリンタのヘッドなどに広く使用されている。また、今後は、プロジェクター用 MEMS ミラーや小型振動発電機などの新たな用途への展開も期待されている。現在、圧電薄膜にはチタン酸ジルコン酸鉛 ( $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ , PZT) という材料が使われている。この PZT 薄膜は鉛を高濃度に含有するため環境上問題がある。例えば、EU 加盟国では鉛を指定値を超えて含む電子・電気機器は販売できない。このため、特性的に代替可能な鉛フリー圧電薄膜が強く求められている。

本論文は、ニオブ酸カリウムナトリウム ( $(\text{K},\text{Na})\text{NbO}_3$ , KNN) を用いて、単結晶シリコン基板上に、世界で初めて圧電定数  $100\text{pm/V}$  以上という実用レベル特性の優れた鉛フリー圧電薄膜を実現した成果をまとめたものである。

本研究で得られた成果は、以下の点で評価できる。

1. XRD 広域逆格子空間マップ測定を用いた新規配向

率評価方法を提案し、これを用いて KNN 薄膜は (001)配向率が高くなるに従い圧電定数が向上することを見出している。

2. 圧電定数と比誘電率の KNN 薄膜の組成依存性を調べ、 $\text{Na}/(\text{K}+\text{Na})$ 組成=0.55 付近の時、圧電定数と比誘電率の値が最も高くなることを明らかにしている。
3. スパッタ KNN 製膜において、製膜温度、(001)配向率、アニール温度、シード層挿入などで膜応力が制御できることを示している。また、幅広い印加電界範囲で高い圧電定数を実現するためには膜応力の無い KNN 薄膜が望ましいことを明らかにしている。
4. KNN 薄膜のアニール処理によって、圧電定数が 30%向上し、圧電定数の印加電界依存性が大きくなること、リーク電流密度が 5 桁も減少することを明らかにしている。
5. KNN 薄膜で圧電定数が  $96.3\sim 138.2\text{pm/V}$  という PZT 薄膜と同等レベルの圧電定数を実現している。また、KNN 圧電薄膜のキュリー温度は約  $360^\circ\text{C}$  であること、耐水性にも問題がないことを明らかにしている。

以上のように、KNN 薄膜形成に関して多角的な検討を行い、単結晶シリコン基板上に、世界で初めて圧電定数  $100\text{pm/V}$  以上という鉛フリー圧電薄膜を実現したもので、電気電子工学上価値のある業績である。よって本論文は博士（工学）の学位に値するものと認める。

氏 名 金 淵元  
 学位記番号 シ情 博甲第 508 号 (学術)  
 学位授与の日付 平成 25 年 9 月 24 日  
 学位論文題名 Effects of Si Cluster Incorporation on a-Si:H/ $\mu\text{c}$ -Si:H Films Deposited by Plasma Chemical Vapor Deposition (プラズマ CVD で堆積した a-Si:H/ $\text{mc}$ -Si:H 膜への Si クラスタ取り込みの効果)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 白谷 正治  
 (副 査) " " 岡田 龍雄  
 " " 浅野 種正

## 論文内容の要旨

The photovoltaic industry is still dominated by the wafer-based silicon (~85%) solar cells. The tremendous growth of the photovoltaic market over the past few years has led to a silicon shortage, and hence research and investments

on thin film alternatives for wafer-based cells have been attracted much attention. However, Further reduction in production costs is needed and at this point it emerging as highly promising alternative in thin film technologies. Tandem type silicon solar cells, eg, a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H, have great potential for low cost, high efficiency, low material consumption, long-term stability, and environmental friendliness. The challenge in developing this technology is in fabricating an active silicon layer with sufficient electronic quality, with a thickness of 0.25-10 microns, at a deposition rate of over 1  $\mu$ m/min. In the fabrication of thin films, plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) is most commonly used with a large area at low substrate temperature. A high deposition rate is usually accompanied with a large number of dangling-bond defects in the deposited films leading to degradation in film properties. Major candidates responsible for light-induced film degradation at high deposition rate are considered that high generation rates of SiH and SiH<sub>2</sub> radicals, known as trigger species to generate Si clusters, and incorporation of such Si clusters into films. These clusters play an important role in film properties such as light-induced degradation of a-Si:H thin film solar cells.

This thesis is focused on the effect of silicon clusters incorporated into a-Si:H and  $\mu$ c-Si:H films based photovoltaic devices by means of multi-hollow plasma discharge CVD (MHDPCVD). MHDPCVD allows the growth of device quality a-Si:H by suppressing incorporation of silicon clusters into films during film deposition, whereas keeping high deposition rates. Hence, these features, along with the low implementation due to remote type of plasma, make the MHDPCVD technique a very attractive technology for a future industrial application. The present work study the optical and electrical, structural properties of these a-Si:H and  $\mu$ c-Si:H films obtained by MHDPCVD. Special attention is paid to generated clusters during plasma process which would affect the photovoltaic performance of devices. Besides the material properties of these thin films, comprehensive study on in-situ measurement of silicon clusters incorporated into a-Si:H films is presented. A brief description of the contents of this thesis surmised as follows.

Chapter one gives some fundamental backgrounds and introduction on the material properties of amorphous, microcrystalline silicon used in thin film solar cells. Moreover the general operation principle of solar cells and effects of silicon clusters on film properties are described with general force acting on clusters in plasma. In the chapter 2 description is carried out on the MHDPCVD setup and the experimental characterization techniques used for

studying film properties. Chapter 3 focuses on the film properties of cluster-free P- and B-doped a-Si:H films. The influences of the B<sub>10</sub>H<sub>14</sub> and PH<sub>3</sub> gases on the reaction probability of SiH<sub>3</sub> radical will be described with lower dangling bond defect density of cluster-free a-Si:H films. In the chapter 4 the process window of device quality  $\mu$ c-Si:H films are discussed to understand proper deposition conditions in a high-pressure depletion regime. Si films were deposited in a combinatorial method, by which fluxes of H and SiH<sub>3</sub> radicals and their flux ratio can be evaluated with the distance from the discharges. Moreover, effects of crystalline silicon nanoparticles on their film properties is presented. In the chapter 5 in-situ measurements of cluster volume fraction of a-Si:H films are demonstrated to clarify the contribution of Si clusters to film deposition. It is achieved by comparing deposition rates of the films with and without clusters by using quartz crystal microbalances with a cluster-eliminating filter. Additionally, the relationship between cluster volume fraction and optical emission intensity in steady state of plasma discharges are discussed. Finally, conclusions and recommendations for future work are summarized in the last part of this thesis.

## 論文調査の要旨

薄膜 Si 太陽電池は、低コスト、高効率、低材料消費、長寿命の太陽電池として需要の拡大が見込まれている。電力用の薄膜 Si 太陽電池では、高効率化のため a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H 等の 2 接合以上を用いた多接合太陽電池が主流であるが、光照射により a-Si:H 薄膜中の欠陥密度が増加する光劣化で効率が低下することが、高効率化と低コスト化のボトルネックとなっている。a-Si:H 薄膜は、主としてプラズマ CVD で作製されており、このプラズマ中で発生する Si クラスターの膜への混入が光劣化をもたらしていると考えられている。

本論文は、プラズマ CVD で堆積した a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H への Si クラスターの混入量を明らかにするとともに、混入が膜構造や膜質に与える影響を調べた実験結果についてまとめたものである。

本研究で得られた成果は、以下の点で評価できる。

1. a-Si:H 薄膜表面での SiH<sub>3</sub> の反応性が B<sub>10</sub>H<sub>14</sub> および PH<sub>3</sub> の影響で高くなること、Si クラスターの混入を抑制することで、B あるいは P をドーブした a-Si:H の光安定性が向上することを示すとともに、B をドーブした a-Si:H では窓層に適した 1.9eV の広いバンドギャップ、 $5 \times 10^{-6}$  S/cm の高い導電率を実現している。

2.  $\mu$ c-Si:H 薄膜に関して、Si クラスターの混入の有無により結晶化率に差は生じないものの、Si クラスターの混入しないものでは柱状の結晶成長が、混入したものでは逆円錐



状の結晶成長が生じることを明らかにしている。

3. 成膜中に膜中に混入する Si クラスタ量をその場測定する方法を提案し、成膜初期の 30nm に定常状態の 8 倍以上の Si クラスタが混入することを明らかにしている。さらに、膜中の Si クラスタ量と、プラズマの Si と SiH の発光強度比 $[Si]/[SiH]^2$ に比例関係があることを見いだしている。

以上のように、プラズマ CVD で堆積した a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H への Si クラスタの混入量を明らかにするとともに、混入が膜構造や膜質に与える影響を明らかにしており、電気電子工学上価値のある業績である。よって本論文は博士(学術)の学位に値するものと認める。

氏 名 Rimba Whidiana Ciptasari  
 学位記番号 シ情 博甲第 509 号 (学術)  
 学位授与の日付 平成 25 年 9 月 24 日  
 学位論文題名 Design of Authenticity Identification Scheme for Audio Ownership Protection and Image Tampering Verification  
 (オーディオ所有権保護と画像改ざん検証の為の真正性識別スキームの設計)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 櫻井 幸一  
 (副 査) " " 内田 誠一  
 " " 岡田 義広

### 論文内容の要旨

The advent of the digital era has spread the use of digital multimedia in virtually all areas. Multimedia signal can be easily reproduced and manipulated without any trace of alterations. Constructing a scientific and automatic way for confirming the legitimacy or truthfulness of the structure and/or content of multimedia is an important task, which is the aim of this dissertation. There are two major approaches to multimedia authentication, i.e., active and passive approaches. The former may work in two areas: digital watermarking and signature authentication. In case of digital watermarking, it works by inserting a digital watermark into the host data at the source side, and verifying the watermark integrity at the detection side. In the sense of authentication, the signature is generated by extracting host data features at the source side, and verifying the integrity by comparing the signature at the receiver side. On the contrary, the latter accomplishes data authentication without any prior information. That is, image authenticity is verified without

the presence of either digital watermark or signature. Both approaches are discussed and exploited in the thesis.

The thesis fundamentally addresses two main subjects: audio ownership protection and image forensics. The former is usually thought as an active approach, while the latter is referred to as a passive approach. In more details, the organization of the thesis is as follows. Chapter 1 introduces the motivation, problem formulations, and our main contributions. Chapter 2 provides literature reviews of both active and passive approaches. In more details, digital signature, digital watermarking, and trustworthy digital camera are described as related literatures to active approach. As for the passive approach, image forgery detection and image source identification are discussed. Chapter 3 introduces our contribution in the active approach, namely digital audio watermarking through direct feature-based method. Chapter 4 describes on exploiting reference images in exposing copy-paste forgeries. Chapter 5 deals with how to expose geometrical distortion through reference images. To conclude, Chapter 6 summarizes the work and provides research directions.

Numerous ownership protection schemes have been proposed. However, none of these works provides a formal structure from which the scheme is adopted. This situation arises as our first challenge issue. In Chapter 3, we begin with defining a formal scheme of ownership protection named *direct feature-based method*, as an alternative approach to traditional digital watermarking. Actually, this is not a new method for the researchers in digital signature field. As the traditional approach embeds “digital watermark” into the host data, it may cause distortion, such as quality degradation. Furthermore, trade-off between capacity and other important properties, such as imperceptibility and robustness, emerges as an inherent problem. Direct feature-based provides a solution to overcome such situations. We proceed to propose a resilient audio ownership protection scheme. We exploit index data instead of index field to generate the watermark key so that the number of watermark’s keys is much smaller than in the existing work. We then demonstrate the effectiveness of the proposed scheme against severe distortions. Experimental results indicate that our watermark key’s size is relatively the same as its watermark data while preserving the requirement of watermarking properties. Moreover, the system has maximum imperceptibility and is relatively robust against echo addition, band-pass filtering and re-sampling.

Note that the main purpose of computer forensics is the proper identification and collection of computer evidence.

However, all the image forensics' schemes developed so far have not provided verifiable information on the source of tampering. Thus, the second challenge issue addressed in Chapter 4 is on how to construct a verification scheme to identify the source of tampering. Our preliminary work on passive approach is to study on a common form of manipulation. That is combining parts of the image fragment into another different image to remove objects from the image. Inspired by the digital image correlation concept, we exploit the peak of cross-correlation function to automatically detect the splicing artifacts in any fragment of an image. Experimental results from synthesized splicing experiments state that the scheme can detect most splicing artifacts, with relatively few false positives. However, we observe that high value of peak of correlation coefficient does not guarantee it belongs to a spliced region. Low value of peak of correlation might belong to a spliced region. How to increase detection accuracy becomes the third challenge issue. We then improve our previous work by exploiting pixel-based alignment method adopted from image registration concept. We formulate a tampered image problem as locating the best correlation between the extracted sub-region(s) and their references. The results demonstrate the effectiveness over synthesized images and downloaded images from the web.

To end with, we consider that the image might have occasionally undergone some geometric transformations, such as rotation and scaling. Then, the fourth challenge issue addressed in Chapter 5 is on how to identify the geometric distortions. We exploit distinctive feature descriptor in detecting suspicious regions as well as invariant or sensitive triple feature construction to identify geometric parameters. In our previous work, the spliced artifact identification relies on edge detection technique. Due to this condition, the images which do not introduce any edges are hard to be detected, or might cause fault extraction. We then proposed clustering techniques to identify the tampered region based on distinctive keypoints. We draw the comparison to the existing scheme and it confirms that we obtain a considerable gain both in terms of rotational and scaling accuracy.

## 論文調査の要旨

コンピュータとネットワーク技術の発展に伴い、音声や画像などデジタルメディアの情報は、放送や映画をはじめ多くの分野で使用されている。デジタル情報はその質を劣化させることなく複製が可能のため、複製防止や著作権保護が課題である。この対策としては、暗号技術に基づく署名・認証や電子透かしなどの方法がある。すでに実用化・標準化されたものもあり、我々のデジタル社会の信頼性基

盤をささえている。また、コンピュータ犯罪が増加する今日のサイバー社会において、デジタルメディア情報を犯罪捜査の証拠として利用する場合、その信頼性も重要となっている。

デジタルデータの著作権保護には、電子透かしを保護データに埋め込む技術が代表的であるが、埋め込む透かしデータの影響による保護データの劣化が避けられない。このため高品質画像を扱う応用システムには適用できないという制限がある。また改ざん検出手法の性能評価においては、さまざまな改ざん攻撃に対して、どの程度耐性があるかという解析が常に要求される。本研究は、音声データの著作権保護と画像データの改ざん検証のための方式設計と安全性評価を論じたものであり、以下の点で評価できる。

第一に、著者は電子データの所有者情報保護のために、直接特徴抽出法と呼ばれる手法を設計した。従来このためには、所有者固有の情報を保護データに埋め込む電子透かしが用いられる。しかし、埋め込んだ透かしデータにより保護データが劣化するという課題は常に存在する。これに対して、著者は保護データに直接は透かしの埋め込まない Chen らの手法に注目した。この手法では、保護データの特徴を抽出し、透かしデータと組み合わせ暗号化の鍵とする。Chen らは音声データの保護に対して、この手法を実現しているが、透かしデータに対して鍵長が長くなるという課題があった。著者は音声データの構造に注目し、新しい鍵生成アルゴリズムを用いた手法を提案した。提案した手法では、既存の手法よりも鍵長が短く透かしデータと同じサイズで実現できることを理論的に示した。さらに改ざん攻撃に対する耐性についても、StirMark と呼ばれる代表的な改ざん攻撃ベンチマーク試験を通して、提案手法の有効性を実験的に検証した。

第二に著者は、証拠データに対する複製・切り貼り改ざんを検証可能にする手法を提案した。この種の改ざん検出には、証拠対象となる合成データだけを用いた改ざん検出法が適用されるが、合成データだけでは検出結果の正当性を検証できないという課題がある。これに対して著者は、合成データと関係のある参照データベースを用いる手法により、この課題を解決できることを明らかにした。著者は、合成データより抽出した部分データと参照データとの相関度を計算する基本手法を設計した。この基本手法では、相関度によっては適用障害があることを実験的に評価した。さらに著者は、相関度をなだらかにする手順を導入することでこの障害を取り除く改良に成功した。実験により、既存手法の検出精度が 8 割強に対して、提案手法の検出精度は 9 割以上であることを示した。

第三に著者は、証拠対象データの回転や拡大などの幾何歪みを特定する手法を提案した。重複領域に着目した幾何歪みを検出する手法などがすでに提案されているが、明確

な境界を持たない画像には適用困難であるという課題がある。これに対しては、k 平均法などのクラスタリングアルゴリズムを用いた画像パターン認識が適用可能である。これに対して著者は、このような単純なクラスタリングを利用しただけでは特定できない歪みがあることを発見した。その上で特徴点クラスタリングアルゴリズムを導入した特定法の改良を提案した。実験により確かに回転と拡大に対する歪み耐性が既存手法よりも優れていることを示した。さらに現実の画像データ事例を用いて、既存手法よりも検出できる改ざん情報が多いことも実験的に検証した。

以上要するに、本論文は、マルチメディア社会における電子データの所有権保護手法と改ざん検出手法を提案し、実験を通してそれら提案手法の有用性を論じたものであり、情報学上寄与するところが大きい。よって本論文は、博士（学術）の学位論文に値すると認める。

systems.

In this thesis, which consists of seven chapters, we discuss the models and method for developing, integrating and evaluating the WIS. In the first chapter, we introduce the background and the problem definition. In the second chapter, we describe the key concepts and technologies. It also includes the related work of this thesis. In Chapter 3, we describe the IT architecture model to resolve IS characteristic problems in educational institutions. In Chapter 4, we describe the proposed method for developing and integrating WIS. In Chapter 5, we describe the web application interface development as a case study. In Chapter 6, we describe the proposed evaluation model for evaluating WIS quality and effectiveness. Chapter 7 is the conclusion and future work of this thesis.

This thesis provides three key contributions: an Information Technology (IT) architecture model, a WIS development method, and a WIS evaluation model that are summarized in the web information system educational framework.

Enterprise Architecture (EA) and Model Driven Architecture (MDA) are concepts for formulating an IT architecture model into activities related to WIS development to meet university needs. Based on an analysis of IT and information systems of HEIs in Indonesia, an IT architecture model has been proposed according to the situation and needs of national universities. We discuss this model in Chapter 3. The model is then applied to University of Lampung (Unila, Indonesia) as a case study. The outcome is an IT architecture that can be implemented to support integrated WIS development in Unila. The IT architecture consists of business architecture, information system architecture and technology architecture. The result of this study indicates that the proposed IT architecture model can be a reference for HEIs in order to produce architectures in accordance with the business process and WIS needs.

Several principles and platforms planned within the IT architecture can lead to changes in the existing information systems and technologies. Alterations of existing information systems or the development of a new information system for a HEI must be done within a time span acceptable to the current business condition. On the other hand, software developments to support information system modifications are still incapable of keeping pace with current needs. In this study, we propose WIS development method based on MDA and Service Oriented Architecture (SOA) approaches. We discuss the proposed method in Chapter 4. This method defines the WIS development process to automatically obtain

-----

氏 名           Mardiana  
 学位記番号     シ情 博甲第 510 号 (工学)  
 学位授与の日付   平成 25 年 9 月 24 日  
 学位論文題名    Web Information System Development  
                   and Integration by Utilizing Enterprise  
                   Architecture and Model Driven  
                   Architecture in Educational Institutions  
                   (エンタープライズアーキテクチャと  
                   モデル駆動アーキテクチャの利用による  
                   教育機関におけるウェブ情報システ  
                   ムの開発と統合に関する研究)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 荒木 啓二郎  
 (副 査)     "       准教授 峯 恒憲  
           "       "       "       日下部 茂  
           "       "       "       池田 大輔

**論文内容の要旨**

Web Information System (WIS) for educational institutions is relatively different from other enterprises due to dissimilarities in terms of purpose, problem characteristics and users. Higher Education Institution (HEI) requires the appropriate standards and models to conform in order to establish a WIS architecture that is both suitable and straightforward with regard to its development process and evaluation. This also implies that HEI requires an appropriate approach to integrate all work related to enterprise architecture and the development of its web information

web application interface from information system model. Results from this study shed light on how our method can be applied and effectively integrate existing WISs in HEI. In Chapter 5, we illustrate a development of web application interface by applying this method to integrate two existing WISs at Unila. The implementation of a web application interface (called SIMPEL) has successfully integrated Course Management System into Unila's Academic Information System and work properly. The WIS development process involved in this method allows developers to progress smoothly from the models to the generation of the web applications. Usefulness of the templates to assistance automatically generate PHP files in the form of Model View Controller (MVC), Web Service Description Language (WSDL) and Data Definition Language (DDL) is powerful enough to cover the constraints of time effort and write repetitive code. It can be concluded that the adoption of this method can help developers efficiently develop and increase productivity of WIS.

This thesis is complemented with constructing a new model for evaluating WIS that allows university to assess quality and effectiveness of developed and implemented WIS. We discuss this model in Chapter 6. In this study, the evaluation model is constructed by modifying the concepts of both Technology Acceptance Model (TAM) and IS-Impact due to their inadequate comprehensive evaluation for WIS. The model then applied to assess the quality and effectiveness of SIMPEL in Unila. It described in two parameters: performance evaluation and functionality evaluation. The overall evaluation results show that the evaluation model can be valuable for decision makers in HEI on evaluating the development and implementation of WIS.

Three key aspects - IT architecture model, WIS development method, and WIS evaluation model - incorporated into the WIS education framework are highlighted in this thesis in contributing towards resolving issues related to the development and integration of WISs in educational institutions in a way that the planned WIS can effectively meet institutional needs, and can be developed and evaluated in an easy, quick and efficient way. The result of this work is expected to specifically contribute to the advancement of educational institutions in Indonesia, particularly as a reference for developing and integrating WIS.

### 論文調査の要旨

近年、ウェブシステム上で、情報処理サービスを提供するウェブ情報システムが広く利用されている。多種多様なウェブ情報システムをそれぞれ新規に開発したり、複数の

既存のウェブ情報システムを統合したりするために、システム実現にかかわる詳細レベルと応用領域における抽象レベルとの階層化に基づくエンタープライズアーキテクチャやモデル駆動アーキテクチャと呼ばれる基本構成に基づくシステム開発や統合の手法が提案されている。しかしながら、それらは、概念的かつ一般的な手法として提示されているために、個々のシステム開発や複数の既存システムの統合に効果的に適用することは容易ではない。

本論文では、上述の階層的なエンタープライズアーキテクチャおよびモデル駆動アーキテクチャに基づいて、複数の既存のウェブ情報システムを統合して首尾一貫した一つの情報システムとして提供するための具体的な方法を提案し、実在のウェブ情報システムの統合に実際に適用してその有用性を実証したもので、以下の点で評価できる。

第一に、インドネシアの高等教育機関における情報システムを具体的対象として、エンタープライズアーキテクチャならびにモデル駆動アーキテクチャの概念に基づいて、複数の既存のウェブ情報システムの統合を行うインタフェースの機能と構成を示し、テンプレートに基づいてインタフェース部分のプログラムを自動生成する手法を提案した。システムの対象領域を分析して、統合後のシステムのアーキテクチャの観点に基づく記述とその実現方法を具体的に提案したことは、ウェブ情報システム統合の実用的な手法として評価できる。

第二に、上で提案した手法を、実在のウェブ情報システムの統合に適用して、提案手法の有用性を実証した。インドネシアの高等教育機関の一つであるランブン大学における教務システムと e-Learning システムという相互に関連があるものの個別のシステムとして開発され、利用されている二つの独立したウェブ情報システムの統合を提案手法に基づいて実施して、利用者へ提供した。プログラムの自動生成率は、約 72% であり、システム開発効率の向上に効果があった。また、統合化されたこのシステムは、2 年間に亘って、延べ 98 名の教員と延べ 1600 名以上の学生が延べ 47 科目に対して利用し、約 65% が満足できるという利用者からの評価を得た。上述のように、提案したシステム統合手法の適用事例を具体的に示し、かつ、その実用的な有効性を示したことは評価できる。

第三に、特にインドネシアの高等教育機関における情報システムを対象として、提案手法の適用範囲および開発効率に関する考察を行って提案手法の適用性の向上を図った。個々の高等教育機関で情報システムを個別に開発し運用することが多いインドネシアにおいて、アーキテクチャの概念に基づいた情報システムの開発および統合に関する一般的な方法論を具現化する枠組みを提示したことは、高等教育機関における情報システムという対象領域が限定されてはいるものの、ウェブ情報システム開発において有効性の高い系統的開発手法を提示したものとして評価

できる。

以上、本論文は、エンタープライズアーキテクチャおよびモデル駆動アーキテクチャの概念に基づいて既存のウェブ情報システムの統合を行う具体的手法を提案し、実在の複数のシステムを対象として提案手法の有効性を実証し、それらの成果を再利用可能なシステム開発手法として提示したもので、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 黄 栄  
 学位記番号 シ情 博甲第 511 号 (学術)  
 学位授与の日付 平成 25 年 9 月 24 日  
 学位論文題名 Character Localization and Recognition  
 in Natural Scenes  
 (情景内文字の検出と認識)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 内田 誠一  
 (副 査) " " 谷口 倫一郎  
 " " 准教授 諸岡 健一

論文内容の要旨

This thesis focuses on developing methods geared towards the applications of camera-based Optical Character Recognition (OCR), specifically, addressing problems of scene character localization and recognition. The realization of a high-performance camera-based OCR, which is the technology to read the texts captured by camera, will not only extend a new area of OCR but can also develop applications related to vision.

We survey the existing scene text localization and recognize works according to different features or methodologies in Chapter 2. Specifically, scene text localization methods are classified into seven categories: color/intensity-based, edge-based, stroke-based, keypoints-based, texture-based, other clues-based and hybrid. On the other hand, scene text recognition methods contain two categories: OCR-based and machine learning-based. Moreover, benchmark datasets and evaluation criteria are also introduced.

In Chapter 3, we propose a cooperative multiple-hypothesis framework which consists of an image operator set module, an OCR module and an integration module. Multiple image operators activated by multiple parameters probe suspected character regions. The OCR

module is then applied to each suspected region and returns multiple candidates with weight values for future integration. Without the aid of the heuristic rules which impose constraints on segmentation area, aspect ratio, color consistency, text line orientations, etc., the integration module automatically prunes the redundant localizations/recognitions and compensates the missing localizations/recognitions. The proposed framework bridges the gap between scene character localization and recognition, in the sense that a practical OCR engine is effectively leveraged for result refinement. In addition, the proposed method achieves the localization and recognition at the character level, which enables dealing with special layouts such as single character, text along arbitrary orientations or text along curves.

In Chapter 4, a new edge-based method, called edge-ray filter, is proposed to localize scene characters. Edges are extracted by a combination of Canny and Edge Preserving Smoothing Filter (EPSF). To effectively improve the performance of filtering out false alarms, we develop a new Edge Quasi-Connectivity Analysis (EQCA) to unify complex edges and broken contours of characters. Label Histogram Analysis (LHA) module, which can preserve stroke ray and remove redundant ones, is designed to localize scene characters. In the edge-ray filter, only two frequently-used heuristic rules, namely aspect ratio and occupation, are exploited to wipe off distinct false alarms. In addition to have the ability to handle special layouts, the proposed method can accommodate dark-on-bright and bright-on-dark characters simultaneously, and provides accurate character segmentation masks.

Conclusion and future works are drawn in Chapter 5.

論文調査の要旨

情景画像内における文字の検出と認識は、デジタルカメラやビデオの普及に伴い、活性化している研究分野である。我々人間は、無意識かつ極めて正確に、視界内の文字を見つけて認識しながら、日々の生活を送っている。しかし計算機には非常に困難な課題である。その要因には、文字の多様性や文字に類似した構造の存在に加え、文字検出に存在する本質的な困難性がある。すなわち、文字を検出して認識するためには、どれが文字であるかをまず認識する必要があるというジレンマがある。

多くの従来法では、文字らしさを表現する何らかの特徴を用いて、まず文字候補領域を検出する、という方策が採られる。例えば、コントラストが高い、空間周波数が高い、エッジが多い、文字線（ストローク）に相当する平行エッジが存在する、文字らしい領域が一方向に並んで存在する、

などの特徴を利用した手法がある。これらはいずれも一定の効果はあるものの、上述のように、情景画像内には文字に類似した構造が多く存在するため、それらを誤検出してしまう場合が多い。さらに単一の特徴では、文字の多様性には対応できない。これに対し、複数の特徴を組み合わせ、機械学習の枠組により有効な特徴を選択する手法が存在する。しかし、上記ジレンマの本質的な解決にはなっていない。

本論文は、文字の多様性に配慮しながら、情景内の文字の検出と認識を同時に行う枠組みを提案し、その有効性を比較実験により示したものであり、以下の点で評価できる。

第一に、情景内文字の検出・認識のために、多重仮説型手法を提案した点である。この手法では、検出処理の多様性を以て文字の多様性に対処する。具体的には、まず情景内画像を輝度値やエッジなどの様々な基準で領域分割し、次に各領域において文字認識結果を求める。これら領域分割結果のうちには、正しく切出された文字領域が少なからず含まれていると期待できる。そしてそれらの領域では正しい認識結果が得られる可能性が高い。一方、切出しに失敗した文字領域においては、誤った認識結果が得られる可能性が高い。そこで、それら認識結果を仮説として考え、領域の位置関係を顧慮しながら多数決的に統合すれば、正しく切出された文字領域における正しい認識結果だけを選出できる。すなわち正しい検出結果と認識結果を同時に得られる。標準データベース ICDAR Robust Reading Dataset を用いて性能検証を行ったところ、検出率で当時世界最高水準の 59% を達成し、その検出領域に対する文字認識率も 80% を達成している。

第二に、上記多重仮説型手法にも利用可能な、Edge-lay filter と呼ぶ新たな領域分割法を提案した点である。同手法では、文字の輪郭線構造に注目しエッジの平行性を利用する。具体的には、2つのエッジが同一の文字線の両側を構成すると判断された場合に、それらエッジに囲まれた領域を文字領域候補とする。同じエッジを用いる従来法では分割結果を安定化させるために様々な事後処理が必要であった。例えば従来法では、文字群は直線状に列を成すという仮定に基づいて、誤検出を事後的に除外していた。これに対し本手法では、判定論理を厳格化することで事後処理を不要にしておき、結果的に直線状に並んでいない文字群の検出も可能にしている。ICDAR Robust Reading Dataset を用いた検出性能検証により、本手法単独で 62% と言う、上記 59% を超える検出率を達成した。

以上要するに、本研究は、多重仮説に基づく情景画像中の文字検出および認識手法を提案し、その有効性を評価実験により示し、さらに同手法における領域分割法としても利用可能な Edge-lay filter を提案して有効性を実証したものであり、情報知能工学上寄与するところが大きい。よって本論文は博士(学術)の学位論文に値するものと認める。

氏 名 曾 駿  
 学位記番号 シ情 博甲第 512 号 (情報科学)  
 学位授与の日付 平成 25 年 9 月 24 日  
 学位論文題名 Block Extraction and Page Segmentation  
 for Block-Level Web Search  
 Engine  
 (ブロックレベルウェブ検索エンジン  
 のためのブロック抽出およびページ分  
 割)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 廣川 佐千男  
 (副 査) " " 荒木 啓二郎  
 " " 准教授 峯 恒憲

## 論文内容の要旨

Along with the rapid development of web, the quantity of information available on the web today is more than at any point in history. Due to the popularity of web search engines, finding relevant web pages only takes less than one second. This is because before the query terms are submitted, a web search engine has built an index for each word to indicate a list of web pages where the word appears. However, even if web search engines can provide relevant web pages in such a short time, people still need to spend a lot of time reading the pages to find the relevant parts of a web page. An ideal goal of web search engine would be a “block-level” search engine where each web page is segmented into non-overlapped regions of an appropriate size. There have been many researches on extracting relevant parts from web pages for users’ query. However, these approaches are not concerning with covering all the contents of a web page and making an index for the sub-pages of a web page. In other words, it is necessary to formalize the appropriate parts of a web page for a query and to segment a web page into non-overlapped parts in order to realize a “block-level” web search engine. This thesis considers rectangular regions as the index targets and solves these two problems.

The first problem is known as block extraction from a web page with respect to a query. The required blocks may vary according to query. Thus, it is necessary to determine what kind of block is more likely to be a required block with respect to the query. Firstly, we consider the leaf blocks that satisfy the query. Then we analyze the blocks in the path from the leaf blocks to the root of HTML-tree. We analyzed the features of blocks, such as: the text quantity, DOM (Document Object Model) tree depth, number of child blocks, etc. We manually labeled the required blocks from a set of

web pages and utilized SVM (Support Vector Machine) to train these features of the labeled blocks in order to determine which feature is most effective in detecting the required blocks. Based on the analysis results, we defined the score of a block as a combination of word weight and block depth. The score is used as a ranking measure of blocks for a query. The experiment results indicated that the proposed method is effective to extract the required block and useful to reduce users' search time.

The second problem is known as page segmentation. The purpose of page segmentation is to divide a web page into independent segments. We use the visual features of blocks to segment web pages. First, we consider the record blocks where similar kinds of data are displayed adjacent to each other. The automatically generated outputs from databases are typical examples of these record blocks. We give a formulation of the similarity of blocks and introduce the notion of "layout tree". For two given blocks, they are first transformed into two layout trees. Then the Tree Edit Distance algorithm is used to calculate the distance of the two layout trees. If the distance is less than the threshold, then the two blocks have similar layout. By using the layout tree, we can recognize the data record blocks in a given web page. We used this similarity to cluster blocks of a web page. We introduce two other measurements of seam degree and content similarity of two blocks. The seam degree describes how neatly the blocks are arranged. The content similarity describes the similarity of contents. The method first recognizes and marks the data record blocks in advance. According to the seam degree and content similarity, it can be determined whether a block should be divided or not. The experiment results show that the proposed method can divide a web page into appropriate suitable semantic segments.

### 論文調査の要旨

Web ページが情報提供の手段として普及するに伴い、その構造も複雑化してきている。このため、より精度の高い Web ページ検索を行うためには Web ページの構造を意識した情報抽出を行う必要がますます高まっている。既存の研究のほとんどは HTML タグで識別できる情報を活用するものであるが、現実の Web ページでは本来とは異なる目的で HTML タグを使うなどの使用の揺れが広範囲に見られる。また、利用されるタグやフォントなどの文字属性に共通性はなく、HTML のツリー構造や単純な視覚的情報の利用だけでは、必要とする情報の検索に対応できない。本論文はこの現状に対し、予め検索に必要とされる情報をまとめたブロックとよぶ単位で Web ページの索引付けを行う方法を考案し、そのブロック単位での索引付けを実現す

るために、Web ページの実際の視覚的情報を活用した Web ページの分割方式を提案し、HTML ツリーやタグパターンや文字属性では誤判定する可能性のある事例にも対処できるようにしたものであり、以下の点で評価できる。

第一に、与えられた検索語に対する、Web ページ中でのブロックとよぶ分割単位を定式化し、その定式化の妥当性を検証している。具体的には、検索語を含む Web ページの中で重要部分がどの節になるかを人手で判定したものを学習データとして、機械学習の手法である SVM (Support Vector Machine) を適用してモデルを構築し、重要部分の判定の性能を評価している。節の深さや子の数などの HTML 構造による重要度と、その節に含まれる単語と検索語との関連の強さという二つの観点からの評価を融合した新しいモデル提案として評価できる。

第二に、ブラウザに表示された際のレイアウト情報の定式化としてのレイアウトツリーと、レイアウトツリーのクラスタリングによる Web ページの重要部分抽出法を提案している。レイアウトツリーはブロックの上下・左右の隣接性に着目した Web ページのツリー表現である。クラスタリング結果について、クラスタの領域の広さと要素数から、分割不可能ブロックとして抽出すべきクラスタを決定している。この手法を商品などの同種のデータを複数個提示する 10 通りのサイトの Web ページ群に適用し、精度、再現率ともに 95% 以上の高い抽出性能を達成している。これは Web ページの繰り返し部分の抽出を行う Wrapper 分野の研究に、まったく新しい方式を提案し高い性能を示したもので評価できる。

第三に、レイアウトツリーに基づく最重要部分の抽出後に残る部分の分割のために、隣接ブロックの関連度として、Seam Degree と Content Similarity という二つの評価尺度を提案し、その評価尺度に基づく分割アルゴリズムを提案している。Seam Degree は二つのブロックが視覚的にどれだけ強く隣接して見えるかを示す評価尺度であり、Content Similarity は二つのブロックの内容の類似度についての評価尺度である。これらの評価尺度を用いて、オンラインショッピング、ニュース、ブログ、動画共有など異なる種類のサイトの Web ページに対して、ページ分割を行い、正しい分割ができているかどうかを検証した結果、標準的手法として広く使われている VIPS (Vision-based Page Segmentation Algorithm) より高い性能を得ている。これは、ブロック検索エンジン構築の基本的問題の解決に大きく寄与するものとして評価できる。

以上、要するに、本論文は、ブラウザに表示されたときの視覚情報と HTML の構造を融合した構造化手法としてのレイアウトツリー、それに基づきページ中の重要部分を抽出する手法、重要部分以外の部分についても隣接するブロックの類似度を評価する二つの尺度とそれに基づく分割アルゴリズムをそれぞれ提案し、これらの有効性を評価

実験により示したものであり、情報科学上寄与するところが大きい。よって本論文は博士（情報科学）の学位論文に値するものと認める。

-----

氏 名 王 湫  
 学位記番号 シ情 博甲第 513 号 (学術)  
 学位授与の日付 平成 25 年 9 月 24 日  
 学位論文題名 Part-Based Methods for Character  
 Recognition  
 (断片化に基づく文字認識に関する研究)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 内田 誠一  
 (副 査) " " 谷口 倫一郎  
 " " 准教授 諸岡 健一

### 論文内容の要旨

The conventional character recognition methods have many limitations when applied to the new recognition tasks, such as the recognition of handwritten characters, scene characters and the document of arbitrary fonts. For those tasks, there are many difficulties, such like the various character appearances, noise and distortion, segmentation problem, etc. Consequently, in this thesis, the part-based method is proposed. In the part-based method, only the parts of the character image are used for recognition and the global structure information is usually discarded. By only using the parts, the part-based method is supposed to have the advantages on overcoming the above difficulties. In this thesis, the applications of the part-based method are studied and tested on various databases. The results showed that the part-based method is a good choice for those new character recognition tasks.

In Chapter 2, the part-based methods were introduced and in Chapter 3 the selection strategies of the parts were studied. The part-based methods were also tested on the MNIST (digits) as well as the CEDAR (alphabets) databases. The results showed that the performance of the part-based method was totally comparable with the state-of-the-art methods. On the MNIST, the part-based method of class distance achieved the recognition rate of 99.15% with a very simple classifier. On the CEDAR of alphabets, the class distance method had a recognition rate of 78.9% while the whole-based method was only 70.1%. Besides, the part-based methods are robust against the degradation of the image,

which is proved by the experiments on cropped images generated from MNIST. When the cropped images were tested, the recognition rate of the whole-based method decreased from 92.8% to 44.9% while the part-based method only decreased from 93.6% to 81.3%. Moreover, by applying the parts selection strategy, the part-based method can achieve almost the same recognition rate with only a half of the reference parts.

In Chapter 4, the part-based method was extended to the handwritten character string recognition and compared with the BLSTM (a state-of-the-art method for character string recognition). From the experiment results, we can see that the part-based method has the robustness against the distortion of the image. For those severe cases, the part-based method is a powerful tool.

In Chapter 5, the part-based method was applied to arbitrary font recognition. The results showed that the part-based method was able to outperform the commercial OCR. The highest recognition rate of the part-based method was 73.5% while the commercial OCR was only 56.7%. This is a very important property for the scene character recognition. In the future, it is possible to apply the part-based method to scene character recognition and which will be able to recognize the characters in arbitrary fonts.

In Chapter 6, the part-based method was also tested on document image decoding. As shown in the experiments, it is possible to create a recognition system with the merits of robustness, preprocessing-free, segmentation-free, font-free or even language-free. It will be very useful when the prior knowledge (for example, the font and the language information) of a document is hard to obtain.

### 論文調査の要旨

手書き文字画像の認識は、その長い研究の歴史にも関わらず、単文字および文字列共に未だ解決されていない問題の一つである。実際、一般的な活字で印刷された文字の認識については、いわゆる OCR（光学的文字認識）ソフトウェアとして既に多くの市販品が見られるのに対し、手書き文字画像の認識についてはそうした普及は見られない。活字に比べて手書き文字の認識を困難にしている最大の理由は、手書き文字に生じる多種多様な変形にある。すなわち、手書き文字では、往々にして大局的構造も大きく変化するために、計算機内に予め登録されている標準的な字形群との乖離が起り、誤認識が誘発される。

画像の断片化は、大局的構造の変化に頑健な認識手法として、昨今注目されている。特に、手書き文字と同様、大局的構造の変化の大きい、一般的な物体の画像認識においては、この断片化に基づく手法が多数提案されている。断



片化の基本となる考え方は、対象の大局的構造を無視して、局所構造だけを見て認識する点にある。大局的構造が変化したとしても、局所構造が安定していれば、各断片においては正しい認識結果が得られる可能性が高くなる。そして正しく認識された断片が多ければ、全断片での認識結果を多数決的に統合すれば、画像全体としても正しい認識結果が得られる。ただし、文字画像の断片化については、類似した断片ばかりが生成されると予想されたためか、その実施事例は過去になかった。

本論文は、この断片化の考え方が手書き文字認識および手書き文字列認識においても有効であることを、複数の手法の比較を伴った網羅的かつ詳細な実験を通して実証したものであり、以下の点で評価できる。

第一に、断片化に基づく手書き単文字認識手法を複数提案し、大局的構造を利用しなくても手書き文字が認識可能な事実を示した点である。最も基本的な手法では、予め辞書登録用のラベル付き文字画像を断片化してデータベース化しておき、その上で、入力文字画像を断片化し、断片毎にそれと最も類似したデータベース中の断片を探索する。これは謂わば断片毎の認識処理に相当する。そしてそれら断片毎の認識結果の多数決を採り、最も多数を占めた文字クラスを最終的な認識結果とする。その結果、標準的な手書き数字画像セット(MNIST)において 98%という高い認識率が得られた。また、この基本的な手法だけでなく、1断片あたり複数の認識結果を許容する手法や、断片毎の類似度を利用した手法も提案している。特に後者の認識率は 99%に達しており、断片化に基づく手法が断片化を用いない一般的な手書き文字認識手法と比べても遜色ないことを実証している。さらに、実際の文字認識タスクで見受けられる一部が欠けた文字について、一般的な手法の認識率が 45%まで低下するのに対し、大局的構造を利用しない本手法では 81%の認識率を維持できることも示した。加えて、装飾を伴った多様なフォントで印字された英字群についても、市販活字 OCR が認識率 56%に留まったのに対し、本手法では 73%の認識率を達成できることを示した。

第二に、断片化に基づく手書き文字列認識を提案し、その有効性を示した点である。手書き文字列認識の最大の課題は、単文字への分節である。この分節処理は、隣接文字の接触や、文字列に罫線が交差するなどにより、一層困難になる。断片化に基づく手法では、単文字の場合と同様、文字列画像を断片化し、断片毎に認識を行う。その結果、特定の文字クラスに認識される断片群が、クラスタ状に存在する。ここで接触部や罫線との交差部にかかる断片は誤認識されるが、その誤認識結果はランダムであるため、クラスタ形成には影響しない。よってこのクラスタに注目することで、文字列中のどこにどの文字があるかを判定でき、すなわち文字列を認識できる。この原理の妥当性を、実際の手書き数字列画像を用いた認識実験で示している。特に、

隣接文字接触や罫線が存在する場合には、現在最も高い認識率を誇る手法(BLSTM)よりも高い認識率を維持できることを示した。

以上要するに、本研究は、断片化に基づく文字認識について複数の手法を提案し、それらの有効性を評価実験により示し、さらに断片化が文字列認識や装飾文字認識にも有効であることを実証したものであり、情報知能工学上寄与するところが大きい。よって本論文は博士(学術)の学位論文に値するものと認める。

氏 名 Cuk Supriyadi Ali Nandar  
 学位記番号 シ情 博甲第 514 号 (工学)  
 学位授与の日付 平成 25 年 9 月 24 日  
 学位論文題名 ROBUSTNESS AND ADAPTIVITY  
 ENHANCED CONTROLLER DESIGN  
 FOR SMART GRID POWER SYSTEMS  
 WITH HIGH RENEWABLE ENERGY  
 PENETRATION  
 (再生可能エネルギー源が大量導入されたスマートグリッドのロバスト性・適応性強化制御系設計に関する研究)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 村田 純一  
 (副 査) " " 川邊 武俊  
 " " " 岩熊 成卓

論文内容の要旨

The penetration of renewable energy in power system significantly increases. However it causes some issues on power systems such as frequency deviation due to unstable power outputs of renewable energy generation units, and rotor angle instability (low frequency oscillation) caused by decrease in the total inertia constant of conventional generating plants when the electric grid receives a large amount of power from the renewable energy generation units. This thesis proposes control system design by considering robustness and adaptivity to overcome the problem. In this thesis, the existing controllers, most of which are PID or lead-lag controllers, are optimized, so that they can exhibit better performance and that if this alone cannot attain desirable performance, new devices will be installed. The proposed control design will be applied to solve frequency deviation in isolated power systems, and rotor angle stability in interconnected power systems with high renewable energy penetration. In isolated power systems, robust control design

is enough to handle frequency deviation. However, in interconnected power system, when the variations of total inertia constants are large, giving robustness to the controllers is not enough. We need to make the controllers adaptive to the changes in operating conditions due to the high penetration of renewable energy sources. In adaptive control, the controller parameters are changed depending on the situations. Here a system identification technique and the robust controller design method described above are combined into an in-direct adaptive controller design. The identified model is used to monitor discrepancy between the actual power system output and the expected output (model output). When a large discrepancy is detected, a new set of controller parameters is determined to adapt to the new situation. The simulation studies show that the proposed adaptive control scheme is able to stabilize power system under the changeable operation conditions and system uncertainties due to high penetration of renewable energy sources.

An outline of the thesis is presented as follows:

*Chapter 1* - A brief description of smart grid power system is provided and challenges of smart grid application on power system are discussed. The challenge of smart grid on control scheme is specially highlighted. Furthermore, robustness and adaptivity of control system design on smart grid power system to improve power system stability are introduced.

*Chapter 2* - The general theories of conventional robust control design are presented. The classification of system uncertainties modeling is provided. Then the conventional control system design considering system uncertainties to guarantee robustness of controller is given. The example of application of conventional control design on single machine infinite bus power system is presented.

*Chapter 3* - This chapter introduces conventional adaptive control designs. First, direct adaptive control design especially MIT rule to adjust parameter of controller is explained. Then this chapter presents indirect adaptive control systems using iterative identification and control design method, and multi model adaptive control scheme. The several methods of identification and control system design are briefly explained.

*Chapter 4* - This chapter shows the proposed robust control design and adaptive control scheme. The proposed robust control design using conventional control structures is described. The weakness of robust control design due to high renewable energy penetration in power system is discussed. Next, the proposed indirect adaptive robust control design is

described.

*Chapter 5* - This chapter presents the robustness and adaptivity enhanced controller design in isolated smart grid power system. The details of power system model, pitch model and principal operation of energy storage are given. To check the performance and robustness of proposed energy storage controller comparison with conventional energy storage controller, eigenvalues analysis and non linear simulation using Simulink/Matlab is applied.

*Chapter 6* - This chapter concentrates on the application of proposed method to design adaptive robust power system stabilizer (PSS) in two-area four-machine power system. First, system modeling such as generator model, exciter model, and power system equipped with PSS is described. Then non linear simulation studies using ObjectStab are applied to evaluate damping performance and robustness of the proposed PSS in comparison with those of PSS designed without considering robustness and adaptivity against several system uncertainties.

*Chapter 7* - General conclusion and recommendations for further research are given.

## 論文調査の要旨

太陽光発電や風力発電の出力は自然条件によって大きく変動するため、その変動は電力系統の周波数の変動を引き起こす。また、これら再生可能エネルギー源による発電装置の総出力が大きくなると、従来型の回転機型発電機の使用割合が低下し、回転体の慣性による安定度維持能力が低下する。前者の対策には、風力発電機のピッチ角制御による出力制御、蓄電装置の適切な充放電制御、回転機型発電機の出力制御が有効であり、後者の対策には、回転機型発電機の安定度維持能力に影響を与える界磁電流の適切な制御が必要である。特に、これらの制御は、再生可能エネルギー電源出力の変動や系統構成の変化に対処できることが重要である。従来、これらの制御へのロバスト制御および適応制御の応用が提案されてきたが、既存制御器とは構造が異なる高次元の制御器を必要とする、制御器パラメータの調整が頻繁に行われる、という実用上好ましくない特徴を持っていた。

本論文は、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー源による発電装置が大量に導入されたスマートグリッドの安定性確保のための新しい制御系設計の方法を提案したものであり、特に、位相進み遅れ補償や PID (proportional-integral-derivative) 制御器という広く使用されている従来型の制御器のロバスト性と適応性を向上させる制御系設計法を考案しており、以下の優れた点を有する。

1. 既存設備に広く使用されている位相進み遅れ補償あ

るいは PID 制御器を使用することにより、制御器の交換・追加コストがかからず、運用者にも受け入れられやすい。

2. 各制御器は制御器周辺で入手できる情報に基づいて独立して系統モデルの推定を行い、これに基づいてロバスト安定性と減衰性が確保されるように制御器パラメータを調整する。このため制御器間の情報通信を必要とせず、系統規模の増大にも容易に対応できる。
3. モデルと実際との比較によって系統構成の変化を検出し、制御器パラメータを調整することによって、変化へ適応することができる。有意な変化検出時のみパラメータ調整を実施するため、頻繁なパラメータ調整が抑制される。また、パラメータの値を段階的に変更することにより、パラメータ急変による悪影響が抑制される。
4. 推定されたモデル群および対応して求められた制御器パラメータ群は記憶され、将来同様の状況が発生した場合は、これらを利用することによって付加的な計算を必要とせず即座の制御パラメータ切り替えが可能となる。
5. 提案された制御系設計手法の有用性は、課題が顕著に現れる典型的な状況を対象としたシミュレーションによって以下のように確認されている。小規模独立電力系統における風力発電出力・ディーゼル発電出力・蓄電池充放電の制御に適用した場合、既存制御系に比べて周波数動揺振幅を 8 分の 1 程度に減少させ、周波数安定性を大きく向上させることができている。また、長距離送電線で連結されている電力系統の発電機系統安定化装置に適用することにより、既存制御系では困難な低周波振動抑制を達成することができている。

以上要するに本論文は、既存制御器を活用し、そのロバスト性と適応性を強化することによって、再生可能エネルギー源の大量導入による電力系統の安定度低下と電力系統運転状態の大きな変化とに対処できる、電力系統安定化のための制御器の設計法を提案したものである。この成果は、電力供給の質を損なうことなく再生可能エネルギー源による発電装置の導入を促進することに貢献するものであり、電気電子工学上価値ある業績である。よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認める。

氏 名 張 鵬  
 学位記番号 シ情 博甲第 515 号 (学術)  
 学位授与の日付 平成 25 年 9 月 24 日  
 学位論文題名 Generation Scheduling for Supply and Demand Balancing in Power Systems with Renewable Power Generation  
 (再生可能エネルギー電源を含む電力系統における需給一致発電計画に関する研究)

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教 授 村田 純一  
 (副 査) " " 川邊 武俊  
 " " " 末廣 純也

論文内容の要旨

The installation of renewable power generation makes a good effort on reducing the emission of greenhouse gas. However, the outputs of some renewable generations are highly affected by nature condition, which contains the fluctuation and uncertainties. The conventional methods for dealing with the uncertainties of forecasts are to make the extra spinning reserves for controllable generators to fix the possible variation of power demand. However, in the case of high penetration of renewable power generation, the spinning reserves cannot always get ready for the variation of demand, and then the imbalance of power supply-demand happens more often. The supply-demand balance issue becomes more complicated. Therefore, this thesis aims to keep the supply and demand balance in power systems with renewable power generation, photovoltaic generations in particular. For this purpose, three issues are investigated in this thesis: the solar insolation prediction, the error estimation of solar insolation forecasts, and the economically optimal generation scheduling of controllable generators which are discussed in three chapters respectively.

First, this thesis improves the wavelet-based solar insolation prediction method which is one of the good prediction methods proposed so far. The prediction of renewable generation outputs is essential to schedule the controllable generators, so the prediction of solar insolation, which is the most important parameter to predict the outputs of photovoltaic generations, is addressed in this thesis. Given that some variables are well relevant in some time-frequency domains of solar insolation but are weakly relevant in other domains, we only use the well relevant time-frequency components of a certain input variable instead of its all time-frequency components to predict the value of solar insolation. The results of a comparison indicate that the

proposed method is more accurate than the method which uses the same input variables in all time-frequency domains. Therefore, selecting relevant input variables in different time-frequency domains independently is helpful to improve the accuracy of wavelet-based prediction method.

Second, this thesis puts forward the error estimation method, which can extract more useful information about the solar insolation from the input variables employed in the solar insolation prediction to complete the forecast results of solar insolation. The errors of solar insolation forecasts are unavoidable, and some of them are extremely big. However, no relevant researches have focused on estimating the errors yet. Given that some big errors concentrate in a certain interval of a variable, we extract the significant variables and areas to tell the big errors (positive and negative). The proposed error estimation method can provide the operators with what types of error the forecast is likely to have with high confidence. Since the big errors cause either large over expectation or large under expectation of PV outputs, the results of error estimation are useful for operators to identify the extreme situations which cause the large deviation of power.

Finally, this thesis proposes a useful strategy to deal with the uncertainties of forecasts of renewable generation outputs, which can achieve the economically optimal generation schedule with the less total cost compared with the conventional methods, which use the spinning reserves to prevent the possible imbalance incurred by the uncertainties of forecasts. The conventional methods minimize the operation cost with a constraint to guarantee that the operating generators can readily change their outputs to meet the net load demand variation. High penetration of renewable power generation makes it harder for operating generators to compensate the variation of forecasts. The events of supply-demand imbalance happen more often, and the shortage or excess of electric power should be compensated from the outside power systems. Therefore, in this research, the damage caused by possible supply-demand imbalance arising from the large uncertainties of forecasts of renewable generation outputs are evaluated by penalty which represents the necessarily additional cost to fix the imbalance. Due to the random nature of the forecast errors, the penalty is evaluated as an expectation. The optimal generation schedule is obtained by minimizing the summation of expectation of penalty and the operation cost. The proposal is validated by the simulation results.

### 論文調査の要旨

電力系統において、電力の質を維持するために、電力の

需要と供給は常時一致していなければならない。太陽光発電のように発電出力が気象条件の影響を受ける再生可能エネルギー電源が含まれる電力系統では、これら再生可能エネルギー電源の発電出力と電力需要とを予測し、それに応じて、出力が制御可能な発電機の発電計画すなわち発電機の運転・停止計画と発電出力計画とを立案しなければならない。このとき、予測誤差は避けられないため、誤差に対する適切な対処が重要となる。太陽光発電の場合、その出力予測は日射量予測に帰着される。正確な日射量予測を目指した研究は活発に行われてきているが、その予測誤差の推定はほとんど行われていない。一方、発電計画立案の従来手法では、実際の需要が予測よりも増大した場合に対処できるだけの発電機運転予備力すなわち出力増加余裕を確保した計画立案が行われていた。再生可能エネルギー電源が大量に導入されると、発電機出力減少余裕も考慮する必要が生じ、また、確保すべき増大余裕、減少余裕も従来よりも大きくなるため、これらに対処できる発電計画手法が望まれる。

本論文は、再生可能エネルギー電源、特に太陽光発電が大量に連系された電力系統を対象とし、需要と供給を一致させるための出力可制御発電機の発電計画立案手法と、そのために必要となる日射量予測手法を提案したものである。具体的には、再生可能エネルギー電源出力予測の誤差を考慮した需給一致のための発電計画立案、日射量予測の精度向上、日射量予測に含まれる誤差の大きさの程度の推定のそれぞれを行う手法を提案しており、それらは以下の優れた点を有している。

1. 発電計画立案時に、従来、計算の簡略化のために制約条件の一部を無視して行っていた最適発電機出力決定を、すべての制約条件を適切に考慮することによってより厳密に行う方法を開発している。
2. 発電機出力の増大余裕と減少余裕の両方を考慮しているため、発電計画立案時点で予測された必要発電量と実際の必要発電量に差異が生じても、一定範囲の差異であれば、差異の正負に関わらずそれを解消できる発電機出力調整能力を確保することができる。
3. 上記差異解消のために発電機調整能力を多く確保すると、対応できる差異は大きくなるが発電費用が増大する。本論文で提案している発電計画立案手法は、差異解消のために被る経済的損失と発電費用とを比較することにより、最適な発電計画を立案することができる。
4. 既存の優れた予測手法であるウェーブレットによる時間-周波数領域分割を用いた日射量予測手法において、気象情報の中から予測に真に必要な情報を過不足なく選択する方法を提案し、これによって、予測精度を向上させている。この精度向上は、国内に当てはめられた場合、標準的火力発電機 1 機相当の余分な起動費用

を削減する効果を持つ。

- 5. 気象予報を用いて日射量を予測する方法について、どのような条件下で大きな予測誤差が発生しやすいかを解析し、気象予報に基づいて予測誤差の階級を予測するルール群を導いている。これによって得られる予測誤差の階級の予測結果は、予測誤差を考慮した発電計画立案に有効利用することができる。

以上要するに本論文は、再生可能エネルギー電源を含む電力系統において、再生可能エネルギー電源出力が持つ不確実性に対処して、経済的に需給一致を達成することができる発電計画の立案手法を、これに必要な日射量予測手法も含めて提案したものである。この成果は、電力供給の質を損なうことなく再生可能エネルギー電源の導入を促進することに貢献するものであり、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（学術）の学位論文に値するものと認める。

本論文では、太陽光発電の出力予測について、第 2 章の個別地点における全天日射量の幅の予測手法、第 3 章の個別地点における全天日射量予測手法、第 4 章の広域における全天日射量予測手法、第 5 章の太陽光発電出力へ換算手法の順で述べる。以下に、研究の概要について述べる。

第 1 章では、研究の背景および概要について述べる。

第 2 章～4 章では、太陽光発電の出力と関係が深い全天日射量の予測手法について述べる。

このうち第 2 章では、個別地点における数日先の予測を目的とした全天日射量の幅の予測手法について述べる。数日先の予測は火力発電機等の周辺機器の準備や運転体制を整えるためのものであり、火力発電機等の運転台数が計画できることが重要である。よって、実績値が予測値に対しどの程度乖離する可能性があるかを考慮する必要がある。このため、予測を幅で表すことが重要であり、全天日射量の幅を予測する手法を提案する。予測の幅については、過去の全天日射量の実績値より算出した晴天指数の記述統計により求めている。具体的には、晴天指数を天気別に分類し、さらに天気別晴天指数の分布形状からベータ分布の歪度と尖度を用いて時期別に分類したものをパーセントイル法により予測の範囲（予測幅）を得ている。

第 3 章では、個別地点における翌日の予測を目的とした全天日射量予測手法について述べる。翌日の予測は、火力機の起動指令のタイミングを調整するためのものであり、予測精度が要求される。このため、数日先予測手法のように幅で表すのではなく、全天日射量の値を精度よく予測する手法を提案する。予測については、天気別・時期別に分割された実績データを、二進木を用いてさらに分割することで入出力間の関係を線形に近づけ、それぞれのデータセットに対し、因子分析により線形近似予測モデルを作成している。なお、晴天指数では日射の大気層を通過する距離の影響を除去できないため、予測精度を高める目的で補正日射到達率をあらたに提案し、晴天指数に代わり予測対象として用いている。

第 4 章では、入力データ数の低減やモデルの統合により予測の手間を省いた広域における全天日射量予測手法について述べる。電力系統の需給運用は、電力の供給エリア全体での需要と供給のバランスを保つものである。よって、電力の供給エリア全体に亘る太陽光発電の出力予測が必要となるが、太陽光発電設備の設置地点毎に出力を予測することは繁雑である。このため、電力の供給エリアを複数のグループで表し、グループの代表地点の全天日射量を予測することにより、広域の全天日射量を求めることで予測の手間を省いた、広域における全天日射量予測手法を提案する。入力データについては、日照時間データの相関分析や平均絶対偏差分析により天気が類似の地点同士をグルーピングすることで低減した。また予測モデルについても、全天日射量と他の気象項目との関係が類似のモデルを統

氏 名 野見山 史敏  
 学位記番号 シ情 博甲第 516 号 (工学)  
 学位授与の日付 平成 25 年 9 月 24 日  
 学位論文題名 電力系統の需給運用における太陽光  
 発電出力予測に関する研究

論文調査委員  
 (主 査) 九州大学 教授 村田 純一  
 (副 査) " " 末廣 純也  
 " " " 庄山 正仁

### 論文内容の要旨

近年、再生可能エネルギー発電設備の導入量が増えてきている。特に太陽光発電設備の導入量は急速に拡大してきている。太陽光発電の出力は、天候に大きく影響を受ける、電力系統の運用者からは制御ができない、などといった特徴があり、これら太陽光発電が電力系統に大量に連系されると、電力系統の需給運用に大きな影響を与える。本論文は、大量の太陽光発電が連系された将来の電力系統の需給運用において必要となる電力の供給エリア内の太陽光発電の出力予測について研究を行ったものである。

電力系統の需給運用においては、太陽光発電出力の予測値と実績値が乖離した場合にも、運用者自身がその要因を分析し、系統運用に反映させる必要がある。よって、誰にでも入手できる天気予報データを使用し、かつシンプルかつ容易な全天日射量予測手法の研究を行っている。さらに、電力の供給エリアを複数のグループで表し、得られた全天日射量予測値を用いて、広域の太陽光発電出力予測を行う手法の研究も行っている。

合し、予測精度を損なうことなくモデル数の低減を図っている。これにより、予測の負担を軽減している。

第 5 章では、全天日射量から太陽光発電出力を直接推定する太陽光発電出力の簡易換算法について述べる。全天日射量は水平面での値であるが、太陽光発電設備は傾斜して設置されており、この影響を考慮する必要がある。また、全天日射量を太陽光発電出力に変換するためには、太陽電池パネルやパワーコンディショナーの特性を考慮する必要がある。しかしながら、電力の供給エリア内すべての太陽光発電設備について、これらを反映することは困難である。このため、全天日射量から太陽光発電出力を直接推定する太陽光発電出力の簡易換算法を提案する。換算法については、全天日射強度と既設の太陽光発電設備の出力実績データの相関分析により換算の定式化ならびに換算係数を求めている。

第 6 章では、最後に本論文のまとめを記述している。

本研究では、全天日射量の幅および日射量の地点予測、地点予測から広域予測への展開、全天日射量から太陽光発電の出力への換算について、それぞれ手法の提案を行い、電力系統の実運用に適用できる太陽光発電出力予測手法とした。これにより、太陽光発電が大量に導入された将来の電力系統においても、電力の需給バランスを保ち、電力の安定供給の維持が可能となる。

## 論文調査の要旨

電力系統の需給運用の目的は、電力需要と発電出力の同時同量を保つために、発電出力の制御が可能な発電機の運転計画を適切に立案することである。適切な運転計画策定のためには、発電出力が制御不可能な太陽光発電などの発電装置の出力予測が不可欠である。特に、近年の太陽光発電の急速な普及によって、その適切な出力予測はますます重要な課題となってきた。太陽光発電出力予測とその前段となる日射量予測については近年活発な研究がなされているが、詳細な気象情報を利用し、単一地点における値を複雑なモデルを用いて高精度で予測することに力点が置かれている。しかし、完璧な予測を行うことは不可能であり、電力系統運用者は、予測が誤差を持つことを前提として誤差への対処を行う必要がある。このため、太陽光発電出力を単一値ではなく高確率で起こりうる値の範囲として予測すること、および、予測値と実績値が乖離した場合にも運用者自身がその要因を分析し系統運用に反映させることが可能である複雑過ぎない予測手法であることが強く望まれる。さらに、電力供給地域は気象状況の異なる広がりをもった地域であり、単一地点だけではなく広域の太陽光発電出力予測を行うことが必要である。

本論文は、大量の太陽光発電が連系された電力系統の需給運用において必要となる電力会社供給地域内の太陽光発電の出力予測を行うために、上述の要請に応えられる全

天日射量予測手法とそれを踏まえた太陽光発電出力予測手法を提案したものであり、以下の優れた点を有している。

1. 気象予報値が不確かな数日先の全天日射量を対象として、気象および日射量データの統計的解析に基づいて、単一の値ではなく高確率で発生する値の幅として予測値を算出する方法を開発している。
2. 翌日の全天日射量予測を行う際に、太陽光の大気中通過距離を考慮した補正日射到達率を新たに提案し、従来用いられていた晴天指数よりも効果的に太陽高度の影響を把握することに成功している。
3. 翌日の気象予報から全天日射量を予測する際に、データ分割と因子分析を利用することによって、電力系統運用者にも理解しやすい線形モデルによる予測を可能としている。
4. 多数地点の日射量予測を統合して広域の予測を行う際に、全地点それぞれに個別の予測モデルを用いるのではなく、地点間の気象の類似性を解析することにより、考慮する地点の個数および使用する予測モデルの個数を、予測精度を低下させることなく削減し、予測に使用するデータ入手、予測値計算、結果検証の労力を低減させている。
5. 上記 2. から 4. の組合せによって、平均で最大日射量の 5% 程度の予測誤差を達成している。これは、太陽光発電設備容量が 600 万 kW 程度の電力系統においては、需給調整に用いられる標準的な火力発電機容量の半分に相当し、したがって、提案手法は、この規模の電力系統において、前日立案した火力発電機運転計画を当日に変更する必要が生じない、実用上十分な予測精度を達成している。
6. 全天日射量から太陽光発電出力への換算を、太陽光発電装置の設置条件を網羅的に把握することなく実用的な精度で行う手法を導いている。

以上要するに本論文は、電力系統の需給運用に不可欠であり、かつ、近年の太陽光発電の急速な普及によってますます重要度が増大してきている太陽光発電出力予測を、電力系統運用者の実務上の要請に応えつつ実施する方法を開発、提案したものである。この成果は、今後の太陽光発電大量導入時において良質の電力を安定的に供給するための電力系統の運用に貢献するものであり、電気電子工学上価値ある業績である。よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認める。

氏 名 余 開江  
学位記番号 シ情 博甲第 517 号 (学術)

学位授与の日付 平成 25 年 9 月 24 日  
 学位論文題名 A Design Method of Nonlinear  
 Real-Time Optimal Controllers to Save  
 Energy for Hybrid Electric Vehicle and  
 Plug-In Hybrid Electric Vehicle  
 Powertrains  
 (ハイブリッド電気自動車とプラグイ  
 ンハイブリッド電気自動車パワートレ  
 インの非線形実時間最適化省燃費コン  
 トローラの一設計法)

## 論文調査委員

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

## 論文内容の要旨

In recent years, more efficient and cleaner energy utilization technology has become a research hotspot due to the rising prices of fossil fuels and environmental problems. The problems have led to the development of hybrid electric vehicles (HEVs) and plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs). In this context, population of HEVs and PHEVs (referred as hybrid vehicles later) is growing. HEVs consist of the traditional internal combustion engine, the battery, and the motor/generator as their powertrains. The difference of HEVs and PHEVs is that PHEVs have an enlarged battery pack and can charge the battery using electricity from an electric grid with a plug. Hybrid vehicles can regenerate the dissipation kinematic energy during deceleration and use the redundancy that the internal combustion engine and the motor/generator can provide energy at the same time to save energy. A properly controlled hybrid vehicle having the redundancy can reduce fuel consumption compared with that using a conventional internal combustion engine vehicle (ICEV). However, the engine optimal operating point depends on the property of the engine, the surrounding traffic conditions, the road slopes till the destination, and so on which change every moment. Also, if the battery is operated beyond the battery state of charge limits, this will lead the battery degradation and affect the battery longevity. There are two kinds of conventional controllers for hybrid vehicles which are the rule-based controller and the feed forward type controller. The rule-based controller can keep the battery state of charge between the thresholds; however it cannot guarantee the optimality of fuel economy. The feed forward type controller optimizes the operating points of the powertrain given the driving profile. In this dissertation, the nonlinear real-time optimal controller is proposed to cope

with the above difficulties.

The proposed method can optimize both the engine operating points and the driving profile simultaneously. Though the hybrid vehicle powertrain is nonlinear, the proposed nonlinear real-time optimal control approach can modify the optimal driving profile considering surrounding vehicle driving conditions every sampling interval. The 30%-50% of fuel economy improvements is realized by the proposed approach. This dissertation improves HEV/PHEV energy management research by adding three main novel contributions. First, using the HEV/PHEV property, the desired battery state of charge is designed according to the road slopes for better recuperation of free regenerative braking energy. Second, the battery state of charge at the instant of reaching the destination can be specified to utilize the remaining battery charge as a home power source. Third, the vehicle spacing is kept above the minimum value, and this gives the freedom of control for vehicle speed variety to get better fuel economy. The topic is addressed in three phases according to the model types.

First, the existing model of hybrid vehicles that models the dynamics of the battery is used to confirm the fuel economy improvements. Considering the HEV physical constraints: the battery state of charge bounds and the vehicle speed limit beforehand makes the optimization and the fuel improvements trustworthy. The desired battery charge/discharge profile is obtained using the proposed approach. The optimal power-split between the engine and the battery is obtained.

Second, the plant models of the battery, the engine, and the motor/generator are developed in this research. These models are proposed to optimize both the engine operating points and the driving profile considering the engine dynamics, the battery dynamics, and the vehicle dynamics with HEV physical constraints: the speed and torque limits of the engine and motor/generators.

Third, the proposed method is extended when the driving distance is unknown using the existing model of hybrid vehicles. There are two kinds of control strategies for PHEVs: charge depletion and all-electric charge depletion followed by charge sustenance. The fuel economy improvements for the PHEV are confirmed with driving distance uncertainty in reality using the proposed all-electric charge depletion followed by charge sustenance control method. The proposed controller can be constructed without the trip distance information which is required in the control method above.

In total, this dissertation proposed a nonlinear real-time

optimal control algorithm for energy management in HEVs and PHEVs. The main contribution is a systematic real-time optimal control approach for energy management in HEVs and PHEVs using the information of future road loads. This systematic design process is useful for significant fuel economy improvements in the energy management control unit application without improvements of powertrain hardware. The conclusion is that the nonlinear real-time optimal control approach has effectiveness for the energy management problem of the HEV/PHEV system.

### 論文調査の要旨

環境問題や省エネルギー化に対する社会的要求から、自動車の内燃機関に 2 次電池と電動機とを組み合わせたパワートレインを搭載するハイブリッド電気自動車 (HEV) や、HEV の 2 次電池を外部電源で充電可能としたプラグインハイブリッド電気自動車 (PHEV) が近年製品化されており、今後、自動車の主流になるとの観測がある。XEV (以後、HEV と PHEV を XEV と総称する) は、減速にともなう車体運動エネルギーの回生が可能であり、必要なパワーを内燃機関もしくは 2 次電池—電動機で発生させる冗長性を有している。しかし XEV の内燃機関が低効率の動作点で運転される機会が少なくなるよう制御すれば、従来車両を燃費性能で凌駕することができる。しかし、XEV のパワートレインは強い非線形性を有しており、さらに、最適な動作点は、内燃機関の特性、周囲の車両の走行状態、目的地までの勾配・道路形状などの要因により時々刻々変化する。XEV の燃費性能向上には、内燃機関と 2 次電池—電動機の動作点をマネジメントする制御が必須である。さらには、2 次電池の蓄電率 (SOC) が所定範囲を逸脱すると 2 次電池は急速に劣化すること、電動機、内燃機関は回転数制限を超えて回転すると破壊に至ることを考慮して制御する必要がある。これまでに、マネジメント制御法として SOC をフィードバックするルールベース制御法が提案されているが、燃費は最適化される余地が残されていた。他に、出発地点から目的地までの速度パターン (ドライビングサイクル) を既知として、最適制御問題に定式化するフィードフォワード制御法が提案されているが、一度最適化された動作点は、交通条件の変化に対応できないことが問題であった。また、前方に車両が走行している場合、従来は、前方車との車頭時間 (車間距離を車速で割った値) を一定とする制御法が主流となっていた。この車間距離制御では、自車両の速度は前方車に支配され燃費向上の余地は少なかった。

これら従来の制御法に対し、本論文は以下の特長を有する制御法を提案した。

1) 近年、道路形状のデジタルマップ化が進んでいる。そこで、出発地点から目的地までの道路形状情報を利用

し、ドライビングサイクルと、XEV のパワートレイン動作点とを目的地までの経路に応じて同時最適化する最適制御問題を定式化した。ここで生成される最適なドライビングサイクルは、前方車がある場合、正確に実行できない可能性があるため、最適制御問題から実時間最適化モデル予測制御則を導出し、前方車の動きに応じてドライビングサイクルを最適に修正することを可能とした。同時最適化問題を定式化するために、あらたにパワートレイン回転系の動特性を表現した非線形パワートレインモデルを開発した。

2) 車間距離が所定の最小値を下回らない条件の下で自車速度の変動を許容する制御方法を考案した。すなわち、自車速度を最適化の対象に含め、前方車の存在下で XEV の燃費向上を可能とした。

3) SOC と内燃機関および電動機の回転数とを設計した範囲に制限したうえで、パワートレイン動作点およびドライビングサイクルの同時最適化を可能とした。

4) 自動車の目的地は変更される可能性がある。PHEV の目的地が変更される場合に、SOC を合理的に制御する方針が示されている。本制御法でこの制御方針を実行すると、従来制御法より効果が大きいことを示した。

以上の特長を有する本制御法を用いると、典型的な交通条件において、HEV、PHEV いずれの場合にも従来制御法に比べ 30% から 50% 燃費が向上することを計算機シミュレーションで検証した。

以上要するに本論文は、最適制御問題から実時間最適化モデル予測制御則を導出し、XEV の燃費を大幅に向上させる制御系設計法を明らかにしており、電気電子工学上価値ある業績である。よって、本論文は博士 (学術) の学位論文に値するものと認める。

氏 名 Mohammad Anisuzzaman  
学位記番号 シ情 博甲第 518 号 (学術)



学位授与の日付 平成 25 年 10 月 31 日  
 学位論文題名 Study of Orientation Rotation in  
 Rapid-Melting Growth of  
 Ge-on-Insulator  
 (急速溶融法を用いた絶縁膜上のゲル  
 マニウム結晶成長における回転機構に  
 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

Over the last fifty years, the performance of Si based microprocessors has been improved continuously through device shrinkage and improving device architecture. However, Si transistor performance is fundamentally limited by the carrier mobility. Furthermore, the Si transistor is shrunken into the nanometer scale where maintaining transistor operation becomes exponentially difficult. In these circumstances, implementation of high mobility semiconductors for next generation large-scale integrated circuits (LSIs) has become essential, and significant research efforts are being exerted for such ends.

The main purpose of this work is to develop orientation stabilized Ge-on-insulator (GOI) using the rapid melting growth (RMG) process. The previously reported work on the RMG method was focused on fabricating high-quality large-area Ge strips, e.g., achieving 3  $\mu\text{m}$  x 1 cm strips with a thickness of 100 nm. However, till date no demonstration has been done on the nanofabrication of GOI using RMG. As a result, the nanofabrication process of GOI structures using the promising RMG method should be developed. It is expected that growth characteristics and crystal quality will have a significant dependence on the fabrication process and structural dimensions. Hence, the crystal characteristics should be extensively analyzed.

A major problem of the RMG technique is the rotation of crystal orientation along the strip length in the growth of (111) oriented Ge in  $\langle 112 \rangle$  crystallographic direction. Recent development in Ge transistors has shown that the electron mobility shows a strong dependence on crystal orientation. It was demonstrated that the effective electron mobility in a (111) Ge channel is 1.5 times higher than that in (100) oriented channel. Therefore, it is important to obtain orientation stabilized (111) GOI.

Under such background, a formation technique of orientation stabilized GOI has been developed for realization

of next-generation LSIs. This dissertation consists of five chapters. Contents of respective chapters are briefly described below.

Chapter 1 summarizes the background, the objective, as well as an outline of this study.

In chapter 2, the nanofabrication process of GOI by RMG and the crystal characteristics of (100) oriented Ge nano-strips are presented. Here, dependence of the growth characteristics and crystal quality on Ge strip dimensions is discussed. It is demonstrated here that thickness reduction of Ge strips tends to produce orientation instability. It is also shown that narrowing of strips is effective in suppressing the unstable growth. It is found that narrowing of Ge strips can improve growth characteristics, thereby growth of high crystal quality thin GOI structures becomes possible.

Chapter 3 presents the results of the effort to obtain orientation stabilized growth of GOI from (111) seed. In this work, the knowledge of orientation stabilization by narrowing of strips, as learned from the work on (100)-GOI nanofabrication, was employed. Successful stabilization of crystal orientation in thick (100 nm) and thin (50 nm) (111)-oriented GOI strips with any growth directions by strip-narrowing has been demonstrated. Here, a strong dependence on growth direction is also found. Crystal characteristics are presented in detail in order to understand the cause of orientation instability and how stability is obtained by narrowing.

Chapter 4 is the detailed analysis of crystal characteristics of rapid-melting grown Ge in order to find the physical process of rotation and the reasons behind the observed effects of thinning and narrowing of strips. Here, various propositions on the explanation of the process are examined. A comprehensive model to explain the process based on introduction of local-strains by Si-diffusion and relaxation of the local-strains at strip-edges is presented in this chapter.

The concluding remarks are given in Chapter 5.

## 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るゲルマニウム(Ge)をチャネルに用いたトランジスタ技術の研究開発が活発化している。Ge トランジスタを融合した次世代 LSI を実現するには、Si 基板上に絶縁膜を介し、結晶方位の制御された極薄 Ge 結晶膜(膜厚 $\leq 50\text{nm}$ )の微細構造

を高品位形成する手法の創出が必須となる。

最近、絶縁膜上に高品質な単結晶 Ge 細線(膜厚:約 100nm, 幅:2~5 $\mu$ m)を形成する手法として、Si 基板をシードとして用いる横方向急速溶融法が開発された。しかし、この手法を極薄膜(膜厚 $\leq$ 50nm)に適用した報告はなく、極薄化した Ge の成長様態を明らかにする必要がある。

本研究は、次世代 LSI の実現を目指して、急速溶融法による絶縁膜上の Ge 成長に与える形状因子(膜厚,細線幅)の影響を検討すると共に、結晶方位の回転現象を抑制する手法を明らかにしたものである。

本研究で得られた成果は、以下の点で評価できる。

1. Ge 細線の溶融成長プロセスを構築すると共に、Si(100)シードからの Ge 成長様態に与える膜厚および線幅の影響を検討した。その結果、Ge 細線の極薄化に伴い、結晶方位が(100)から乖離する回転現象が発現することを明らかにした。さらに、この回転現象は、Ge 細線を狭小化( $\leq$ 0.5 $\mu$ m)することで、抑制できることを見いだした。

2. Si(111)シードからの成長では、成長方向を<112>とすると、結晶方位が成長と共に変化する回転現象が報告されており、(111)成長の安定性向上が課題であった。前項で得られた知見をもとに、Si(111)シードからの溶融成長で生じる回転現象を抑制するため、Ge 細線の狭小化効果を検討した。その結果、線幅を 0.2 $\mu$ m 以下とすることで、<112>方向への成長でも方位変化のない Ge(111)結晶細線が得られることを明らかにした。さらに、Ge 膜厚を減少すると、厚膜では回転現象の生じなかった<110>方向への成長でも、結晶方位が不安定化した。線幅を狭小化( $\leq$ 0.5 $\mu$ m)することで安定な(111)成長を実現した。

3. Ge の溶融成長における結晶方位の回転現象の起因と、狭小化による抑制機構を検討した。その結果、シード基板からの Si 拡散により導入された格子歪みが誘起するらせん転位に起因して、Ge 格子の回転が発現すると結論すると共に、細線端部における局所的な格子歪みの緩和と成長フロントでの格子面間結合の強度を考慮したモデルを提案し、現象を統一的に解釈した。

以上要するに本研究は、急速溶融法を用いた絶縁膜上の Ge 成長における回転機構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有用と期待される極薄 Ge 結晶膜の高品位形成を実現したもので、電気電子工学上価値ある業績である。よって本論文は博士(学術)の学位に値するものと認める。

学位授与の日付 平成 25 年 10 月 31 日  
学位論文題名 DEVELOPMENT OF FBAR BASED ULTRA LOW PHASE NOISE RADIO FREQUENCY OSCILLATOR  
(超低位相雑音高周波 FBAR 発振器の開発)

論文調査委員

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

## 論文内容の要旨

Wireless communication applications such as mobile, wireless sensor network and wireless local area network, have an explosive growth in recent years. With the rapid growth, the requirement of low cost, high performance, extremely low power and high integration radio frequency (RF) integrated circuits (RFIC) is also increasingly higher. In the past decades, complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS), a low cost technology for constructing integrated circuits (IC), has been employed by RFIC researchers and a number of high integration RFICs such as RF transceivers which integrate phase lock loop (PLL) or voltage controlled oscillators (VCO), filter, mixer, power amplifier (PA), low noise amplifier (LNA), variable gain amplifier (VGA), analog to digital converter (ADC), digital to analog converter (DAC), and have both transmission and receiving functions, have been designed successfully.

However, despite the characteristics of low cost, high integration, CMOS technology also reveals thin metals, high loss substrate disadvantages, which brings challenges in the design of high quality (Q) factor inductors and filters, low phase noise VCO, and high efficiency PA.

In recent years, micro electro-mechanical systems (MEMS) technology has become a new solution to compensate the demerits of CMOS. High performances RF-MEMS devices, such as RF-MEMS switches, variable capacitors, filters, resonators and have been reported and several approaches for integrating MEMS with CMOS have been published, which makes monolithic MEMS-CMOS RFIC possible and become the trend of development of RFIC in the future.

Oscillators which are used to generate local oscillation signals such as voltage controlled oscillator or to generate reference frequency signals such as quartz crystal oscillators are one of the most important building blocks of RF transceivers. To realize a high performance RF transceiver, a high accuracy frequency reference and a VCO which has the

氏 名 張 国強  
学位記番号 シ情 博甲第 519 号 (学術)

features of low phase noise, low power consumption and small area are required. For frequency reference, quartz crystal oscillators are usually adopted as the low phase noise and high accuracy. But the frequency of quartz crystal oscillators is very low and they cannot be integrated because of the incompatibility of the silicon substrate and the large size of quartz crystal. For VCOs' design, two main topologies, which are usually adopted, is inductor-capacitor (LC). However, since the low quality (Q-) factor of on-chip inductors, the phase noise of LC-VCOs has always been an issue, normally about  $-120 \sim -130$  dBc/Hz at 1 MHz offset frequency. Thus, it is necessary to find other solutions to create a kind of oscillators which have low phase noise that consumes extremely low power and is able to be integrated with CMOS technology.

Film bulk acoustic resonators (FBAR) have very high Q-factor around 1000 or even more. Using them to replace the low Q-factor on-chip inductors to design low phase noise GHz-range oscillators, has been of great interest and some FBAR-oscillators which have low phase noise around  $-140$  dBc/Hz at 1 MHz offset frequency is able to obtain by some published papers. Based on the introduces above, it can be shown that FBAR-oscillators have the potential to satisfy the low phase noise and integration requirement, but the challenges to design FBAR-oscillators are multi-frequency, differential output, the further improvement of phase noise, low frequency instability and monolithic integration. The low phase noise potential and those challenges give the motivation for this research.

In the beginning of this thesis, the demand of low cost, high performance and high integration of RFIC and the poor phase noise and high power consumption of the normal Ring-oscillator and LC-oscillator are emphasized. In order to solve these problem of current oscillator, researcher are trying using high Q-factor FBAR resonator to design low phase noise oscillator. Then the structure and equivalent circuit model of FBAR and the oscillator theory including Barkhausen criteria, negative resistance and phase noise model which can also be used in FBAR oscillator are presented to provide the theoretical foundation of FBAR oscillator design. In the realization of FBAR oscillator, at first the Pierce FBAR-DCO and the inverter based FBAR-DCO are designed because of the simplicity in design. The oscillation condition of these two FBAR-DCOs is analyzed and the simulation result demonstrates that the FBAR-DCO is able to obtain a phase noise which is 20 dB lower than the phase noise of normal LC-oscillator. Then the second kind of FBAR-VCO in this thesis employed cross-couple architecture.

Two methods to mitigate low frequency instability are proposed, which the first method employs a capacitor and while the other one employs a series inductor-capacitor. By considering the effect of transistors' size on the Q-factor and impedance of FBAR, excellent phase noise and high loop gain are obtained. Furthermore, based on the designed cross-coupled FBAR-VCO core, a multiband FBAR-VCO operating at 0.65 GHz, 0.98 GHz, 1.96 GHz and 3.92 GHz is presented. Although the traditional divider and multiplier are employed, the possibility of a multiband VCO using FBAR-VCO as a core circuit has been developed. Finally, in the last part of this thesis conclusion, new applications of the developed FBAR-VCO and recommendation for future works are summarized.

### 論文調査の要旨

低位相雑音・微小消費電力圧電薄膜共振子(FBAR: Film Bulk Acoustics Resonator)を用いた発振器は、バッテリーレス無線センサネットワークの実現に繋がる最先端 LSI システムの開発に不可欠な素子であり、世界的にも注目されている。従来のインダクタ (L) ・キャパシタ (C) 型発振器 (LC-VCO) にはチップ内の L が不可欠であるが、その L の損失が大きいと、クオリティファクタ (Q 値) は低い。LC-VCO の位相雑音は、L の Q 値及び発振回路の消費電力に依存してしまうため、微小電力で動作できる超低位相雑音発振器の実現は不可能であった。上述の問題を解決するため、近年 FBAR を用いた超低位相雑音発振器の開発が進められているが、FBAR の Q 値は、オンチップ L の Q 値より 50-200 倍も高くなるため、所望の共振周波数より低い周波数領域で寄生共振が発生するという問題が報告されている。また、FBAR を Si 基板上に直接集積する問題が解決できず、ボンディングワイヤーで接続する例が数多く報告されている。

本論文は、上述した問題を解決し、微小電力で動作する超低位相雑音発振器を試作し、実験結果と比較することによって設計理論を確かめるとともに、複数の周波数帯で信号を発生させるマルチバンド発振器の開発の際にマルチバンド化が位相雑音に与える影響を調べた成果についてまとめたものである。

本研究で得られた成果は、以下の点で評価できる。

1. 超低位相雑音・微小消費電力発振器の設計において所望の周波数より低い周波数領域で発生する寄生共振を無くすために、並列キャパシタによる新たな手法を提案している。
2. 提案した手法を用いて 1.9GHz 帯 FBAR 発振器を設計し、提案した設計理論を理論上及びシミュレーションで確かめている。更に、 $0.18 \mu\text{m}$  CMOS 技術のウエハーに FBAR をボンディングワイヤーで接続するの

ではなく、直接集積し、FBAR-VCO を試作し評価している。

3. FBAR 発振器の位相雑音がキャリア周波数から 1MHz 離れた周波数において-151dBc/Hz、消費電力が 1mW 以下、及びフィギュアオブメリット(FoM: Figure of Merit)が-215dBc 以下であり、これまで提案された FBAR-VCO より位相雑音が 5dB 改善出来ている。このような性能は世界初の性能である。
4. FBAR 発振器をマルチバンド化する設計手法を世界で初めて提案し、4 つの周波数帯(0.65GHz,0.98GHz,1.96GHz,3.92GHz)で動作するマルチバンド化が位相雑音及び FoM に与える影響を理論的及びシミュレーションで確認している。

以上のように、FBAR を用いた超低位相雑音発振器設計手法を提案するものである。更に、CMOS ウエハー上への FBAR の集積化に成功することによって超低位相雑音を有する発振器を開発するとともにその優れた実用性能を実証したもので、電気電子工学上価値ある業績である。よって本論文は博士（学術）の学位に値するものと認める。

-----