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

学位論文審査報告

種子田，賢宏

徐，軼超

赤山，聖子

Seddiq, Adel Mohamed Abdulrahman Alabbasi

他

https://hdl.handle.net/2324/1566230

出版情報：九州大学大学院システム情報科学紀要. 21 (1), pp.7-27, 2016-01-28. Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University
バージョン：
権利関係：

学 位 論 文 審 査 報 告

氏　　名　　種子田　賢宏
学 位 記 番 号　　シ情　博甲第 557 号（工学）
学位授与の日付　　平成 27 年 5 月 31 日
学 位 論 文 題 名　　希土類系高温超電導線材の中間層自己配向機構の解明と高性能線材への展開
論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　木須 隆暢
（副　査）　〃　〃　岩熊 成卓
〃　〃　〃　金子 賢治

論 文 内 容 の 要 旨

高温超電導線材は、省エネルギー化・CO_2 削減や先進医療に大きく貢献できる技術として、送電ケーブルや医療用 MRI 等への応用が期待されている。中でも、希土類系高温超電導線材はコンパクトな断面積で大電流を流すことができ、使用可能な温度・磁場範囲が他の超電導線材に比べて広い特徴を持つことから精力的に開発が進められている。希土類系高温超電導線材は薄くフレキシブルなテープ状の金属基板の上に中間層と呼ばれる複数材料の多結晶薄膜、希土類系高温超電導材料（超電導層）、および銀等の安定化層を積層することで作られる。高い超電導特性を得るためには超電導層の結晶粒をテープの面内・面外方向の 2 軸に高度に配向させることが必要であり、そのために超電導層の下地となる中間層最表面の結晶粒を高度に配向させた上で超電導結晶粒をエピタキシャル成長させている。

線材性能を左右する重要な基盤技術として、中間層の膜厚増大とともに面内のずれ角度□の分布幅である□□が自発的に低減する自己配向現象の応用が挙げられる。実際に高温超電導線材製造プロセスとして応用されているものとしては、1）基板を傾斜させて成膜することで結晶成長の異方性によって結晶粒が自発的に 2 軸配向する Inclined Substrate Deposition（ISD）法や 2）成膜中に薄膜に対しイオンビームを照射することで強制的に 2 軸配向させるイオンビームアシスト蒸着（Ion Beam Assisted Deposition, IBAD）法によって下地材料を配向させた上に CeO_2 を積層し、CeO_2 結晶粒の自己配向現象によって高速に高配向化させる手法がある。特に、後者は、国内外の線材メーカによって既に商用生産のためのプロセスとして広く用いられている。しかしながら、ISD 法は基板を傾斜させて成膜することに伴い、基板法線に対して結晶の特定の方位が傾いてしまう望ましくない現象（チルト）が発生する問題がある。一方、IBAD 法と組み合わせられる CeO_2 結晶粒の自己配向現象は発現機構がよく分かっておらず、最適な線材製造プロセスが確立できていない実用上の問題がある。

本研究ではこれらの課題に対し、希土類系超電導線材の中間層の ISD 法における結晶粒チルトの低減や CeO_2 結晶粒の自己配向現象が発現する素過程を材料の微細組織観察と結晶粒配向性測定により明らかにすることで、結晶粒の高配向化による超電導線材の性能向上や高速製造につなげることを目的とした研究を行った。ISD 法による YSZ 結晶粒の自己配向現象について検討し、基板法線方向に対して YSZ の<100>方向がチルトする問題については、設計膜厚の半分に達したら原料を反対側から入射する Reverse ISD（RISD）法を開発し、ISD 法の高速成膜性を維持しつつチルト角が低減できることを示した。また、IBAD-MgO と CeO_2 結晶粒の自己配向の組み合わせにおいて、下地と CeO_2 結晶粒配向との関係を材料学的な微細組織観察によって詳細に調べ、CeO_2 結晶粒の自己配向現象に関する基本的な機構を新しく提案した。さらに、これらの知見を線材製造プロセスへと反映することによって、従来比で「結晶粒の高配向化」については45%、「結晶粒配向の高速化」については 69%改善した。これらは CeO_2 結晶粒の高配向化により従来と同等の膜厚で、より高特性の超電導線材を作製したり、現状と同等品を作製するための時間を約 1/3 に短縮したりすることにつながる工学的な価値がある成果である。また、CeO_2 結晶粒の高配向領域で得られた線材試料は、従来に比べ優れた臨界電流密度特性を有する事を示し、磁場下の電流輸送特性の解析結果より、CeO_2 結晶粒の□□低減は、超電導層の厚膜化において問題となる異方位の結晶粒の抑制に有効であると考えられることを明らかとした。

本論文は次の 6 章からなる。

第 1 章では、序論として本研究の背景と目的を述べた。

第 2 章では、実験方法について述べた。すなわち、ISD 法と IBAD 法に CeO_2 自己配向を組み合わせた線材製法について述べると共に、本研究で適用した材料評価方法、臨界電流評価方法についてまとめた。

第 3 章では、希土類系超電導線材の中間層の自己配向現象に関する研究について述べた。透過型電子顕微鏡によるナノメートルオーダーでの微細組織観察から、隣接する CeO_2 結晶粒間の競合成長で膜厚増加とともに優先的に成長する結晶粒は、面外方向の結晶粒のずれ角度 ω が小さい特徴があることを世界で初めて見出した。X 線回折により ω を変えて CeO_2 結晶配向性を測定したところ、面内のずれ角度 ϕ との間に相関があり、この相関は下地の IBAD-MgO 層に起因することも世界で初めて発見した。これらの観察結果をもとに、CeO_2 結晶粒の自己配向現象は膜厚増加とともに面外方向の結晶粒のずれ角度□の小さ

な結晶粒が優先成長し、ϕ-ω相関により結果として$\Delta\phi$が低減するという基本的な機構を新しく提案すると共に、CeO_2結晶粒の自己配向現象を制御する因子の一つは、下地のMgO結晶粒の配向性であることを明らかにした。

第4章では、第3章の知見に基づき、IBAD法とCeO_2自己配向の組み合わせにおいて、IBAD-MgO層の結晶粒高配向化により、CeO_2の結晶粒の高配向化、および結晶粒配向の高速化を行った結果について述べた。IBAD-MgO層の結晶粒の高配向化を行うことでCeO_2結晶粒の高配向化と、目標とする$\Delta\phi$に到達するまでの製造時間の短縮に成功した。

第5章では、第4章で行ったCeO_2の結晶粒高配向化が希土類系超電導線材の特性に及ぼす影響について評価した結果について述べた。これまでにない高配向領域に達したCeO_2結晶粒の高配向化が臨界電流特性に及ぼす影響を評価し、臨界電流密度の向上を確認した。

第6章は結論であり、本研究の総括と今後の課題について述べた。

論 文 調 査 の 要 旨

希土類系高温超電導線材は，コンパクトな断面積で大電流を流すことができ，使用可能な温度・磁場範囲が他の超電導線材に比べて広いことから，電力ケーブルや医療用MRIなどへの応用が期待されており，省エネルギーや先進医療に大きく貢献できる技術として国内外で精力的な開発研究が進められている。希土類系高温超電導線材は，薄くフレキシブルなテープ状の金属基板の上に中間層と呼ばれる複数材料による多結晶薄膜，希土類系高温超電導薄膜（超電導層），および銀等の安定化層からなる積層構造を有する。優れた超電導特性を得るためには，超電導層の結晶粒をテープの面内・面外方向の2軸に高度に配向させることが必要であり，そのために下地となる中間層最表面の結晶粒を高度に配向させた上で，超電導層をエピタキシャル成長させている。

線材性能を左右する重要な基盤技術として，製膜時に膜厚の増大とともに面内の結晶方位が自発的に揃う自己配向現象の応用が挙げられる。実際に高温超電導線材製造プロセスとして用いられているものとしては，1）基板を傾斜させて成膜することで結晶成長の異方性によって結晶粒が自発的に2軸配向する傾斜基板成膜（Inclined Substrate Deposition: ISD）法や2）成膜中に薄膜に対しイオンビームを照射することで強制的に2軸配向させるイオンビームアシスト蒸着（Ion Beam Assisted Deposition: IBAD）法によって下地材料を配向させた上にCeO_2を積層し，CeO_2結晶粒の自己配向現象によって高速に高配向化させる手法がある。特に，後者は，国内外の線材メーカによって既に商用生産のためのプロセスとして広く用いられている。しかしながら，ISD法は基板を傾斜させて成膜することに伴い，基板法線に対して結晶の特定の方位の傾きが発生する問題がある。一方，IBAD法と組み合わせられるCeO_2結晶粒の自己配向現象は発現機構がよく分かっておらず，最適な線材製造プロセスが確立できていない。

本研究ではこれらの課題に対し，ISD法における中間層の結晶粒傾斜角の低減や，CeO_2結晶粒の自己配向現象が発現する素過程を，材料の微細組織観察と結晶粒配向性測定により明らかにすることで，中間層の高配向化による超電導線材の性能向上や高速製造技術の確立に取り組んだ。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）ISD法によるイットリア安定化ジルコニア（Yttria-Stabilized Zirconia: YSZ）結晶粒の自己配向現象について検討し，基板法線方向に対してYSZの<100>方向が傾斜する問題について，設計膜厚の半分に達したら原料を反対側から入射するReverse ISD法を開発し，ISD法の高速成膜性を維持しつつ傾斜角が低減できることを示した。

（２）IBAD法によって得られた配向MgO層上のCeO_2結晶粒の自己配向現象について，透過型電子顕微鏡によるナノメートルオーダーでの微細組織観察から，隣接するCeO_2結晶粒間の競合成長によって膜厚増加とともに優先的に成長する結晶粒は，主配向軸の面外方向のずれ角度・が小さいことを世界で初めて見出した。また，X線回折を用いた詳細な解析により，面内のずれ角度・と・との間に相関があり，この相関は下地のMgO層の配向性に起因することも世界で初めて発見した。

（３）（２）の知見をもとに，CeO_2結晶粒の自己配向現象に関する基本的な機構を提唱すると共に，線材製造プロセスに反映し，結晶粒の高配向化については従来比で・・・，結晶粒配向の高速化については69%向上させ，従来と同等の性能の基材を得るための時間を約1/3に短縮することに成功した。さらに，得られた線材の電流輸送特性の解析結果より，CeO_2結晶粒の面内配向性の向上は，超電導層の厚膜化において問題となる異方位の結晶粒の形成を抑制する効果があり，線材の電流容量増大に有効であることを明らかとした。

以上要するに，本論文は，希土類系高温超電導線材における高配向中間層を実現する上で基盤となる自己配向現象の基本的な機構を明らかにすると共に，線材製造プロセスへと展開し，高速製造と線材性能の向上を実現したものであり，電気電子工学に寄与するところが大きい。よって，本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認める。

氏　　名　徐　軼超
学位記番号　シ情　博甲第 558 号（学術）
学位授与の日付　平成 27 年 9 月 25 日
学位論文題名　Light Field Vision for Transparent Object Recognition
（透明物体認識のためのライトフィールドビジョン）
論文調査委員
（主　査）　九州大学　准教授　長原　一
（副　査）　〃　教　授　谷口 倫一郎
〃　〃　〃　倉爪　亮

論文内容の要旨

The object recognition task in computer vision system is to detect or identify objects in an image. It is an important part of the artificial intelligent systems to know their working environment, and to decide what they can do or cannot do. Transparent object cannot be well recognized by conventional methods that only use the appearance information since the appearance of a transparent object dramatically changes when the background varies. In this work, the author uses a light field camera to observe the visual information of the environment. The light field camera can record light rays from every direction through every point in the 3-Dimensional (3D) world. The captured light field data can help the computer vision system recognize the 3D world more easily, even for the transparent object.

Because the applications require to know the relationship between the recorded light rays and the 3D world, camera calibration is an essential step for the light field acquisition. After calibration, camera parameters are known and ray geometry can be understood. In this thesis, the author propose a calibration method for a camera array and a rectification method for generating a light field image from the captured raw images. The proposed camera array calibration approach is a two-step algorithm consisting of closed form initialization and nonlinear refinement, which extends Zhang's well-known method to the camera array. More importantly, the author introduce a rigid camera constraint whereby the array of cameras is rigidly aligned in the camera array and utilize this constraint in the calibration. Using this constraint, the calibration process is much faster, and the calibration results are getting more accurate in the experiments.

After obtain the known geometrical information of the captured light field, special features can be extracted from the light field. The feature extracted from the light field image have more advantages than conventional features. A background-invariant feature which is called the light field distortion (LFD) feature is proposed. The LFD feature comes from the transparent object is very different from that comes from the Lambertian object because the linearity in the light field space is different. The light field linearity (LF-linearity) can be used for measuring the likelihood of a point comes from the transparent object or not. And the occlusion detector is designed to locate the occlusion boundary in the light field image.

Recognizing the object category and detecting a certain object in the image are two important object recognition tasks, but previous appearance-based methods cannot deal with the transparent objects. The proposed methods in this thesis overcome previous problems using the novel feature extracted from a light-field image. Transparent object categorization is performed by incorporating the LFD feature into the bag-of-features approach for recognizing the category of transparent object. Transparent object segmentation is realized by solving the pixel labeling problem. An energy function is defined and Graph-cut algorithm is applied for optimizing the pixel labeling problem. The regional term and boundary term are from the LF-linearity and occlusion detector output. Light field datasets are acquired for the transparent object categorization and segmentation. The results demonstrate that the proposed methods successfully categorize and segment transparent objects from a light field image.

論文調査の要旨

画像による実世界の物体の認識は，人工知能やロボット，ファクトリーオートメーションなどの実現に欠かせない要素でることから，様々な物体認識手法が従来より提案されてきた。しかしながら，通常のカメラの画像は 3 次元世界を 2 次元写像として縮退観測したものであり，2 次元画像から 3 次元世界を推定する画像認識の問題は不良設定問題であることから，拡散反射面を持つ物体など限定的にしか適用できなかった。具体的には，日常環境にはガラスやプラスチックなどで作られた透明物体があふれているが，透明物体にはそれ自体に目立った特徴はなく，背景を透過することから条件により見かけが大きく変わる。そのため，従来の物体認識では，一般的に透明物体は例外として認識対象から除外されてきた。本論文では，通常のカメラの代わりに 4 次元の光線空間を撮影可能なライトフィールドカメラを用いて，透明物体の認識問題を扱うものであり，以

下の点で評価できる。

第一に，新しいマルチカメラ型のライトフィールドカメラキャリブレーションを提案した点である。本研究で入力装置として用いたマルチカメラ型のライトフィールドカメラの射影幾何のモデル化を行った。マルチカメラでは，カメラ同士が相互に固定されていることからカメラ間の相対的な関係はカメラの動きに対して変化しない。このカメラの相対制約(Rigid constraint)を用いた新しいカメラキャリブレーション手法を提案した。この新しいキャリブレーション手法により，従来のマルチカメラキャリブレーション手法に対して 6.47 倍の高速化をしつつ 1.74 倍の精度の向上を確認した。

第二に,透明物体を対象とした特徴量である Light field distortion (LFD)特徴と Occlusion detector を提案した点である。一般的な物体認識に用いられている SIFT や SURF といった局所特徴量は，画像のエッジや輝度勾配に由来するものであるが，透明物体には物体自体にエッジやテクスチャがないことから，これらの特徴量は正確に透明物体の形状をモデル化できなかった。それどころか，画像の見かけは物体ではなく背景により大きく変化することから，同じ物体であっても背景の変化により異なる特徴量が検出されるという問題があった。提案した LFD 特徴は，透明物体が光線を屈折することに着目し，屈折により生じる光線空間の歪みを物体の特徴量として定義した。これにより背景に依存しない透明物体の形状の記述を実現した。また，領域抽出における物体と背景の境界を求めるため，4 次元光線空間の連続性や非連続性のパターンから物体の隠蔽関係を記述する Occlusion detector を提案した。

第三に，ライトフィールドカメラを用いた画像認識の具体的な応用として，透明物体識別と物体領域抽出の二つの応用を実現した点である。提案した LFD 特徴を画像から検出し Bag-of-features に基づいた統計的学習・識別手法により，透明物体識別を実現した。LFD 特徴は背景の見かけに依存しないことから，学習時と背景が異なる環境においても識別が可能であることを実験的に示した。また，透明物体の領域抽出では，画像の画素の隣接関係をグラフモデルによりモデル化した。このグラフモデルに対して，提案した LFD 特徴をデータ項に，また Occlusion detector により得られる物体の境界情報を隣接項に用いたエネルギー関数を定義し，グラフカットにより最適化を行うことで透明物体の領域抽出を実現した。

以上要するに，本研究は，ライトフィールドカメラを画像認識に適用し，新しいカメラキャリブレーション手法を提案するとともに，透明物体を対象とした新たな特徴量を提案し，透明物体の識別や領域分割を実現したものであり，情報知能工学上価値ある業績である。よって，本論文は博士（学術）の学位論文に値するものと認める。

氏　　名　赤山　聖子
学位記番号　シ情　博甲第 559 号（工学）
学位授与の日付　平成 27 年 9 月 25 日
学位論文題名　モデル駆動開発を用いたオブジェクト指向モデリング教育に関する研究
論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　福田　晃
（副　査）　〃　〃　荒木 啓二郎
〃　〃　〃　鵜林　尚靖
〃　〃　准教授　久住　憲嗣

論 文 内 容 の 要 旨

ソフトウェアの開発において，設計品質の向上が求められている．組込みソフトウェアはその特性上，高度な信頼性や安全性が求められるが，ソフトウェアの大規模化・複雑化によって，従来からの熟練者の勘と経験に頼った手法では，その設計品質を維持できなくなってきている．そうした中，設計品質の向上のため，設計にモデリング技術を活用することがソフトウェア開発における大きな流れになっている．

ソフトウェアシステムの設計・開発にはオブジェクト指向の考え方を用いられることが多くなっており，オブジェクト指向モデリング（Object-Oriented Modeling : OOM）のための標準化した仕様記述言語の 1 つである UML（Unified Modeling Language）を用いた OOM 教育を行う試みは数多くなされている．しかしながら，モデリングの教育においては，モデルの記述のみに閉じた教育だけでは，その妥当性の検証ができず，学習者が「このモデルは合っているのだろうか？」という懸念を抱くことが多く，その解決が教育上の大きな課題となっている．

一方，UML に基づくオブジェクト指向ソフトウェア開発プロセスとして広く採用されている Rational Unified Process （RUP）があり，そこでは，反復的開発を重視しており，正しい要件や設計をただ単に推測するのではなく，現実の構築とテストからフィードバックを得ることで，要件や設計を修正する機会が必要だとしている．モデリング教育においても，上記と同様にモデルの挙動を確認し，よりよいモデルへと改善／修正していく工程が行えれば，モデリング教育の課題を解決することができ，モデリング技術の習得に有益であると考えられる．

本研究では，上記のモデルの挙動を確認し，よりよいモデルへと改善／修正していく工程をスムーズに行う手段として産業界で実用化が進んでいるモデル駆動開発（Model Driven Development : MDD）をモデリング教育に活用することを提案する．MDD とは，設計段階で作成

したモデルをツール等を使って動作シミュレーションを行うことで検証し，実際に動作するソフトウェアの実装コードを自動生成することを狙った開発手法である．MDD では，モデル上での検証とソースコードの自動生成が可能で，作成したモデルをすぐに実行して確認することができるため，モデルの機能テストが可能である．また，設計と実装を完全に分離することができるため，モデリングに集中して開発できるという利点がある．

本論文では，上記を背景にして，モデリング教育への MDD の活用の有用性及び活用方法に関する下記の研究課題を明らかにする．

なお，本論文では，モデルからソースコードを自動生成する機能をモデルコンパイラ，モデルの描画機能及びモデルコンパイラを備えたツールを MDD ツールと呼ぶこととする．

研究課題 1　MDD の活用

(1)初学者の MDD 活用の可否：
初学者に対して MDD を活用したモデリング教育が行えるのか？

(2)モデルコンパイラの有用性：
モデルコンパイラの利用することで，学習者がモデルを描くだけですぐに動作確認が行える環境にある場合，モデリングスキルの向上につながるのか？

研究課題 2　MDD の活用方法

(1)モデルコンパイラの活用タイミング：

モデルコンパイラの活用タイミングをどのようにしたらよいのか？

(2)実行可能モデリング言語の選択：

どのような、実行可能モデリング言語を利用した教育が効果的なのか？

初めに，研究課題 1-(1)及び(2)の検討に寄与することを目的として，汎用的なモデリング言語（Executable UML）及び MDD ツール（BridgePoint）を用いた講座及び教育用のドメイン特化モデリング言語（Domain-Specific Modeling Language： DSML）を用いた講座を実施した．次に，研究課題 2-(1)の検討のために，モデルコンパイラを学習者の裁量でいつでも利用できるグループ（MDD ありグループ）と演習の最後のみ利用できるグループ（MDD なしグループ）の 2 種類に分けて講座を実施した．以上の講座の結果を踏まえ研究課題 2-(2)の考察を行う．

本論文の研究成果は，以下の通りである．

１．初学者向けの OOM 教育として，MDD を活用することを提案した．MDD 教育は，プログラミングや UML モデリング等のソフトウェア開発教育の後に実施されることが一般的あり，初学者向けに MDD 教育を行われた事例は少ない．本論文では，MDD を活用した初学者向けの OOM 教育プログラムを開発し，実証講座を行うことで，プログラミング技術が十分にない初学者でも MDD による開発が行えること明らかにした．さらに，MDD におけるソースコードの自動生成機能を利用し，作成したモデルをすぐに実行して確認することで，モデルの不具合の一部を機械的に検出できるため，教員の負担軽減及び学習者の自己学習の促進を可能にした．

２．教育用 DSML を開発し，よりスムーズな OOM 教育を行える環境の整備を行った．MDD に用いられる汎用的なモデリング言語及び実開発向けのツールでは，初学者が言語やツールに慣れるのに時間がかかり，主とする学習内容以外の部分に時間をとられるというデメリットがあった．本論文では，事前の実証講座の結果を踏まえ，UML の記法に合わせた教育用の DSML を開発することで，より短期間でのモデリングスキルの習得を可能にした．

３．MDD ツールを活用した OOM 教育を行う場合に，MDD ツールが及ぼす影響を分析し，モデリングスキルの向上が図れる利用方法の提案を行った．MDD ツールを活用した OOM 教育においては，学習者が MDD で評価できる機能面の完成に強く意識をとらわれることで，モデルの品質への意識が疎かになってしまう問題点がある．従って，モデリング教育において，コードの自動生成を行うモデルコンパイラをどのタイミングで利用するかが重要であり，本論文では，モデルコンパイラの利用のタイミングの異なる 2 つのグループの比較実験により，MDD ツールの利用がモデルに与える影響を明らかにすることで，より効果的な MDD のツールの活用方法の提案を行った．

論 文 調 査 の 要 旨

情報化社会の高度化により，大規模複雑化するシステムの中でソフトウェアの重要性が高まっており，ソフトウェアの品質向上が重要となっている．品質向上の一つとして，ソフトウェア設計にモデリング技術を活用することがソフトウェア開発における大きな流れになっている．

ソフトウェアシステムの設計・開発にはオブジェクト指向の考え方を用いられることが多くなっており，オブジェクト指向モデリング（OOM：Object-Oriented Modeling）のための標準化した仕様記述言語の 1 つである UML（Unified Modeling Language）を用いた OOM 教育を行う試みは数多くなされている．その中で，OOM 教育の一つとして，モデル駆動開発（MDD:Model Driven Development）を用いた教育が注目されている．しかしながら，モデリング教育においては，モデルの記述のみに閉じた教育だけでは不十分であり，モデル記述から実際のプログラムコードを生成させるとともに，当該コードを動作させ，その結果をさらにモデル記述へとフィードバックさせる教育の重要性が叫ばれている．また従来，MDD 教育は，プログラミングや UML モデリング等のソフトウェア開発教育の後に実施されることが一般的であり，初学者を対象とした MDD 教育の実践例は少なく，その有効性を言及することが重要で

ある．

そこで本論文では，以上を背景にして，初学者を対象として MDD を OOM 教育へ活用することを提案するとともに，初学者向けの OOM 教育プログラムを開発し，実際に初学者の学生に適用することにより，その教育の有効性を実証したものであり，以下の点で評価できる．

第一に，著者は，初学者向けの OOM 教育として MDD を導入することを提案している．さらに著者は，初学者向けの OOM 教育プログラムを開発し，開設した実証講座の実践により，プログラミング技術が十分ではない初学者でも MDD を実践できることを明らかにした．さらに，MDD におけるプログラムコードの自動生成機能を利用し，構築したモデルを迅速に実行して確認することで，モデルの不具合を機械的に検出できるため，教員の負担軽減及び学習者の自己学習の促進を可能にしている．これにより，初学者向けのオブジェクト指向モデリング教育に新たな道を開いた．

第二に，著者は，教育用のドメイン特化型モデリング言語(DSML: Domain Specific Modeling Languages)を開発し，よりスムーズな OOM 教育を行える環境を構築している．MDD に用いられる汎用的なモデリング言語及び実開発向けツールでは，初学者がモデリング言語やツールに慣れるのに時間を要し，主要である学習内容以外の部分に時間を費やすというデメリットがあった．著者は，事前の実証講座の結果を踏まえ，UML の記法に合わせた教育用の DSML を開発することで，実証講座において汎用的なモデリング言語である Executable UML を用いた講座の演習時間 9 時間に対して，DSML を用いた講座の演習時間を 3 時間に短縮させており，より短期間でのモデリングスキルの習得を可能にしている．これにより，モデリング教育の効率化について，新たな知見を与えている．

第三に，著者は，MDD ツールを活用した OOM 教育を行う場合に，MDD ツールが及ぼす影響を分析し，モデリングスキルの向上が図れる利用方法を提案している．MDD ツールを活用した OOM 教育においては，学習者が MDD で評価できる機能面の完成を強く意識すしぎることで，モデル品質への意識が疎かになってしまう問題点がある．従って，モデリング教育において，コードの自動生成を行うモデルコンパイラをどのタイミングで利用するかが重要である．そこで著者は，基礎的な演習では，小さな機能の完成のタイミングでモデルコンパイラを利用することで機能の実現を確認させるというボトムアップ的なアプローチをとり，演習後半の業務システム等の開発の場合には，モデルコンパイラの利用回数を制限し，十分なモデルの検討を行った後，各機能を追加するごとに動作確認を行うというトップダウン的なアプローチをとるように教育することが望ましいと提案している．

以上，本論文は，初学者を対象として，MDD を OOM 教育へ活用することを提案するとともに，初学者向けの教育プログラムを開発し，実際に初学者の学生に適用することにより，その教育の有効性を実証したものであり，情報工学上寄与するところが大きい．よって，本論文は，博士（工学）の学位に値すると認める．

氏　　名	Seddiq Adel Alabbasi
学 位 記 番 号	シ情　博甲第 560 号（工学）
学位授与の日付	平成 27 年 9 月 25 日
学 位 論 文 題 名	Towards Improving the Portability of Personal Healthcare Data （健康情報の移植性向上に関する研究）

論文調査委員

（主　査）	九州大学	教　授	福田　晃
（副　査）	〃	〃	村上　和彰
〃	〃	准教授	アハメッド　アシル
		〃	池田　大輔

論 文 内 容 の 要 旨

A Personal Health Record (PHR) is digitized and stored for efficient patient management in hospitals or clinics. At the patient side, the health records are not digitally stored.

Nowadays people move from one place to another more than before. However, the digitized past health records do not move with them. The digitized data belong to the hospitals and the patients do not have digital access to them. Past efforts produced standard medical record formats and information messaging protocols. These standards were focused to enable interoperability among organizations. The reality is that the standards are not widely deployed and many hospitals are using their own stand-alone systems. Therefore, it is technically difficult for an individual to digitally carry standard PHRs with him/her. Healthcare data portability for an individual remained a big issue.

This research aims to improve PHR portability for an individual. We introduce a new application; we call it a PHB (Personal Health Book). This application will allow an individual to import PHRs from different hospitals, store them and share with other parties. The PHB can sit on an individual storing device (e.g. USB drive or a smart card) or can be installed as a web application.

In this work, we focused on three technical challenges: (1) How to import PHRs from multiple heterogeneous sources efficiently (2) How to store the imported PHRs in an efficient manner in terms of capacity and accessibility, and (3) How to export viewable PHRs to other trusted parties.

In this research, we proposed three items to address the above three technical challenges: (1) developed an import algorithm to read PHRs from heterogeneous structured hospital healthcare applications without loosing or missing any data (2) designed a decomposed database to efficiently store the imported data consuming minimum capacity, and (3) developed an algorithm to export the data to trusted parties.

In order to prove our proposed concept and monitor the performance, we developed a simulation to find the most optimum database design for the PHB database. We compared long database design and decomposed design in terms of number of rows generated, number of unnecessary data repetition, database size growth, number of generated cells, and size of wasted memory. The simulation constitutes 10,000 records, in different 3 cases (12, 2 and 5 number of hospitals), each case has different maximum number of unique items (up to 10, 0 and 5).

On an average the decomposed database design performed better than the long database design with 16.7% in number of rows generated, 88.9% in number of unnecessary data repetition, 40.29% in database size growth, 42.84% in number of generated cells and 79.87% in size of wasted memory.

The second part of the simulation was used to evaluate the designed database behavior in terms of data items storing and size. On an average (of first 10 records) the stored items were 106.28% less than the imported items from various PHRs, that is 984 bytes stored compared to 3,216 bytes imported.

Finally, we tested the above-mentioned algorithms and the database design of our proposed PHB application by importing PHRs from two different hospitals - one from our Portable Health Clinic (PHC) Project Database in Bangladesh and one from a Japanese hospital. The database structures of the hospitals are unknown to our PHB application. The imported PHRs were transferred to XML format manually. We set a schema with minimal restrictions to validate the XML documents. With the help of the proposed import algorithm, the imported PHRs were successfully stored into the PHB database. Then we exported the stored data and viewed them by using a web browser. We could read all the PHR data. However, the Japanese PHRs were manually translated and human bias was implied. The assumption was that the dictionary performed accurately. This can be treated as an ideal scenario.

The simulation environment we developed this time considered limited cases. This may not reflect the real time scenario. Healthcare data is very personal and thus sensitive. It is hard to test the portability of healthcare data by using real life data. The algorithms, and the database design need to be deployed for accurate evaluation. We have the plan to test the PHB in our current PHC Project running in Bangladesh.

論 文 調 査 の 要 旨

高齢化社会の到来により，血圧，体重，ヘモグロビン A1c などの個人の健康情報の管理方法が重要となっている．この健康情報は，従来は，病院ごとに管理／保有されている．しかしながら，個人が複数の病院にかかった場合，これらの病院間で，当該個人の健康情報が必ずしも共有されておらず，効率的な健康管理および対処方法が遂行できていなかったことが問題となっている．

このため，その顕在化の具体例として，東日本大震災で，病院が破壊され病院保有の個人の健康情報が失われ，個人の健康管理が十分には機能しなかった．このことは，個人の健康情報を病院ごとに管理／保有するだけではなく，新たに個人に付随して管理した方が効率的であることを暗示している．また，USB またはスマートカードに格納して個人が持ち運べるようにした健康情報を，病院にかかったときに，その情報が読み出せるように容易に移植可能にすることが重要になる．

そこで，本論文では，以上を背景にして，従来病院ごとに管理／保有されていた健康情報を，さらに個人に付随して持ち運べるようにした管理方法を提案するとともに，当該健康情報の病院への移植性向上を図る方法を提案し，シミュレーションおよび複数の病院に実際に導入した実証実験により，本提案管理方法の有効性を実証したものであり，以下の点で評価できる．

第一に，著者は，従来のように個人の健康情報を病院が管理／保有するだけではなく，さらに個人に付随して管理／保有できるパーソナルヘルスブック（PHB: Personal Health Book）という概念を提案している．さらに，本提案の PHB サイズを小さくするためのデータ構造を設計している．具体的には，血圧などの健康情報項目ごとに分離した表で管理するとともに，病院ごとに測定された健康情報レコード間の関係を対応させる個別の表で管理するという，分割データ構造を提案している．また，本提案データ構造をシミュレーションで評価し，素朴なデータ構造であるロングデータ構造と比較している．ロングデータ構造とは，病院／健康情報レコード／健康情報項目などの各々の要素ごとに，単に１つの列として管理し，列の数が要素の組合せ数だけからなるデータ構造である．シミュレーションで評価した結果，本提案データ構造が，ロングデータ構造と比べて，生成された列の数が 17%，重複するデータサイズが 88%，消費メモリサイズが 80%各々削減され，PHB のサイズを小さできることを示している．これにより，PHB を個人が持ち運ぶことができ，実際的であることを実証している．

第二に，著者は，各々の病院が保有している個人の健康情報と，PHB との間のデータ構造変換アルゴリズムを提案している．具体的には，病院管理の健康情報のフォーマットは，XML フォーマットを前提として当該フォーマットと PHB フォーマットの間で，設計／構築した意味関係の辞書に基づいた変換手法を提案している．これにより，健康情報の移植性向上に関して新たな知見を与えている．

第三に，著者は，提案した管理方法を実際の２つの病院に適用している．各々，日本で１つと，九州大学がバングラディッシュの間で展開しているポータブルヘルスクリニックプロジェクトに参画しているバングラディッシュの１つの病院である．適用した結果，実際に活用できることを実証している．これにより，提案手法の実用化に新たな道を開拓している．

以上，本論文は，従来，病院ごとに管理／保有されていた健康情報を，個人に付随して持ち運べるようにした管理方法である PHB という概念を提案し，PHB と複数の病院との間の移植性向上を図る方法を提案し，シミュレーションと複数の病院への導入実証実験により，本提案管理方法の有効性を実証したものであり，情報工学上寄与するところが大きい．よって，本論文は，博士（工学）の学位に値すると認める．

氏　　名	高　仁武
学 位 記 番 号	シ情　博甲第 561 号（学術）
学位授与の日付	平成 27 年 9 月 25 日
学 位 論 文 題 名	Pixel-level Features for Scene Text Detection (情景内文字検出のための画素レベル特徴)

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

Scene text recognition has been studied for decades and is still an open challenge. This is mainly because of the difficulty of detecting (locating) texts in natural scenes. The task of detecting text in natural scenes not only suffers from texts having various character appearance, noise and distortion, segmentation, etc., as OCR does, but also suffers from separating texts from the complex and unpredictable background. Consequently, to overcome the above mentioned difficulties, in this thesis, two kinds of pixel-level features (visual saliency and color feature) are studied and utilized to detect scene texts. Unlike the conventional features, such as HOG or SWT, pixel-level features, as the word itself indicates, are features that calculated in the pixel level, therefore are supposed to be independent from text font, distortion and, even to some extent, background. The results show that, pixel-level features provide a new way for the task of detecting text in natural scenes.

In Chapter 2, two image database that are used in the experiments are introduced. To investigate the pixel-level features of texts, a big enough scene image database with manually labeled pixel-level ground-truth is created; to give a comparison with other state-of-the-art methodologies, a public database (ICDAR-2013) is also used.

In Chapter 3, the previous related work in the literature of scene text detection is reviewed according to the feature been used. We categorize features used for scene text detection into three categories: low level, middle level and high level. According to this categorization, the related work is introduced.

In Chapter 4, in order to investigate the visual saliency features (pixel-level feature) of scene texts, five state-of-the-art visual saliency models (Itti *et al*. ‘s bottom-up visual saliency model, Harel *et al*.’s graph-based visual saliency model, Torralba *et al*.’s top-down visual saliency model, Zhang *et al*.’s model, and Achanta *et al*.‘s frequency-tuned model) are utilized. The experimental results show that pixels belonging to texts are more salient than those belonging to non-texts. This means that visual saliency pixel-level feature can be used for the task of scene text detection. The experimental results also show that among the five visual saliency models, Torralba *et al*.’s visual saliency model can retrieve the most texts in terms of pixels. Based on Itti *et al*.’s bottom-up visual saliency model, a new model called hierarchical visual saliency model, which captured more texts in our experiments, is proposed. The proposed model first find the salient region, then focus on the salient region, Itti’s model is used again to find salient regions.

In Chapter 5, another simple but useful pixel-level feature, color feature, is studied. Using the big database, three non-parametric distributions (text color against to non-text color) in HSV color space are estimated. The experimental results show that saturation and value channel distributions are usable for scene text detection. To demonstrate how to use color feature to detect natural scene text, three experiments are done.

論 文 調 査 の 要 旨

情景画像内の文字認識は，インターネット上の大規模画像データの検索や自動アノテーション，カメラを介した OCR や翻訳サービスなどへの応用を目指した技術である。同技術の確立のためには，認識の前段階として高精度な文字検出が必要となる。従来，文字の検出には，複雑なエッジ構造，一定のストローク幅，背景との輝度コントラスト，文字列の直進性といった，文字の持つ様々な特性をトップダウンに仮定した手法が多く用いられてきた。その一方で，そうした仮定そのものの妥当性に関して，実データを用いた定量的検証は為されていない。すなわち，試行錯誤的に様々な仮定が導入されているに過ぎない。この状況が，検出率改善のボトルネックになっていると同時に，情景内文字の性質に関する信頼しうる知見の獲得を阻害してきた。

本論文は，人手により各画素に文字もしくは非文字のラベルを付けた情景内文字画像約 10 万サンプルからなる大規模データセットを構築した上で，情景内の文字の持つ複数の画像的特性を明らかにしたものであり，以下の点で評価できる。

第一は，情景内文字が視覚的顕著性を持つことを実験的に検証した点である。視覚的顕著性とは，各画素の誘目性の指標である。従ってこの検証結果は，文字が目立つように情景内に配置されており，また逆に視覚的顕著性の高さを手掛かりにして文字を検出しうることを意味している。各画素における視覚的顕著性の計算には，人間の視覚特性を模した様々な方法が提案されている。例えば最も基本的な Itti らの方法では，注目画素とその周囲の画素の差異（コントラスト）を輝度，色，そしてテクスチャ方向の 3 特徴分で合計して視覚的顕著性とする。この Itti らの方法を含む代表的な 5 種類の計算法を用いて，前述のデータセット中の文字の顕著性を評価したところ，いずれの計算法によっても文字の顕著性が非文字領域に比べて有意に高いことが示された。具体的には，顕著性に対する閾値処理による文字検出精度を等価エラー率（疑陽性と偽陰性が等しくなった時の誤検出率）で評価したところ，Itti らの方法で 35%，全 5 手法の最良値で 25%となった。これらの値は，文字に視覚的顕著性が存在しない場合の理論値 50%と大きく異なっており，前記の有意差の根拠となっている。さらに本論文では，例えば黄色い看板のように，背景の視覚的顕著性が高いと文字の視覚的顕著性が相対的に下がってしまう場合に対応すべく，階層的顕著性を提案している。これを文字検出に利用し，等価エラー率を元の 35%から 32%まで改善できることも示している。

第二は，情景内文字とその背景の色の組み合わせについて一定の傾向があることを実験的に検証した点である。色は以前より文字検出に利用されてきた一方，現実世界の文字及びその背景の配色に関する定量的調査は為されていなかった。これに対し，本論文では前述の大規模データセット中の文字およびその背景部の色の組み合わせ頻度について，明度，彩度，色相の 3 つの観点から調査している。その結果，大きな明度コントラストの存在，文字と背景の少なくとも一方が無彩色である場合が大多数，有彩色の組み合わせパターンは極めて限定的など，経験的に語られていた点を含めて複数の配色傾向が実証された。さらに本論文では，こうした実際の配色傾向を機械学習して文字検出に利用することで，検出精度を F 比で 2%向上できることを確認している。

以上要するに，本研究は，大規模な画像データセットを用いて，情景内の文字が視覚的顕著性を持つこと，ならびに文字とその背景との配色に一定の傾向があることを工学的に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	徐　行
学 位 記 番 号	シ情　博甲第 562 号（学術）
学位授与の日付	平成 27 年 9 月 25 日
学 位 論 文 題 名	Towards Effective Image Annotation by Exploiting Multimodal Data （マルチモーダルデータ分析に基づく効果的な画像アノテーションに関する研究）

論文調査委員

（主　査）	九州大学	教　授	谷口 倫一郎
（副　査）	〃	〃	内田 誠一
〃	〃	准教授	長原　一
〃	〃	〃	島田 敬士

論 文 内 容 の 要 旨

Automatic image annotation is an active and challenging problem in computer vision research. Given an unseen image with no caption, the goal of image annotation is to predict relevant textual words from a word vocabulary to describe visual content of that image.

In this thesis, firstly the author focuses on the traditional image annotation problem, and particular interests are focused on developing effective scheme to capture the topic correlations in the latent Dirichlet allocation (LDA) based topic models to improve the annotation performance. To directly model correlation between topics when generating the topic proportions for a given image, the author uses logistic normal distribution proposed in the correlated topic model (CTM) instead of the Dirichlet assumption to capture the topic correlations. Then, the author extends the idea of modeling topic correlations from popular LDA based models

to CTM based models. In the proposed CTM based models, topics are now correlated with each other to mix the topic proportions for one image. The author presents a comprehensive comparison between CTM based and LDA based models on three benchmark datasets, illustrating the superior annotation performance of proposed CTM based models on image annotation task, by means of propagating topic correlation among image features and annotation words. Extensive experiments on three benchmark datasets demonstrate the superior annotation performance of proposed CTM based models on image annotation task

Secondly, the author analyzes the statistical properties of user-provided ground truth labels (also called "tags") of training images in the image annotation problem, and investigates how the quality of the ground truth labels affects the annotation results. The author first addresses a special case of image annotation with incomplete labeling, where the multiple objects in each training image are not fully labeled. The author leverages the structured output learning method to boost the performance of conventional one-versus-all support vector machine (OVA-SVM) classifiers, and proposes an image specific structured loss function which is more appropriate to explore the dependency of predicted multiple labels. Experimental evaluation demonstrates that the proposed method is efficient to handle the issue of incomplete labeling, and it performs superior than several existing methods on image annotation task.

After discussing the special case above, the author considers a more general case of tag completion with defective tag assignments, where ground truth tags cover both incomplete and noisy situations. The author proposes an image-tag re-weighting scheme and formulates a re-weighted empirical loss term, which is more efficient for optimization in tag completion problem under defective tag assignments. Experimental evaluations verify that using proposed re-weighting scheme achieves superior tag completion results on various degree of incomplete and noisy settings.

Lastly, the author extends the image annotation problem to a more general issue of cross-modal retrieval considering mutual associations of images and texts. The cross-modal retrieval tasks such as text-to-image search and image-to-text search are cast to modeling images and associated text through latent subspace learning. To handle the diversities of different modalities of data, the author develops a novel framework that consists of two procedures: (1) a coupled dictionary learning method is first developed to generate homogeneous sparse representations for different modalities by associating and jointly updating their dictionaries; (2) a coupled feature mapping scheme is then used to project the derived sparse representations from different modalities into a common subspace in which cross-modal retrieval can be performed. Experiments on a variety of cross-modal retrieval tasks demonstrate that the proposed framework outperforms the state-of-the-art approaches.

論 文 調 査 の 要 旨

近年，スマートフォンの爆発的な普及により，カメラで撮影した画像をインターネット上に手軽にアップロードできるようになり，大量の画像がインターネット上に蓄積されている。これらの画像を様々な応用で利活用するためには，画像の内容で索引付けし，検索する技術が不可欠である。このような背景から，画像の内容を表すキーワードを画像から自動的に抽出する技術（画像アノテーション技術）が盛んに研究されている。画像処理により抽出される画像特徴と画像の内容を表すキーワードをどのように対応づけるかという問題は，基本的に，サンプルデータ（画像とその内容を表すキーワードのリストを集めたもの）に基づく学習というアプローチで取り組まれているが，まだ決定的な手法が明らかになっていない。

本論文は，この問題に対して，画像特徴とキーワードを直接対応づけるのではなく，中間的なベクトル表現（トピックと呼ぶ）を媒介としてこれらを関連づける手法により，画像アノテーションの性能を向上させる手法について述べたものであり，以下の点で評価できる。

第一に，アノテーションの性能を向上させるために Correlated Topic Model と呼ぶトピック間に相関があると仮定したモデルを導入した点である。従来の画像アノテーションでは，トピックはディリクレ過程に基づいて発生するという仮定に基づいており，トピック間の関連性を無視していた。これに対し，提案手法では，トピックの発生は多次元正規分布に基づいており，トピック間の相関を表現することができるようになっている。実験では，LabelMe，PASCAL VOC07，Corel 5K という標準的な３つのベンチマークデータセットで性能評価を行い，従来手法に比べて，精度，再現率いずれにおいても優れた性能を示している。

第二に，学習に用いるサンプルデータが不完全な場合，すなわち十分な数のキーワードが与えられなかったり，誤ったキーワードが与えられたりした場合の学習法について，新たな手法を提案している点である。具体的にはサンプルデータとして与えられた画像のキーワードの妥当性を，(1)同じキーワードが与えられた他の画像の画像特徴との類似性，(2)サンプルデータにおけるキーワード間の共起性，に基づいて評価し，適切なキーワードのペナルティは低く，不適切なキーワードのペナルティは高くなるような仕組みをアノテーションモデルに導入することで，誤

ったキーワードが導出されないようにしている。EPS Game, IAPRTC-12, MIR Flickr という標準的なデータセットを用いた実験の結果，不完全なキーワードが与えられた場合でも，従来手法に比べて頑健にアノテーションが可能であることを示している。

第三に，画像アノテーション技術の応用として，画像とテキストという異なるモダリティのデータを相互に検索する手法について，新たな手法を提案した点である。ここでは，画像から得られた画像特徴とテキストから得られた言語特徴を共通の特徴空間に写像するための学習法（Coupled Dictionary Learning 法），および，検索クエリーを学習した共通の特徴空間に写像することによって異なるモダリティのデータが検索できるようにする手法を構築している。PASCAL VOC, MIR Filckr-25K という標準的なベンチマークデータセットで評価を行い，従来手法に比べて精度，再現率いずれにおいても性能向上が得られることを示している。

以上要するに，本研究は，画像の内容を表すキーワードを自動的に抽出する画像アノテーション技術において，(1)キーワード抽出の性能を向上させるための新たなトピックモデルの構築法，(2)不完全なサンプルデータからのアノテーションモデルの構築法，(3)マルチモーダルなデータ検索のためのデータモデルの構築法，を提案し，実験を通してその有効性を示したものであり，情報知能工学上価値ある業績である。よって，本論文は博士（学術）の学位論文に値するものと認める。

氏　　名	高林　佑樹
学 位 記 番 号	シ情　博甲第 563 号（工学）
学位授与の日付	平成 27 年 9 月 25 日
学 位 論 文 題 名	航空管制における高信頼度目標追跡法に関する研究

論文調査委員

（主　査）	九州大学	教　授	倉爪　亮
（副　査）	〃	〃	村田　純一
〃	〃	准教授	諸岡　健一
〃	〃	〃	岩下　友美

論 文 内 容 の 要 旨

航空管制システムでは、昨今の航空交通量増大に伴い、空港において 2 機同時に離発着させる等の運航効率性を向上させる運用方式が検討されてきている。ただし、これらの運用を実現するためには安全性の確保が重要であり、航空機を高精度かつ高頻度に監視する必要がある。従来、航空管制ではレーダによる航空機監視が行われてきたが、近年はレーダよりも高頻度に航空機を観測可能な広域マルチラテレーション（WAM: Wide Area Multilateration）による電波到来時間差（TDOA: Time Deference of Arrival）測位が検討されている。TDOA 測位はレーダの観測周期に比べ短い周期で航空機の位置を取得でき、位置精度も向上するものの、複数センサ間の TDOA によって位置を推定する性質上、測位に必要なセンサ数が同時に揃わないと測位不可となる課題がある。また、従来のレーダは距離、方位角のみを観測する 2 次元レーダと航空機から送信される気圧高度で 3 次元位置を測位していたが、テロ機等の非協調型の航空機高度を取得するために、モノパルス測角方式を採用した 3 次元レーダ（以下、モノパルスレーダ）の導入が検討されている。しかし、海面を低高度で飛行する航空機に対してはレーダと目標間の直接波と海面反射による間接波によってマルチパスフェージングが発生し、高度観測値にバイアス性の誤差が生じる課題がある。

本論文では、非同期に TDOA が得られる場合でも、位置を測位して追尾開始を早期化する非同期測位方式および安定した追尾精度を維持できる非同期追尾方式を提案する。また、モノパルスレーダにおける高度方向のバイアス誤差が発生する場合でも推定精度を向上する高度推定方式を提案する。

本論文は 6 章から構成される。第 1 章は序論である。第 2 章では、本論文で提案する全方式の基本となる目標追尾技術の従来研究および理論式について述べている。第 3 章では、追尾開始早期化の手法として非同期測位方式を提案している。非同期測位方式は航空機が等速運動する前提の下、測位方程式の解を算出することで、追尾開始を早期化する方法であり、シミュレーションによって性能を確認している。第 4 章では、高精度化手法として、非同期追尾方式を提案している。非同期追尾方式は測位位置が入力されない状況でも TDOA を直接用いて状態ベクトルを更新することで高精度化を実現する方法であり、シミュレーションによって精度が向上することを確認している。第 5 章では、バイアス誤差による高度精度劣化を防ぐ高度推定手法として、複数固定仮高度型推定方式および粒子フィルタ型推定方式の 2 方式を提案している。複数固定仮高度型推定方式は事前に想定される目標高度の範囲を仮高度として保持しておき、マルチパス伝搬モデルに基づくバイアス誤差を考慮した仮高度の信頼度を計算し、高信頼度を持つ仮高度を高度推定値として選択することで高度推定精度を向上する方法である。粒子フィルタ型推定方式は上記方式の仮高度を固定とせずにパーティクルフィルタを利用して時刻ごとに再散布することでさらに高度推定精度を向上する方法である。上記 2 方式の高度推定精度については、シミュレーションによって性能が向上することを確認している。第 6 章では本論文を総括し、今後の展望を述べている。

論 文 調 査 の 要 旨

昨今の航空交通量の増大に伴い，航空管制では現在，空港での２機同時離発着などの運航効率性の向上を目指した運用方式の導入が検討されている。航空管制においては安全性の確保が最優先であり，新たな運用方式の導入に当たっては，航空機の高精度かつ高頻度な測位と，その後の安定した追尾が不可欠である。従来，航空管制ではレーダによる航空機の観測が行われてきたが，近年では航空機トランスポンダが送信する信号を地上に配置された複数の受信局で検出し，その検出時刻差から航空機の位置を算出する，広域マルチラテレーションによる電波到来時間差測位が検討されている。電波到来時間差測位は，レーダの観測周期に比べて短い周期で航空機の位置を取得でき，また高精度な測位も可能である。一方，複数受信局間の電波到来時間差によって位置を推定するために，測位に必要な受信局数以上の受信局で同時に同期して信号が観測されないと測位ができない問題がある。また，従来の測位方式は，航空機の距離と方位角を観測する２次元レーダと，航空機から送信される気圧高度を用いて，航空機の３次元位置を検出しているが，テロ機等の非協調型の航空機では高度が取得できない可能性がある。そこで，モノパルス測角方式を採用した３次元レーダ（モノパルスレーダ）の導入が検討されている。しかし，モノパルスレーダは，海面を低高度で飛行する航空機に対しては，レーダと目標間の直接波と海面反射による間接波によってマルチパスフェージングが発生し，高度観測値にバイアス性の誤差が生じる問題がある。

本論文では，航空管制システムにおいて，広域マルチラテレーションによる電波到来時間差測位に対する測位，追尾性能の向上，およびモノパルスレーダによる高度推定精度の向上を実現する新たな手法を提案したものであり，以下の点で評価できる。

第一に，広域マルチラテレーションによる電波到来時間差測位において，一部の受信局で信号が観測されず，測位に必要な電波到来時間差が同期して得られない場合でも，蓄積された電波到来時間差を用いることで測位が可能な，新たな非同期測位方式を提案した点である。この非同期測位方式は，等速運動を仮定した航空機に対し，非同期的に得られた過去の電波到来時間差の履歴をもとに現時刻の測位方程式の解を算出する方法である。この方式により，航空機の早期の測位が可能となり，検出後の短時間で追尾を開始できる。提案した非同期測位方式は，必要な受信局数を満たさないと測位できない従来の測位方式と比べて，追尾開始に必要な時間を 18%まで短縮できることを計算機シミュレーションにより確認している。

第二に，広域マルチラテレーションによる電波到来時間差測位において，非同期に電波到来時間差が得られる場合でも高精度な追尾を実現する，新たな非同期追尾方式を提案した点である。航空機の追尾では，各時刻での測位情報をカルマンフィルタ等の追尾フィルタにより平滑化する方式が用いられる。提案する非同期追尾方式は，受信局数が不足し測位が不可能な場合でも，電波到来時間差を直接用いて追尾フィルタの状態ベクトルを更新することで，高精度な追尾を実現する方法である。計算機シミュレーションにより，測位情報のみを用いる場合に比べて，追尾精度が 57%向上することを確認している。

第三に，モノパルスレーダにおける３次元測位において，高度方向のバイアス誤差が発生する場合でも，バイアス誤差を取り除き高度を高精度に推定する２つの高度推定方式を提案した点である。まず複数固定仮高度型推定方式では，想定される目標高度の範囲内で，事前にいくつかの高度を仮高度として選択しておく。次にモノパルスレーダの観測値から，各仮高度の信頼度をマルチパス伝搬モデルに基づくバイアス誤差を用いて計算し，最も信頼度の高い仮高度を高度推定値として選択する。一方，パーティクルフィルタ型推定方式は，複数固定仮高度型推定方式のように仮高度を固定せずに，異なる高度値を持つパーティクルを多数用意し，パーティクルフィルタを利用して最も信頼度の高いパーティクルを選択する方法である。計算機シミュレーションにより，上記の２つの高度推定方式に対して，高度推定精度がそれぞれ 14%および 42%向上することを確認している。

以上要するに，本研究は，航空管制システムにおいて，広域マルチラテレーションによる電波到来時間差測位に対する測位，追尾性能の向上，およびモノパルスレーダに対する高度推定精度の向上を実現する新たな手法を提案し，計算機シミュレーションによってその有効性を示したものであり，情報知能工学上価値ある業績である。よって，本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認める。

氏　　名　寺田　夏樹
学 位 記 番 号　シ情　博甲第 564 号（工学）
学位授与の日付　平成 27 年 9 月 25 日
学 位 論 文 題 名　信号保安装置への定理証明技術の適用に関する研究
論文調査委員
（主　査）　九州大学　教　授　荒木　啓二郎
（副　査）　〃　〃　鵜林　尚靖
〃　〃　〃　興　雄司
〃　〃　准教授　日下部　茂

論 文 内 容 の 要 旨

鉄道の安全運行を支えているのが信号保安装置と呼ばれるものである．信号保安装置の機能としては，駅間にお

いて列車を正面衝突させない，あるいは追突させない．また駅構内において列車を正面衝突あるいは側面衝突させないなどといったものがある．

この信号保安装置には高い安全性が求められる．従来はリレーを用いていた．リレーには故障時の状態が一方に固定されるという非対称な故障特性があり，これを活用していた．これを電子化機器で実現しようとする際に，そのままでは非対称的な故障特性が得られないということが問題となった．そこで装置を多重化し，その不一致を検出した場合に装置を安全側に止めるという技術が実現した．その後，電子化機器のハードウェアに関して様々な課題はあったが，安全性を確保するという視点では技術的にはかなり確立されたものと考えられている．

しかし，信号保安装置に搭載されるソフトウェアについてはそれほど特別な技術は使われていない．基本的にはプログラムを誤らないように単純化するという考え方に基づいている．プログラム実行が異常となったことを検出する仕組みは備わっているものの，プログラムの正当性を確保する手段は依然としてレビューやテストによる所が大きい．

これに対し，本論文においてフォーマルメソッドによるソフトウェアの高信頼化手法の適用を試みた．フォーマルメソッドとは仕様の形式化を通じてプログラムやシステムの信頼性を向上化させるための技術である．そのうち，仕様から生成される条件を定理証明により仕様の誤りを見つけたり，仕様に誤りのないことを保証したりする厳密な検証に着目し，適用を試みた．信号保安装置の中でなるべく広い範囲をカバーするため，以下の３つの事例を選択し，検証の適用を試みた．

・静的な制御データの検証

・ブール型変数で記述可能な（リレーで構築可能な）動的な制御部分の検証

・ブール型変数では対応できない，数値計算部分の検証

その前に形式手法を用いたシステムのモデル化の習熟が必要であり，まずは VDM（Vienna Development Method）による連動装置のアニメーションを活用したモデル化を実施した．

静的な制御データの検証に関しては、ATC（自動列車制御装置）の制御データの基礎となる線区データベース（地理データ）に関して，VDM-SL で記述されたデータベース仕様から生成される証明責務の証明を行った．証明は the HOL system をバックエンドの証明エンジンとして利用する GUI を通じて行った．935 行の仕様に対し，188 の証明責務が生成され，これらの 9 割を自動，残りの 1 割を対話的に証明した．この検証を通じて、様々な知見を得た．

１つ目の知見として，証明責務をながめ，反例を探してインタプリタで確かめることで仕様の誤りを発見可能であるということが挙げられる．証明責務の自動生成は仕様の誤りを発見する上で重要であり，自動証明ができなくとも，反例を確かめる手法で仕様の品質向上が可能と考えられる．

２つ目の知見として，自動証明ができれば，記述の誤りを見逃さずにすむ可能性がより高まり，仕様の品質をさらに向上させることが可能となるということが挙げられる．

また，証明を成功させるためには証明のテクニックを身につけることも必要ではあるものの，それ以上に仕様の理解も重要であることが挙げられる．そのためには仕様をわかりやすくする努力も必要であり，単純かつしっかりとした構造を構築する必要がある．

動的な制御部分の検証事例として，リレーで実装がなされている単線区間向け自動閉そく装置の検証に B メソッドを適用した．VDM でモデル化を行った上で，B メソッドの記述に直し，証明責務を生成して，証明を実施し，信号保安装置のうち，動的なシステムが検証可能であることを示した．また，3 種類の装置の検証を比較し，証明責務の生成状況の観察を行った。証明責務の生成に関しては，不変条件内や非決定的での論理和の使用，条件分岐等を用いることにより証明責務の生成数が増大することが分かった．また，同じことを別の表現で記述してしまうと自動証明できない証明責務が増大することが分かった．

これらの問題に対して，論理和の除去により証明責務を減らしたり，表明の使用により，証明責務の自動証明率を上げたりできることを示した．

数値計算部分の検証事例として，前述の ATC において，停止位置までの距離が与えられた場合の，車両に対する許容速度の計算部分に B メソッドを適用した．この計算には本来であれば平方根が必要で，浮動小数点計算であれば容易であるが，B メソッドは小数を扱わない．しかしながら，整数の範囲で必要とする精度の計算を行い，それを証明によって正当性を与えることができた．この検証を通じて，while ループの使用や乗除算の使用により証明責務が増大することが分かった．

また，この検証で使用した補助的な関数については，抽象変数と operation の組み合わせを定義し，それを詳細化する事で実装を行ったが，この手法は他の事例でも活用できる．

制御データの静的な検証，動的な制御部分の検証，論理演算で対応できない数値計算部分について定理証明技術が適用できた．これは信号保安装置の広い分野を網羅する代表例であり，証明の手間を別とすれば，この技術が信号保安装置に一般的に応用可能であることが示された．

この技法が広く導入されるにはまだまだ時間がかかるとは考えられるが，制御データ検証への適用の可能性や，新しい装置への導入の可能性がある．既存システムの参照モデルの作成と合わせて，信号保安装置の品質向上に資する事ができればよいと考えている．

論 文 調 査 の 要 旨

鉄道において，衝突等を防いで列車を安全に運行するために信号保安装置が用いられている。列車の安全運行を支えるこの信号保安装置自体にも高い安全性が求められる。従来，信号保安装置にはリレー（継電器）が広く用いられ，故障時に状態が一方に固定されるというリレーの非対称的な特性を利用して，装置が故障した場合は安全側に制御する方法が実現されていた。我国では，近年の電子化の普及に伴って，これら信号保安装置も電子化機器として実現されるようになってきたが，リレーがもつ非対称的特性を利用できないために，装置の多重化によって安全性を確保する技術が確立してきた。しかしながら，電子化機器を制御するソフトウェアに対しては，レビューやテストという旧来の手法を用いての確認にとどまっており，ソフトウェアの信頼性や正当性に関する特別な対応はとられてこなかった。

本論文は，ソフトウェアの信頼性や正当性を保証する方法としてのフォーマルメソッドを信号保安装置のソフトウェアに対して適用した事例研究を通して，フォーマルメソッドの有効性を示したものであり，以下の点で評価できる。

第一に，自動列車制御装置（ATC）の基礎となる線区データベースシステムの仕様を形式仕様記述言語 VDM-SL を用いて記述し，それから得られる証明責務を証明することによりシステムの検証を行った。この事例では，935 行の仕様に対して，188 の証明責務が生成され，そのうちの 9 割は定理証明支援ツールを利用して自動的に証明され，残りの 1 割はツールの支援のもとに人手で証明した。この事例から，対象システムに関する形式仕様を記述して，それらから得られる証明責務を証明すること，および，その過程で証明責務を精査することが，仕様の品質を向上させシステムの信頼性保証に寄与するという有用な知見が得られた。これは，鉄道システムにおける線区データベースという基本データに関するフォーマルメソッド適用の有用性を実証した事例として評価できる。

第二に，リレーで実装された単線区間向け自動閉塞装置の検証に，フォーマルメソッドを適用した。この事例では，前述の基本データという静的な対象とは異なり，装置の制御という動的な対象を取扱っている。3 種類の異なる単線区間向け自動閉塞装置に対して，システムの記述と証明責務の証明を行って，それぞれの正当性の検証を行った。ここでは，まず VDM-SL で対象を厳密に記述し，それを基にフォーマルメソッドの一種である B メソッドを用いてシステムの記述と検証を行った。その際，証明責務の生成数を抑制し，さらに，自動証明率を向上させる方法を示した。異なるフォーマルメソッドを連携する方法，ならびに，証明責務の生成数の抑制と自動証明率の向上により検証をより容易にする方法を具体的に提示して，現実の問題にフォーマルメソッドを適用する際の有効な指針を示したことは評価に値する。

第三に，ATC において列車の停止位置までの距離が与えられた場合の列車に対する許容速度の計算に B メソッドを適用した。この事例では，実数を取扱うことができない B メソッドにおいて，必要とする精度の計算を整数の範囲内で行い，許容速度計算の正しさを検証した。信号保安装置という対象に限定しているものの，数値計算に B メソッドを適用して成功した実例を示し，それによって，フォーマルメソッドの適用対象領域を広げる可能性を示した新たな研究成果として評価できる。

以上，本論文は，鉄道における信号保安装置を対象として，フォーマルメソッドを適用して形式仕様記述と正当性の検証を行い，フォーマルメソッドの実用的な有用性を示すとともに，フォーマルメソッド適用に対する有効な指針を示したもので，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	佐々木　元晴
学 位 記 番 号	シ情　博甲第 565 号（工学）
学位授与の日付	平成 27 年 9 月 25 日
学 位 論 文 題 名	低アンテナ高基地局で形成される狭小セルのための電波伝搬モデルおよび通信方式の研究

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

無線通信システムにおいてアクセス回線に適した 1~6GHz 周辺は，様々な通信システムや非通信システムに利用されており周波数資源が逼迫している．このような状況において 2020 年代には 2010 年に比べて 1000 倍以上の無線トラフィック量になると試算されており，第 5 世代移動通信システムでは高速大容量な無線通信を実現するために 6GHz 以上の高周波数帯の利用が検討されている．高周波数帯を利用したセルは，周波数が高くなるほど伝搬損失が大きくなるため，基地局アンテナ高が 10m 以下のセル半径の小さいスモールセルとなる．このような高周波数帯の利用が検討されている一方で，VHF 帯などの低周波数帯を用いて広範囲をカバーする無線通信システムとして，災害による通信回線断が発生した緊急時などに迅速かつ柔軟に通信回線を確保するための災害対策用無線通信シス

テムが検討されている．災害発生時にはビル上部などに高所設置された基地局が利用不可能となる可能性があることから，復旧や救助活動の支援を行うためには一時避難場所などへの臨時基地局を設置することが想定されている．このような臨時基地局では，高周波数帯でのスモールセルのようにアンテナ高 10m 以下の低アンテナ高送受信局が利用される．

以上のような送受信アンテナ高が 10m 以下の低アンテナ高環境では，今日一般的である基地局がビル上などの高所に設置されるシステムとは異なり，建物や道路などの地形が電波伝搬特性に大きく影響する．そのため，このような低アンテナ高環境の伝搬特性を把握可能な伝搬モデルが，システム設計には必要不可欠である．また，高アンテナ高基地局と比較すると，低アンテナ高基地局ではセル半径が小さくなるために多数の基地局を導入することが必要となる．柔軟かつ低コストに多数の基地局を導入するためには，無線エントランス回線を用いて基幹回線網と接続することが想定される．各基地局において高速大容量な無線回線を提供するためには，無線エントランス回線において時間や周波数を用いた分割多重に加えて空間的な多重化を行うことが必須である．しかし，収容すべき基地局数が多数となる場合，基地局ごとに固有の参照信号を用いて空間多重を行うと参照信号長が長くなり伝送速度劣化につながる．このような問題を解決するための，セル数が多数であっても効率的に無線接続が可能な多重方式が必須である．

そこで本研究では，低アンテナ高環境下の無線通信システムの実現に必要不可欠である，低アンテナ高環境における電波伝搬モデルと，低アンテナ高基地局を収容する無線エントランスのための通信方式について検討を行った．さらに前者に関しては，低～高周波数帯での検討を 3 つに分類し，VHF 帯，UHF/SHF 帯，SHF/EHF 帯において検討を行った．

UHF/SHF 帯における住宅地環境での検討結果より，低アンテナ高での伝搬損失に支配的な 3 つの伝搬経路として，道路沿い伝搬経路，建物間伝搬経路，屋根越え伝搬経路が存在することを示した．さらに，これらの伝搬経路を用いることで，送受信間距離のみでなく，道路状況や建物状況といった環境を考慮可能な伝搬損モデルを示した．本モデルにより，幅広い環境について伝搬損失を精度良く推定可能であることを示した．

また，SHF/EHF 帯を用いた都市部環境における伝搬損失モデルを提案するとともに，実環境の伝搬特性を精度よく表せることを示した．都市部環境における 0.8～37GHz までの 6 周波数帯での伝搬損失測定結果に基づき，見通しのある直線道路上であっても道路標識などの遮蔽物により伝搬損失が増加することを示した．さらに遮蔽損失の推定手法として，有限幅のスクリーンを用いた回折損失計算モデルを示し，測定結果を精度よく推定可能であることを示した．

一方，周波数の低い VHF 帯においては，屋根越え伝搬経路に 2 波モデルを適用した伝搬モデルを提案するとともに，測定結果を精度よく推定できることを示した．

さらに、無線エントランス用中継伝送システムのための AAA 受信重み係数最適化手法を提案した．従来方式である送信タイミングオフセットを用いた際に発生する無信号区間を疑似参照信号とすることで，受信重み係数最適化に必要な参照信号系列の一次独立性を確保できることを示した．また，システム構築を想定した環境における測定で取得した伝搬データを用いた計算機シミュレーションにより，従来方式に対して提案手法がより誤り率特性を向上できることを示すとともに，実環境の伝搬特性においても提案手法が問題なく動作することを明らかにした．

以上の研究成果を用いることで，高速大容量な無線通信を低コストにユーザーに提供することが可能となり，高度情報化社会の実現へ貢献できる．

論 文 調 査 の 要 旨

携帯電話等の公衆セルラー無線通信のアクセス回線に適した 1～6GHz 帯は，すでに様々な用途に利用されており周波数が枯渇している。2020 年代には 2010 年に比べて 1000 倍以上のモバイル通信トラフィックが発生すると試算されており，今後はアクセス回線にも 6GHz 以上の高周波数帯の利用が必要と考えられている。高周波数帯は電波の減衰量が大きく，かつ直進性が高いため，基地局アンテナ高を
10m 程度と低くしつつセル半径の小さいスモールセルの導入が必須とされる。一方，災害対策用途の臨時基地局では，VHF 帯の利用が検討されているが，この場合にもアンテナ高 10m 以下の低アンテナ高かつスモールセルでの運用が行われる。このように基地局が低所に設置される，いわゆる低アンテナ高環境は，これからの無線通信を考えるうえで欠かせない前提条件となる。

低アンテナ高環境では，建物や道路などの地形が電波伝搬特性に大きく影響する。適切な基地局配置や基地局カバーエリアの推定のためには，低アンテナ高環境の電波伝搬特性を精度良く予測可能な伝搬損推定方式の確立が必要不可欠である。また，低アンテナ高基地局では必然的にセル半径が小さくなるため，基地局の設置数が増加する。柔軟かつ低コストに多数の基地局を導入するためには，無線エントランス回線を介して基地局と基幹網とを接続することが好ましい。基地局数が多数であっても高い無線伝送効率を有する無線エントランス方式が必須である。

本研究は，低アンテナ高環境下の無線通信システムの実現に不可欠である伝搬損推定方式と，低アンテナ高基地局を効率的に収容するための無線エントランス方式に関し

て検討したものであり，以下の点で評価できる。

第一に，都市部での低アンテナ高環境下における UHF～EHF 帯伝搬損推定方式を提案した。３つの伝搬経路，すなわち道路沿い伝搬経路，建物間伝搬経路および屋根越え伝搬経路による伝搬路モデルを定義し，当該モデルに基づく伝搬損推定方式を提案した。さらに，見通し内領域での伝搬損推定精度を高めるため，信号機や樹木などといった周辺遮蔽物の影響を考慮したスクリーン回折損モデルも取り入れた。実測結果との比較により，当該伝搬損推定方式は実際の都市部での低アンテナ高環境下における UHF～EHF 帯電波伝搬特性を良く近似できることが示された。本成果は，都市部での UHF～EHF 帯における無線エリア設計の高精度化を可能とする点で評価できる。

第二に，住宅地での低アンテナ高環境下における VHF 帯伝搬損推定方式を提案した。見通し率を導入し，見通し率に対する超過損失を導入することで住宅街における伝搬損のモデル化を行った。また，建物地面の平均高で定義される実効地面高を導入し，実効地面高＋２波モデルによる屋根越え伝搬モデルを導入することで更なる高い近似度を有する伝搬損のモデル化を行った。これらのモデル化により構築された伝搬損推定方式は，住宅地に存在する建物の数や疎密，および建物高の影響を考慮可能であり，実環境で観測された伝搬特性と比較した結果，電波伝搬損を精度よく近似できることが示された。本成果は，住宅地での VHF 帯における無線エリア設計の高精度化を可能とする点で評価できる。

第三に，無線エントランス回線における空間多重伝送で必須となるアダプティブアレーアンテナの重み係数決定法を提案した。各基地局に固有の参照信号系列を用いることなく高精度なアンテナ重み係数を決定する新たな手法を考案し，実環境の伝搬特性データを用いてその有効性を示した。本成果は，参照信号の送信を不要とすることで周波数利用効率を向上させつつ，低アンテナ高環境下の無線通信システムで必要となる多数基地局の導入コストを低減できる点で評価できる。

以上，要するに本論文は，低アンテナ高無線通信システム構築に必要な高精度な伝搬損推定方式，および低アンテナ高基地局の導入コストを低減可能な高い周波数利用効率を有する無線エントランス方式を確立したもので，モバイル通信や災害対策用無線通信において今後普及が予想されている低アンテナ高基地局の導入を促進させる重要な研究成果である。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　　Ahmad Afif bin Mohd Faudzi
学 位 記 番 号　　シ情　博甲第 566 号（工学）
学位授与の日付　　平成 27 年 9 月 25 日
学 位 論 文 題 名　　Policy Abstraction for Transfer Learning Using Learning Vector Quantization in Reinforcement Learning Framework
（強化学習における転移学習のための学習ベクトル量子化を利用した方策抽象化に関する研究）

論文調査委員

（主　査）	九州大学	教　授	村田　純一
（副　査）	〃	〃	川邊　武俊
〃	〃	〃	内田　誠一

論 文 内 容 の 要 旨

Reinforcement learning (RL) enables an agent to find an optimal solution to a problem where the best action in any given state is to be discovered. However, the learning process always starts from scratch and possibly takes a long time due to its trial-and-error-based learning framework. Here, knowledge transfer between tasks that take the advantage of the learned knowledge obtained in the past tasks for supporting the other similar tasks is considered. In order to perform the transfer learning efficiently, at least two issues need to be solved. The first is what the appropriate representation of transferred knowledge is, and the second is how to prepare for the new tasks whose environments are not completely known. As solutions, this thesis proposes a modified learning vector quantization (LVQ) that can manipulate its network weights to perform abstraction that is expected to generate appropriate transferred knowledge, adaptation that is expected to train the agent to adapt to new environments and a precaution that is expected to provide better prior information for future tasks. The abstraction is performed by extracting an abstract policy out of a learned policy. The abstract policy, which represents essentials of the original policy succinctly with ignoring too much detail, is, then, transferred to a new task as prior information for supporting the exploitation during the learning process. Here, the adaptation where the agent learns to adapt to the new task as well as the new abstract policy generating is performed in a single operation. In the precaution, the idea is to prepare better prior information based on the past-learned policies for future tasks. For this purpose, another abstract policy that is named as the common abstract policy is generated by combining the past-learned policies and extracting the similarities in them. The simulation results show that the representation of the abstract policy has fewer data compared to ordinary lookup tables and it is interpretable, that the adaptation as well as generation of new abstract

policy are successful, that a common abstract policy is successfully generated and that its application produces better results by more effectively guiding the agent when learning a new task. However, during the adaptation, the agent only manages to complete the task, but its behavior is not an optimal one. To improve it, a function is introduced that converts a reward to a new reward so that the learning system does not suffer from an undesirable effect by a small reward. The simulation result shows that the agent successfully finds the optimal solution in most cases.

An outline of the thesis is presented as follows:

Chapter 1 - A brief description of reinforcement learning and the importance of applying transfer learning to improve RL are provided. Several issues that possibly arise during performing transfer learning are discussed. In order to solve the issues, three operations, namely abstraction, adaptation and a precaution are introduced. This chapter also summarizes the objectives and the contribution of this research.

Chapter 2 – This chapter introduces the background and the general theories of reinforcement learning which is the main framework in this thesis. The learning framework of RL is also explained. This chapter also introduces the learning vector quantization algorithm which is the core of the proposed solutions for the issues mentioned in the Chapter 1.

Chapter 3 – This chapter proposes a modified LVQ algorithm with a dynamic network as an abstraction method as a solution to the first issue which is what the appropriate representation of transferred knowledge is. The abstraction is performed by extracting an abstract policy out of a learned policy that was prepared by the RL conventional method, Q-learning. The LVQ network that can dynamically add and delete its weight vectors that represent the abstract policy is expected to generate an appropriate representation of transferred knowledge in terms of the transferred data size and also whether the transferred data is interpretable or not.

Chapter 4 - This chapter introduces an extended modified LVQ algorithm to work in the RL framework for the adaptation and the precaution as solutions for the second issue which is how to prepare for the new tasks whose environments are not completely known or predicted. The LVQ algorithm proposed in the previous chapter is extended so that it can make the agent adapt to the new task while performing abstraction. The precaution is realized by deriving a more generally applicable abstract policy, common abstract policy, by finding and extracting the similarities in the previously obtained policy and the current one.

Chapter 5 - This chapter proposes another modification of the LVQ algorithm to improve the adaptation operation in Chapter 4. The difficulties for the LVQ algorithm to work in RL framework are discussed. As a solution, two modifications are introduced. The first is a new way to define the reward value that is calculated by the agent autonomously based on its behavior and the second is a function that converts the defined reward to another reward before it is actually used during learning. This function limits the training of small reward behavior so that it can prevent the learning system suffer from an undesirable effect by small reward behaviors.

Chapter 6 - This chapter gives general conclusions and recommendations for further research.

論 文 調 査 の 要 旨

強化学習は，良い状態に到達した際に得られる報酬信号と試行錯誤とによって方策を獲得する方法である．方策は制御における状態フィードバック制御則に相当し，報酬信号さえ与えられれば学習可能であるため，強化学習は未知の問題や複雑な問題であっても適用可能である．一方で，強化学習は試行錯誤に基づくため学習に時間がかかる．また，方策は個々の状態に対して最適な行動を対応させるだけであり，その意味を解釈することは難しい．学習高速化のための改善は多くなされているが，なかでも，ある問題について獲得した方策を他の類似問題においても活用する転移学習が，良好な結果を与えるものとして着目されている．この転移学習が適切に機能するには，一般性のある本質的部分を抽出する方策の抽象化が重要である．これはまた解釈可能性向上にも寄与する．

本論文は，強化学習における転移学習を効果的に行うことができる方策の抽象化手法と，それを活用した強化学習法を提案したものであり，以下の点で評価できる．

1. 抽象化とは本質でない詳細を除去する操作である．強化学習においては，複数の異なる状態をグループ化し同一視することに相当する．従来，これは状態間の類似性に着目して行われていた．本論文では，より抽象度の高い抽象化を実現するためにこれに加えて最適行動も考慮し，最適行動が等しい状態を同一グループとし，さらに類似した状態をサブグループとする階層的方法を提案している．同一最適行動に対応した状態のグループ化には教師あり学習が，類似状態のグループ化には教師なし学習が必要であるが，本論文では学習ベクトル量子化アルゴリズムがこの両者を実行できることに着目し，さらに，適切な個数のサブグループが得られるようにノード数を必要に応じて自動的に増減させる改良を施して，抽象化を行っている．

2. 上記抽象化で得られた状態グループと最適行動の対応を抽象方策と呼んでいるが，ある問題で得られた抽象方策は，そのまま類似の他の問題に利用できるとは限らない．抽象方策を利用しつつ，同時に新しい問題に合わせてこれ

を一部変更する適応操作が必要となる．本論文では，この適応操作において，小さい報酬信号によって誤学習が発生する学習ベクトル量子化アルゴリズムの欠点を，報酬の非線形変換によって解決する方法を提案し，適応操作が適切に行える方法を開発している．

3. さらに，抽象方策が他の問題で利用できる可能性を向上させるために，複数問題に共通して使用することができる共通抽象方策を導出する方法を提案している．

4. 以上の提案内容は，カメラを有する移動ロボットが色や形状の異なる５個の障害物を回避しながら目標に到達する例題のシミュレーションを用いて評価されており，この種の問題において獲得した抽象方策から意味が解釈可能であることと，抽象方策を利用した転移学習によって，障害物の配置，形状，個数および目標位置が異なる環境における学習速度が２倍程度に向上し，学習の高速化が実現できることを示している．

以上要するに本論文は，任意の状態とその状態における最適行動とを関係づける方策を学習によって獲得する強化学習について，学習速度向上と方策の解釈可能性向上を目的として，方策を抽象化し学習に活用する方法を提案したものである．この成果は，複雑なシステムや未知部分を含むシステムにおける適切な制御や意思決定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	崔　暁敏
学位記番号	シ情　博甲第 567 号（工学）
学位授与の日付	平成 27 年 9 月 25 日
学位論文題名	RESEARCH ON THE DEVLELOPMENT OF ELECTRICAL EVALUATION METHOD FOR STATIC AND DYNAMIC PROPERTIES OF MAGNETIC VORTEX SYSTEMS IN PATTERNED FERROMAGNETIC DOTS (微細強磁性体ドットにおける磁気渦構造の静的・動的特性の電気的評価法の開発に関する研究)

論文調査委員

（主　査）	九州大学	教　授	浅野　種正
（副　査）	〃	〃	木村　崇
〃	〃	〃	松山　公秀
〃	〃	〃	湯浅　裕美

論 文 内 容 の 要 旨

ミクロンからサブミクロンサイズに加工された微小強磁性体では、微細化に伴う静磁エネルギーの増大により、試料形状を反映した磁区構造が形成される。中でも、円盤や正多角形などでは、渦状にスピンが配列した磁気渦と呼ばれる特異な磁区構造が安定化する。この磁気渦構造は、高い熱安定性や優れた共鳴特性などの特徴を有するため、次世代型スピンデバイスにおける記憶セルへの応用が期待されている。磁気渦構造の特性は、磁化の旋回方向を示すカイラリティと吹き出し磁化を表すポラリティの二つの自由度で特徴づけられる。しかし、スピン配列の空間対称性の高さから、これらの自由度を検出するには、磁気力顕微鏡や放射光を用いる等、特殊な実験を行う必要があった。本論文は、強磁性体ドットの伝導特性から、極めて簡便に磁気渦特性を評価する手法を開発したものである。得られた成果の要約を以下に示す。

まず、円盤形状の Permalloy (Py) 磁気ドットに対して非対称な配置で Cu 電極を取り付け、電気抵抗の磁場依存性を測定することで、磁気渦のカイラリティを精度良く，かつ簡便に検出する手法を開発した。更に、そのカイラリティの磁場強度に対する安定性を評価した。その結果、磁気渦のカイラリティは、Cu 電極と元のカイラリティの影響を受け、一度形成されたカイラリティの情報を完全に消し去るには、消滅磁場に対して、２倍程度の磁場を印加する必要があることが分かった。

次に、同様の非対称配置電極を配置した素子に、高周波磁場印加用の電極を取り付けることで、磁気渦の共鳴特性を高感度に評価する手法を開発した。本手法は、これまで主流であったネットワークアナライザーを用いた評価法に比べ非常に高感度で、また、共鳴励起回路と検出回路を分離した回路構成であるため、ホモダイン検波法などに比べて検出電流の影響を最小化できるなどの特徴を有することを示した。更に、本手法を発展させることで、静磁結合した磁気渦配列の共鳴特性の研究にも展開できることを示した。その後、磁気円盤における磁気渦構造が引き起こす磁気抵抗効果が 2 回対称であることを用いて、磁気渦共鳴により電気抵抗が励起周波数の二倍周波数で変化することを見出した。第二高調波を用いた本手法は、非対称電極不要で、かつ極めて高感度であり、単一の磁性円盤の評価も可能であることを示した。 また、スペクトルの励起電力依存性から、共鳴周波数が励起電力と共に増大することと、共鳴振幅が非線形に振る舞い領域が存在することを示した。

最後に、同様の手法を、正三角形、二等辺三角形、及び正方形などの多角形状の微細磁性体に適用し、同手法の有効性を示し、これらの多角形状磁性体では、磁気渦の安定位置に対応して共鳴周波数が大きく変化することを実証した。また、二等辺三角形の単一磁性ドット内に２つの磁気渦を形成する技術を開発し、それらの相互作用によって引き起こされる特徴的な共鳴特性を観測することに成功

した。これら一連の磁気渦の静・動的特性の評価技術の開発、及び特性評価に関する上記の成果は，スピン情報伝送を用いたデバイスの実現につながると期待される。

論 文 調 査 の 要 旨

強磁性体をミクロンからサブミクロンの大きさのドット状に加工すると、微細化に伴う静磁エネルギーの増大により、試料形状を反映した磁区構造が形成される。中でも、円盤や正多角形などでは、渦状にスピンが配列した磁気渦と呼ばれる特異な磁区構造が安定して形成される。この磁気渦構造は、高い熱安定性や優れた共鳴特性などの特徴を有するため、電子スピンを利用した次世代型デバイスにおける情報記憶セルへの応用が期待されている。磁気渦構造の特性は、磁化の旋回方向を示すカイラリティと吹き出し磁化を表すポラリティの二つの自由度で特徴づけられる。これらを検出するにはこれまで、磁気力顕微鏡や放射光を用いる等、特殊な実験を行う必要があり、物理現象の理解を進める際の障害になっていた。本論文は、強磁性体ドットの磁気渦特性を簡便かつ高精度に評価する手法の開発を目的に行った研究をまとめたものである。

第一章では、本研究の背景と目的、研究の流れについて述べている。第二章では、磁気渦の特性に関する理論的背景を 100 余件の文献を引用しながら整理して記述している。第三章では、強磁性体ドットの作製方法など、研究全体に共通する実験的手法について述べている。第四章では、本研究で考案した非対称配置電極による検知手法を円盤状ドットに適用し、磁気渦の検知に成功した結果を述べている。第五章および第六章では、高周波磁場下における磁気渦の動的特性について、本研究で考案した非対称配置電極で評価した結果を述べている。第七章では、三角形及び矩形状ドットにおける磁気渦の特性について評価した結果を述べている。第八章で、本研究を総括している。

得られた成果は、以下の点で評価できる。

１．円盤形のパーマロイ(Permalloy) ドットに対して非対称な配置で Cu 電極を取り付け、電気抵抗の磁場依存性を測定することで、磁気渦のカイラリティを正確かつ簡便に検出できることを示した。この新しい手法を用いてカイラリティの磁場強度に対する遷移確率を評価した結果、カイラリティが遷移する磁場強度は、電極形成時に磁性体ドットに生じたわずかな形状非対称性および磁気渦消滅時の残留カイラリティの影響を受けるが、磁気渦の消滅磁場に対して２倍以上の磁場を印加すればカイラリティは確実に反転することを見出した。

２．上記と同様に非対称配置電極を配置した素子に、高周波磁場印加用の電極を付加することにより、磁気渦の共鳴特性を高感度に評価する手法を開発した。本手法は、これまで主流であったネットワークアナライザーを用いた評価法に比べ感度が２０倍程度高く、また、共鳴励起回路と検出回路を分離した回路構成であるため、ホモダイン検波法などに比べて検出電流の影響を最小化できるなどの特徴を有することを示した。更に、本手法を発展させることで、静磁結合した磁気渦配列の共鳴特性の研究にも展開できることを示した。

３．円盤形ドットにおける磁気渦共鳴による電気抵抗の変化は、磁気渦構造が引き起こす磁気抵抗変化が空間的に 2 回対称であることに起因して、印加磁場周波数の２倍の周波数をもつことを見出した。第二高調波を用いた本手法は、磁気渦共鳴を高感度に検出できるため、単一の円盤形ドットの評価も可能であることを示した。

４．同様の手法を正三角形、二等辺三角形、及び正方形などの多角形状のパーマロイドットに適用し、共鳴励起回路と磁性体ドットを適切な位置関係で配置することで、各形状における磁気渦の動的特性を高感度に評価できることを示した。この過程で、これらの多角形状磁性体では、磁気渦の安定位置に対応して共鳴周波数が大きく変化することを見出した。また、二等辺三角形の単一ドット内に２つの磁気渦を形成する技術を開発し、それらの相互作用によって引き起こされる特徴的な共鳴特性を観測することに成功した。

以上、要するに本論文は、微細な形状をもつ強磁性体に生成される磁気渦特性を、電磁気的手法で簡便かつ高精度に測定する技術を開発し、それを利用して磁気渦の静的および動的挙動と強磁性体の形状との関係に関わる新たな発見をなしたものであり、電気電子工学上の価値ある業績である。よって、博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

氏　　名	船木　亮平
学 位 記 番 号	シ情　博甲第 568 号（工学）
学位授与の日付	平成 27 年 9 月 25 日
学 位 論 文 題 名	組み合わせ最適化と木最適化に対する差分進化の拡張に関する研究

論文調査委員

（主　査）	九州大学	教　授	村田　純一
（副　査）	〃	〃	川邊　武俊
〃	〃	〃	倉爪　亮

論 文 内 容 の 要 旨

進化計算とは生物の集団が環境に適応して繁栄する進化の仕組みから着想を得た最適化手法である．解がどの程度優れているかを示す適合度を得ることができる問題であれば最適化可能であるため，性質が不明な問題を最適化可能であることやアルゴリズムを変更せずに多くの最適化問題に運用可能であることが利点である．照明設計サポートシステムや入出力データからの関数同定，人工内耳の

パラメータチューニングなどその応用範囲は多岐に渡る．

近年，実数値パラメータの最適化向けの進化計算手法として差分進化の研究が行われている．解候補（個体）は実数値ベクトルで表現され，新しい個体を作成するために個体間差分ベクトルを使用する．差分ベクトルは個体の変異幅を示しており，個体が広範囲に分布している探索序盤では大域的な探索，個体が集中してくれば局所的な探索を行う．差分を用いた探索範囲の調整により探索効率化が実現できるため，様々な問題に適用されている．ウェブページのレイアウトや照明配置などの組み合わせ最適化や，関数同定や画像変換フィルタの生成などに応用できる木最適化向けに差分進化の考えを取り入れる研究も行われている．

本研究では，組み合わせ最適化問題及び木最適化問題における差分を適切に定義し，両最適化問題向けに差分進化を拡張する．シミュレーションによって提案手法と従来手法を比較し，性能評価を行う．

第 1 章では，研究の背景について述べる．

第 2 章では本研究での差分進化拡張に関する基礎的な技術の紹介を行う．2.1 節では進化計算についての説明を行う．進化計算では複数の個体を用いて最適化を行う．各個体に対して目的関数（評価関数）を用いて適合度を計算し，その情報を使って新しい個体を作成する．優れた適合度を得た個体と似た特徴を持つ個体は同様に優れている可能性が高いという仮説のもと，優れた個体の近傍探索を行う．2.2 節では，進化計算を用いて人間の好みや感性に合ったものを見つける対話型進化計算の説明を行う．対話型進化計算では，ユーザからの評価を用いて最適化を行うため，評価時のユーザの疲労の大きさが課題である．その課題解決のために，より高性能な進化計算手法を用いて解発見までの評価回数を減らす取り組みと，評価インターフェイスを改良しユーザへの負担を軽減する取り組みが行われている．2.3 節では差分進化の説明を行う．差分進化では実数値ベクトルで個体を表現し，個体間の差分ベクトルを用いて効率的に探索を行う．差分ベクトルは新しい解候補を生成する際の個体の変異量として使用し，差分ベクトルが大きれば大域的な探索，差分ベクトルが小さければ局所的な探索を行う．この特徴から，個体間の差分ベクトルが小さければそれらの個体の適合度も近いという前提が必要である．また，評価方法が 2 個体の対比較評価であるため，従来手法で用いられる全個体を比較し点数を与える評価方法に比べて評価時のユーザ疲労が少ないという特徴も持つ．

第 3 章では組み合わせ最適化問題向けに差分進化を拡張する．3.1 節では従来手法である遺伝的アルゴリズム（GA）について紹介し，GA の課題を考察する．3.2 節では差分進化を組み合わせ最適化問題向けに拡張した Re-labeling Differential Evolution（RLDE）の提案を行う．組み合わせ最適化問題ではいくつかの対象の最適な組み合わせを探す．整数値ベクトルで個体を表現するが，それらの整数値は対象を識別するための番号でしかない．このような問題では個体同士の差分ベクトルは距離としての意味を持たない．差分進化では個体間差分ベクトルが小さければ適合度の差も小さいという差分進化の前提が必要である．RLDE では，個体分布情報から優れた対象を推定し，それらの番号が近くなるように番号を割り振り直す．そして，3.3 節では，テスト問題を用いて進化計算，対話型進化計算の条件でシミュレーションを行い，提案手法 RLDE と従来手法 GA を比較し，評価する．100 個体，16 個体の両条件で RLDE は GA に比べて優れた解を発見した． 3.4 節で第 3 章のまとめを行う．

第 4 章では木最適化問題向けに差分進化を拡張する．4.1 節では代表的な木最適化手法である遺伝的プログラミング（GP）について紹介し，GP における近傍探索や課題を考察する．4.2 節では差分進化を木最適化問題向けに拡張した先行技術である Tree Based Differential Evolution（TreeDE）について記述し，その課題を明らかにする．この手法では，木を固定長の実数値ベクトルとして表現することで差分進化を用いた木最適化を実現している．木においてノードの接続関係などの構造が適合度に大きく影響する．しかし，TreeDE では各ノードを独立に計算するため構造が崩れやすいという欠点がある．4.3 節では木最適化問題向けに差分進化を拡張した Tree Structure- Based Differential Evolution（TSDE）の提案を行う．TSDE では木の構造に着目しており，部分木の付与や削除をもって個体を変異させる．付与や削除する部分木の大きさを個体間差分によって決定することで，構造の異なる 2 個体の差分は大きくなり，構造の似た 2 個体の差分は小さくなる．これにより，様々な構造の木が存在する探索初期では大域的な探索を行い，探索が進むと局所探索に移行する．4.4 節では，関数同定問題を用いて進化計算，対話型進化計算の条件でのシミュレーションを行い，TSDE と従来手法である GP，TreeDE との比較評価を行う．100 個体，16 個体の両条件で TSDE は従来手法に比べて優れた解を発見した．対話型進化計算において従来手法よりも疲労軽減が期待できる．4.5 節で第 4 章のまとめを行う

第 5 章では，本論文のまとめを行う．本研究では，組み合わせ最適化問題及び木最適化問題において，差分進化の個体間差分を用いた効率的な探索と対話型進化計算における評価時のユーザ疲労軽減を目的とし，差分進化の拡張を行った．シミュレーションでは両提案手法は多個体条件で従来手法よりも高い確率で大域的最適解を発見し，少個体条件では探索早期において従来手法よりも優れた解を発見した．さらに対話型進化計算では対比較評価を利用することで，これまで疲労が大きく最適化困難であった問題に対しても最適化が可能となる．これにより，差分進化が

適用できる現実問題の範囲を拡大することができる．

論 文 調 査 の 要 旨

目的関数を最大あるいは最小にする最適解を，生物の進化にならって探索する手法である進化計算は，目的関数の値のみが入手可能なブラックボックス型最適化問題にも適用可能であり，近年の計算機性能の向上を背景にさまざまな最適化問題に適用されている．なかでも差分進化は，最適解発見に必要な大域的な解探索と局所的な解探索の切替えが，解候補間の差分を利用して適切かつ自動的に行われる利点を有しており，連続変数で定義された目的関数を対象とする連続最適化問題を解く最も性能が高い進化計算手法の一つとされている．一方，現実には，最短経路探索問題やデータの最良近似関数決定問題など，連続最適化問題とは異なる組み合わせ最適化問題や木最適化問題に分類される問題も数多く存在する．このため，差分進化を組み合わせ最適化問題等に適用する研究が行われているが，形式的・機械的な適用に留まっており十分な性能を得るに至っていない．

本論文は，組み合わせ最適化問題と木最適化問題向けに拡張，改良した差分進化手法を開発したものであり，以下の点で評価できる．

1. 組み合わせ最適化問題において，選択肢の識別に番号が用いられるが，従来手法ではこれは単なる識別子であってその値の差の大小は意味を持たなかった．本論文では，差分進化が適切に機能するように，値の差が小さければ目的関数値も近い値をとるように，過去の探索履歴に基づいて動的に識別子を再定義する手法を開発している．これを用いた差分進化手法を最短経路探索問題に適用し，組み合わせ最適化の代表的手法である遺伝的アルゴリズムや通常の差分進化に比べて最適解により近い解を得ることができ，特に通常の差分進化では最適解が得られない問題についても提案法は最適解を与えることを示している．

2. 木は，多段にわたる選択肢選択や，関数，プログラムを表現することができる．木は複数のノードがアークによって接続された２次元構造を持っており，その差分を定義する際にも構造を考慮することが必要である．本論文では，２次元木構造の次元ごとの役割の違いを考慮した差分と，差分を木に加える加算演算を新しく定義している．これらを活用した差分進化手法を，データの最良近似関数を見出す例題に適用し，木最適化の代表的手法である遺伝的プログラミングおよび既存の木最適化向け差分進化の２手法と比べて，得られた関数の誤差が数分の一から数十万分の一と小さく，また，高い頻度で最適な関数が得られることを確認している．

3. 最適化問題には，照明やウェブページのデザインのように人間による解候補評価が必須の問題もある．この種の問題の多くは，人間による評価に基づいて解候補を改善していく対話型最適化手法による解を必要とする．差分進化は２解候補の比較評価のみを利用するため，多数の解候補を同時に評価する必要がなく，人間による評価が容易であり，対話型最適化に適している．しかしながら，評価の実施回数の増大は評価者の疲労や評価誤りにつながる．本論文では，上記の提案手法について，評価回数が制限された対話型最適化の状況における性能を評価し，遺伝的アルゴリズム，遺伝的プログラミング，および既存の進化計算法と比較して，２倍程度高速に実用的な解を得ることができることを示している．

以上要するに本論文は，連続最適化問題の優れた解法である差分進化を，組み合わせ最適化問題と木最適化問題に有効に適用できるように，これらの問題における差分の新しい定義を提案し，それを踏まえて差分進化を拡張したものである．この成果は，目的関数の値のみが入手できるブラックボックス型の組み合わせ最適化問題および木最適化問題の良好な解の獲得，および，人間による評価を必須とする対話型最適化における人間の疲労と誤りの軽減および解探索性能の向上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．