

Title	内容の要旨；審査の要旨
Sub Title	
Author	
Publisher	慶應義塾大学理工学部
Publication year	2024
Jtitle	慶應義塾大学理工学部研究報告別冊 No.96 (2023.) ,p.1- 84
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO50002003-20230002-0001

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

内容の要旨

報告番号	甲 第6103号	氏 名	櫻田 国治
主論文題名： A Study on Body Perception and Motor Control of an Extended Body Synchronized with the User's Body (ユーザ身体と同期する拡張身体の身体認知と運動制御の検証)			
ユーザがウェアラブルロボットアームに代表される拡張身体を制御する際、拡張身体を身体に統合（身体化）することで直感的かつ効率的な制御を実現できる。この身体化は、ユーザの運動にも影響を与えるため、身体化プロセスにおけるユーザの運動制御と拡張身体に対する身体知覚の検証が求められている。本論文では、バーチャル空間で実装したウェアラブルロボットアームを用いて拡張身体の身体化プロセスを検証した。この検証により、ユーザが拡張身体をどの様に身体に統合し、運動モデルを更新するか明らかにした。身体化した拡張身体を制御する時のユーザの運動と拡張身体に対する知覚を知ることで、ユーザが拡張身体を自身の身体のように制御できる設計への応用が期待できる。 はじめに、本論文における研究の背景と目標を述べ、拡張身体に関連する研究を概観する。これを踏まえて、拡張身体に関する基礎知識をもとに、ユーザが拡張身体を自身の身体に統合する要件について検討する。 次に、研究の第一部では、拡張身体が参照する座標系（参照系）がユーザの運動制御に与える影響を検証した。実験にあたって、従来のロボットアームの代表的な参照系：空間系（空間固定型）、胴体系（胴体運動参照型）、頭部系（頭部運動参照型）、にそれぞれ従うバーチャルウェアラブルロボットアーム（以下アーム）を実装した。そして、各参照系がユーザの運動制御と主観的な身体化感覚に影響するか検証した。実験では、ユーザおよびアームの運動解析と主観評価によって各参照系の影響を比較した結果、実験参加者が胴体系のアームを自身の身体のように制御したことが示された。分析の結果、アーム制御に対する身体知覚の帰属（知覚帰属）の影響について検証の必要性が示唆された。 研究の第二部では、アーム制御に対する知覚帰属の影響を検証するために、ユーザの手・足の平均座標に同期するアームをVR空間に実装した。また、生得的な身体とアームの視覚的な類似性が知覚帰属に影響すると仮定して、視覚的類似性の異なるエンドエフェクタ：ヒューマノイド外観、マニピュレータ外観、をそれぞれ実装した。実験においては、運動課題による手・足の固有受容感覚と主観的な身体化感覚の帰属、ユーザの誤差補正、をそれぞれ計測した。実験の結果、手・足の固有受容感覚の帰属と主観的な			

身体化感覚の帰属が異なることが明らかとなった。また、マニピュレータ外観が知覚帰属における被験者間バイアスを引き起こしたため、視覚的類似性が知覚帰属の説明変数である可能性が示唆された。一方、ユーザの誤差補正に変化はなかったため、知覚帰属とユーザの運動モデル変化に要する時間が異なることが示唆された。これらの結果は、ユーザと拡張身体間のマッピング関係とユーザの運動制御の関係性の理解に貢献する。

結論として、本論文は、ユーザが拡張身体をどの様に身体に統合して運動モデルを更新しているか理解をすることで、拡張身体の身体化および設計の開発に貢献するものである。

審査の要旨

報告番号	甲 第 6103 号	氏 名	櫻田 国治
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 杉本 麻樹
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 斎藤 英雄
		慶應義塾大学准教授	博士（メディアデザイン学） 杉浦 裕太
		豊橋技術科学大学教授	博士（学術） 北崎 充晃
学士（工学）、修士（工学）櫻田 国治君提出の学位請求論文は、「A Study on Body Perception and Motor Control of an Extended Body Synchronized with the User's Body（ユーザ身体と同期する拡張身体の身体認知と運動制御の検証）」と題し、6 章で構成されている。 人間拡張(Human Augmentation)の研究分野においては、ユーザがウェアラブルロボットアームに代表される拡張身体を制御する際、特定の生得的身体部位の運動を拡張身体が参照するように割り当てることで直感的な操作を実現できることが知られている。こうした拡張身体の手操作は、単一の身体部位の参照のみではなく、手・足などの複数の部位を同時に参照して拡張身体を操作することが可能である。本論文は、複数の部位の同時参照による拡張身体の手操作における身体認知をバーチャル空間で実装したウェアラブルロボットアームを用いて検証したものである。 第 1 章では、人間拡張と拡張身体のコセプトについて概観し、身体認知の指標として固有受容感覚ドリフト、主観的な身体化錯覚、ユーザの運動制御について説明している。これらを踏まえて、本研究の目的として、拡張身体の手知覚帰属と運動変容に基づいた身体認知を検証することを述べている。 第 2 章では、拡張身体、身体認知の指標、ユーザの運動制御について関連研究をまとめている。また、学術領域における本研究の立ち位置を明確にしている。 第 3 章では、VR(Virtual Reality)を用いた拡張身体の手操作の検証について概説している。併せて、VR 空間における拡張身体の手構築、身体動作と拡張身体の手同期、及び身体認知の検証について触れ、検証に用いるフレームワークの設計を述べている。 第 4 章では、拡張身体が参照する座標系（参照系）がユーザの手運動制御に与える影響を検証した。実験では、拡張身体の手代表的な参照系：空間系（空間固定型）、胴体系（胴体運動参照型）、頭部系（頭部運動参照型）、にそれぞれ従う拡張身体を VR 空間に実装した。実験では、運動解析と主観評価によって各参照系の影響を比較した結果、実験参加者が胴体系の拡張身体を自身の身体のように制御したことが示唆された。また、拡張身体の手制御に対する身体知覚の帰属（知覚帰属）の検証の必要性が示唆された。 第 5 章では、知覚帰属の影響を検証するために、ユーザの手・足の平均座標に同期する拡張身体を VR 空間に実装を行うとともに、拡張身体の手外観が知覚帰属に与える影響を調査するために視覚刺激を統制した条件における検証を行なっている。運動課題による実験の結果、手・足の固有受容感覚の帰属と主観的な身体化感覚の帰属が異なることが明らかとなった。また、視覚的類似性が知覚帰属の説明変数である可能性が示唆された。一方、ユーザの手運動誤差補正に変化はなかったため、知覚帰属とユーザの手運動モデルの変容は、異なる学習プロセスに起因していることが示唆された。 最後に、第 6 章では本論文で得られた成果と結論をまとめ、各実験の手見によるユーザと拡張身体間の手の参照関係とユーザの手運動制御の関係性の理解に関する貢献について述べている。また、将来的な指針として、身体認知とユーザの手運動制御の関連性の検証と VR 空間における拡張身体の手可能性について議論している。 以上、要するに本研究は、人間拡張に関する研究の一環として、複数の部位を同時に参照した拡張身体の手操作において、主観的な拡張身体の手知覚帰属と客観的な運動解析に基づいた身体認知を検証した結果をまとめているものであり、工学上寄与するところが少なくない。 よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第6105号	氏 名	Zhang, Yiqun (張 逸群)
主 論 文 題 名 : Open-Domain Dialogue Generation with Deep Learning (ディープラーニングを用いた非タスク指向の対話生成)			
本論文は、深層学習技術を用いて、非タスク指向の対話において、高品質な応答を生成する手法を述べる。応答に対し、対話の文脈や話題の関連性、個人性の考慮、そして、長期的な対話でのユーザ体験という観点から、三つの異なる手法を提案する。 第一の手法は、階層的セルフアテンションと話題拡張のネットワークから構成される新しい会話生成モデルである Anna を提案した。日常会話では、人々は対話の流れを理解し、話題に関する知識を組み立てながら返答する。しかし、既存の対話生成モデルは単語や発話の依存関係を理解する能力が弱く、文脈の理解が不十分であり、無関係な応答を生成してしまうことがある。そして、ほとんどの研究では、話題情報の活用を取り組まずに、応答に話題の関連性が欠けてしまう。これらの課題を解決するため、Anna は、文脈の依存関係を捉え、重要な単語や発話により大きな重みを割り当て、文脈表現を計算する。なお、話題情報をモデル化し、話題関連の事前知識を使用し、話題表現を合成する。二つの表現は、応答の確率分布を共同で決定し、実際の会話で人間の返事の振る舞いを効果的に実現できる。実験により、Anna が応答品質、パラメータサイズ、応答速度において、ベースラインモデルを上回る性能が実現できた。 人間らしい対話の実現には、より高度な個人性を特化した応答が必要であり、相手の人物像を推論することが重要だと考える。しかし、従来研究の提案したモデルを分析した結果、生成される応答は自己中心的であり、相手のことを考慮していないことがわかった。また、Anna が相手の個人性を考慮しなかったことを踏まえ、第二の手法として、相手の潜在的個人性をモデル化し、相手に適合した応答を生成するフレームワークを提案した。ユーザごとに詳細な個人情報を収集することは難しいため、外部知識を使わずに、会話履歴から相手の潜在的な個人性とその表現形式のモデル化に注力した。感知変数と調節変数という二つの潜在変数は条件付き変分法を用いて構築され、対話の進みに連れ、相手の人物像を認識し、文脈に応じて適度な個人性を盛った応答を生成することを実現した。自動評価と人間評価により、提案手法が生成した対話は最先端の手法に比べて、よりユーザのことに興味を持ち、かなりの個人性に特化した応答を実現した。 先述した提案の学習方式は、応答の確率分布の最尤推定を最適化する。しかし、コーパスにはよく局所的最適な対話があり、かつ、最尤推定が対話方向をモデル化できず、長期的な視点から対話の挙動を学習するには不十分である。そこで第三の手法として、非タスク指向の対話を制御問題として扱い、人間心理をもとに事前定義した評価関数を			

使い、エージェントの方策を調整できる強化学習に取り組んだ。これにより、良いユーザ体験を確保するための「対話の先を見据えた」能力をエージェントに与えることが可能になる。しかし、対話の動作空間が膨大であり、高価値の動作が少ないため、動作サンプリングによる方策改善が必要である。強化学習を対話生成に応用するならば、方策改善が非常に非効率である。本研究は理論と実験により、方策性能がサンプルサイズと相関することを示したうえ、対策として、最も有望な応答分類を探索するデュアル粒度の Q 関数を提案した。これにより、より少ない方策反復で最適解を達成できた。

本論文で提案された技術は、異なる観点から対話システムが持つべき様々な能力を備える。そして、汎用性が高い手法のため、簡単に大型深層モデルに適用できる。本論文は非タスク指向の対話生成に知見を提供し、その更なる発展に貢献できると考える。

審査の要旨

報告番号	甲 第 6105 号	氏 名	Zhang, Yiqun (張 逸群)
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士 斎藤 博昭
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 今井 倫太
		慶應義塾大学教授	博士（情報学） 杉浦 孔明
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 大澤 博隆
学士(情報工学)、修士(工学) 張逸群君提出の学位請求論文は「Open-Domain Dialogue Generation with Deep Learning（ディープラーニングを用いた非タスク指向の対話生成）」と題し、全5章からなる。本研究は深層学習の手法を基盤として、文脈と話題の関連性、個人性の特化、および長期的なユーザ特徴獲得の三つの観点から、非タスク指向の対話生成における応答の質を向上させることを実証したものである。 第1章は序論であり、本研究の背景、目的、この分野における当研究の意義、および今回扱う対話の範囲設定を述べている。 第2章では、対話の文脈と主題を考慮し、一貫性と多様性を同時に備える応答生成手法を提案する。実験では、提案モデルは適度な大きさのモデルサイズを保ちながらも、大規模言語モデルを上回る性能を実現している。さらに、ネットワークの自己注意スコアを可視化し、提案モデルが文脈の注目すべき部分をどのように検出しているかを明らかにし、アブレーション実験により、各ネットワークコンポーネントの有効性を検証している。そして、提案された階層的エンコーダとトピック増強ネットワークが文脈と主題を効率的にモデル化できるとの結果を示している。 第3章では、変分法に基づいて、文脈だけから潜在空間における相手のペルソナ分布を算出することにより、個人性に特化した応答を生成する手法を提案し、モデルを学習するための変分下限を導出している。実験では、自己中心的な発話と比べ、相手の個人性に特化した応答がユーザの高い対話参加度を獲得できることを示している。そして、提案手法は応答に含まれる個人性の情報がより豊富であり、自動評価尺度とアンケート分析において従来モデルを上回る結果となったことを報告している。変分下限の事前と事後ネットワークに対する分析により、提案手法が非常に有効であることを示している。さらに、変分推論の学習時に多発する事後崩壊を防ぐために提案した正規化の有効性を確認している。また、相互情報量とコサイン距離をもとに構築したレスポンスセレクトが応答の一貫性と多様性を増やす効果があることを明らかにしている。 第4章では、長い対話履歴に着目し、強化学習を対話生成に応用する手法を提案している。探索できないアクション区間における従来のサンプリング付きの方策反復法が、収束時にポリシーの状態価値がサンプリングサイズとサンプルの行動価値にそれぞれ正比例することを理論的に証明している。さらに、導出された定理を基に、提案手法の有効性を理論展開している。実験では、提案アルゴリズムがより効率的に方策反復できることを明らかにし、その結果が理論と一致することを示している。アルゴリズムの中核部分として、デュアルQ関数とコントロールジェネレータの有効性を明らかにしている。そして、設定した報酬の観点から提案手法が長い対話において、ユーザ体験を向上させる効果があることを示している。 第5章では、各章における結果の要約と今後の研究方向について述べている。 以上、本論文は堅固な理論的根拠に基づき、非タスク指向の対話生成のモデルを構築した。さらに、多くの実験を通じて、その有効性と優越性を示した。本研究の成果は工学的手法を用いた対話生成の研究として寄与するところが少なくない。また、これらの成果は著者が自立して研究活動を行うために必要な高度な研究能力、並びにその基礎となる豊かな学識を有することを示したといえる。 よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

Thesis Abstract

Registration Number	“KOU” No.6116	Name	Zhang, Yujie
Thesis Title			
Theoretical Study on Transport and Kondo Effect in Quantum Dot Interferometer			
Quantum dot (QD) is a quasi-zero-dimensional system of nanometer scale, which has discrete energy levels and a large charging energy. To measure the transmission phase shift through the QD, a small ring with an embedded QD, so-called QD interferometer, has been intensively examined by both experimental and theoretical studies. However, there are still controversial issues regarding the interferometer, the accuracy of the phase measurement, the shape of the conductance peak, and phase shift in the Kondo regime. In the present thesis, we examine a double quantum dot (DQD) in parallel, as a tractable model for the QD interferometer, to address the issues. One of the DQD (QD1) represents an embedded QD and the other (QD2) for the reference arm of the ring. First, we formulate the nonequilibrium transport through the DQD using the Keldysh Green's functions. We obtain the useful formula of the linear conductance in the absence and presence of Coulomb interaction U in QD1, in multiterminal geometry. The Kondo effect is taken into account by the Bethe ansatz exact solution at temperature $T=0$. Regarding the shape of the conductance peak as a function of energy level in QD1, we show a crossover from an asymmetric Fano resonance (Fano-Kondo effect) to a symmetric Breit-Wigner resonance (Kondo plateau) in the absence (presence) of U, by decreasing the connection between the QDs through the leads. As for the measurement of the phase shift, which is impossible owing to the Onsager's reciprocity theorem in the two-terminal geometry, we show a possible observation of phase locking at $\pi/2$ in the Kondo regime in the three-terminal geometry. Next, we propose a numerical method to simulate the transport experiment for a QD interferometer made of two quantum wires in parallel. The wires are partly tunnel-coupled to each other to form a mesoscopic ring with an embedded QD. Our method consists of two stages. In the first stage, we represent the experimental system with a tight-binding model by discretizing the space. The conductance around a Coulomb peak is evaluated as a function of magnetic field, where the Coulomb interaction is irrelevant. We show a clear Aharonov-Bohm (AB) oscillation in spite of multiple conduction channels and magnetic field inside the wires. In the second stage, we adopt an extended DQD model to reproduce the Coulomb peak and AB oscillation obtained in the first stage in the absence of Coulomb interaction U. Finally, we calculate the conductance in the Kondo valley using the DQD model in the presence of U. We observe a phase locking at $\pi/2$ in accordance with the experimental result. In conclusion, the present thesis has elucidated the transport properties and Kondo effect in the QD interferometer using the DQD model, and addressed the controversial issues in mesoscopic physics. Then we have proposed a numerical method to calculate the Kondo effect in realistic systems.			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6116 号	氏 名	Zhang, Yujie (張 宇傑)
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	理学博士 江藤 幹雄
	副査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 能崎 幸雄
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 神原 陽一
		慶應義塾大学准教授	博士（理学） 山内 淳
学士（理学）、修士（理学）張宇傑君の学位請求論文は「Theoretical Study on Transport and Kondo Effect in Quantum Dot Interferometer（量子ドット干渉計における輸送現象と近藤効果の理論研究）」と題し、全4章より構成されている。 半導体の微細加工で作製されるナノメートルスケールの系は、メゾスコピック系物理学の舞台である。メゾスコピック系では、電子の量子力学的性質が輸送特性に直接反映される。例えば、微小リングに2つの外部リードを接続した系では、電子の波動性による「二重スリットの干渉実験」を電気伝導測定によって実現できる。その干渉効果はアハラノフ・ボーム効果によって磁場で制御可能である。電子を閉じ込める微小な箱である量子ドットでは、電子の粒子性に起因するクーロンブロックード、共鳴トンネル、近藤効果等が観測される。本学位請求論文のテーマである量子ドット干渉計は、微小リングに量子ドットを埋め込んだ系である。この系は量子ドットのコヒーレント伝導の観点から実験、理論両面で長年研究されているが、電気伝導度の共鳴ピークの形状、および量子ドットを通る電子の位相測定に関する未解決問題が残っている。張君は、複数の伝導チャンネルを取り入れた理論計算と数値シミュレーションを行い、これらの問題を解明している。 第1章は序論である。量子ドットの輸送特性、アハラノフ・ボーム効果等の基礎事項、および量子ドット干渉計に関する先行研究について説明した後、本研究の目的を述べている。 第2章では、量子ドット干渉計に対するモデルとして並列2重量子ドット系を考察し、その輸送特性の計算を定式化している。外部リード中にある複数の伝導チャンネルの影響を特徴づける新しいパラメーターを導入している。まず、量子ドット中のクーロン相互作用 U が無視できる場合において電気伝導度のピーク形状を調べ、伝導チャンネル数の多寡によって非対称なファノ共鳴や対称なブライト・ウィグナー共鳴が生じることを見出し、異なる実験結果の説明に成功している。クーロン相互作用 U がある場合、この系では低温で近藤効果が観測される。それをベーテ仮説による厳密解の手法によって取り入れ、非対称なファノ近藤共鳴から対称な近藤プラトー構造へのクロスオーバーを導出している。さらに、多端子の量子ドット干渉計を取り上げ、量子ドットを通る電子の位相測定について議論している。アハラノフ・ボーム振動の位相を調べることで、量子ドットを通る電子の位相測定が半定量的に可能であること、近藤効果によって位相が $\pi/2$ に固定されること、を示している。 第3章では、量子ドット干渉計を用いた実験の数値シミュレーションを行っている。4端子の微小リング構造に量子ドットが埋め込まれた実験系を、空間を離散化したタイト・バインディング・モデルによって表現し、その電気伝導度を数値的に評価している。量子ドット中のクーロン相互作用 U が無視できる場合に、電気伝導度のピーク構造、アハラノフ・ボーム振動、位相測定を調べている。次に、実験系における近藤効果を計算する新しい方法を提案している。まず、複数のエネルギー準位を持つように拡張した並列2重量子ドットモデルを採用し、そのパラメーターを数値シミュレーションの結果を再現するように決定する。次に、そのモデルにクーロン相互作用 U を導入し、第2章の方法によって近藤効果を取り入れる、というものである。計算結果は、実験で観測された近藤効果による電気伝導度、および位相測定の結果と良い一致を示している。 第4章は結論であり、本研究の成果が総括されている。 本研究は、メゾスコピック系物理学における重要なテーマである量子ドット干渉計の輸送特性に関する諸問題を理論的に解明しており、基礎研究として大きな意義がある。よって、本論文の著者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

Thesis Abstract

Registration Number	"KOU" No.6119	Name	Lo, Yung Han
Thesis Title The Total Synthesis of Ikoamide and Odookeanynes, Highly <i>N</i>-Methylated Lipopeptides from Marine Cyanobacteria			
Natural products are secondary metabolites produced by living organisms and found in certain organisms. Secondary metabolites found in marine organisms often possess unique structures and potent biological activities. However, challenges in researching marine natural products include limited natural supply and difficulty assessing their biological activities. On the other hand, organic synthesis chemistry can provide a quantitative supply by the total synthesis of natural products. It contributes to exploring chemical biology through the utilization of natural products. Through a series of studies, I have achieved the total synthesis of two natural compounds for the first time. Chapter 1 introduces the history of the discovery, development, and applications of various marine cyanobacterial metabolites. It also discusses the progress of research through organic synthesis, leading to the total synthesis or semi-synthesis of natural marine cyanobacterial metabolites. Chapter 2 describes the first total synthesis of ikoamide, a highly <i>N</i>-methylated lipopeptide from the marine cyanobacterium <i>Okeania</i> sp. Ikoamide is a linear lipopeptide broken down into an octapeptide and a fatty acid portion. The desired octapeptide was obtained through deprotection and coupling using protected amino acids. The fatty acid portion was synthesized from a chiral known compound by a series of reactions. Finally, the deprotected octapeptide was coupled with the fatty acid, achieving the first total synthesis of ikoamide. Additionally, the synthesized ikoamide was subjected to antimalarial and antitrypanosomal activity testing, yielding promising results. Chapter 3 describes the first total synthesis of odookeanynes A and B, two alkynyl-containing lipopeptides from the marine cyanobacterium <i>Okeania</i> sp. Since structurally similar lipopeptides have been shown to possess anti-parasitic activity, odookeanynes A and B are expected to exhibit similar activity. Odookeanyne A and B are disassembled into peptide and fatty acid portions. After completing the synthesis of the modified tetrapeptide, the corresponding fatty acids, which were synthesized employing known methods, are coupled to it, achieving the first total synthesis of odookeanyne A and B. Additionally, two related analogs are synthesized through hydrogenation reactions. Synthetic odookeanynes A and B showed potent antitrypanosomal activity. Data from antitrypanosomal and antimalarial activity experiments suggest that odookeanynes A and B may interact with trypanosome-specific targets, indicating selective antitrypanosomal activity and their potential as antitrypanosomal agents.			

Chapter 4 summarizes these studies. Through these research endeavors, I achieved the total synthesis of these two natural compounds and elucidated their structures and biological activities. Total synthesis confirms the structures of natural compounds and provides a sufficient quantity of products for more extensive and valuable biological activity assessments. This will aid in the development of more effective tools for treating related diseases.

審査の要旨

報告番号	甲 第 6119 号	氏 名	Lo, Yung Han (駱 永翰)
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 末永 聖武
	副査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 藤本 ゆかり
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 高尾 賢一
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 高橋 大介
学士（理学）、修士（理学） Lo Yung Han（駱永翰）君提出の学位請求論文は「The Total Synthesis of Ikoamide and Odookeanyne, Highly <i>N</i>-Methylated Lipopeptides from Marine Cyanobacteria」（海洋シアノバクテリア由来高度 <i>N</i>-メチル化リポペプチド、Ikoamide と Odookeanyne 類の全合成）と題し、序論、本論、総括および実験項より構成されている。 天然物とは、生物によって産生され、特定の生物に含まれる二次代謝産物である。海洋生物から発見される二次代謝産物は、ユニークな化学構造と強力な生物活性を持っている。しかし、多くの場合、天然からの供給が限られていることが多く、さらなる生物活性の評価がしばしば困難である。そのような問題を解決する手段の一つに全合成研究がある。本論文の著者は、病原寄生虫に対する抗寄生虫活性に着目し、海洋シアノバクテリア由来の高度に <i>N</i>-メチル化された 2 種のリポペプチド天然物の全合成を初めて達成した。さらに、合成品を用いて抗寄生虫活性を評価した。 第一章は序論であり、さまざまな海洋シアノバクテリア代謝物の発見、開発、および応用の歴史について述べている。また、本研究と関連する海洋シアノバクテリア由来天然物の全合成研究を紹介している。 第二章では、海洋シアノバクテリア <i>Okeania</i> sp. 由来の ikoamide の初の全合成について述べている。ikoamide はオクタペプチドと脂肪酸部分からなる鎖状のリポペプチドである。オクタペプチド中間体は、保護されたアミノ酸を用いて、保護基の除去と縮合反応を繰り返すことにより得られた。脂肪酸部分は、光学活性な原料から、β-ヒドロキシケトンの立体選択的還元を鍵反応として合成した。最後に、オクタペプチド中間体と脂肪酸部分をカップリングし、ikoamide の初の全合成を達成した。さらに、合成した ikoamide の生物活性を評価したところ、マラリア原虫に対して顕著な毒性を示した。 第三章では、海洋シアノバクテリア <i>Okeania</i> sp. から単離された 2 つのアルキン含有リポペプチド、odookeanyne A と B の初の全合成について述べている。構造的に類似したリポペプチドが抗寄生虫活性を示すため、odookeanyne A と B にも同様の活性が期待されるが、天然物を用いた活性試験は実施されていなかった。まず、修飾テトラペプチド中間体を合成し、ついで、既知の方法を用いて合成した脂肪酸部を縮合することにより odookeanyne A と B の初の全合成を達成した。さらに、接触還元により 2 つの誘導体を合成した。合成品の odookeanyne A と B は抗マラリア活性が弱かった一方、非常に強力な抗トリパノソーマ活性を示した。したがって、odookeanyne A と B はトリパノソーマに特異的な標的分子と相互作用する可能性があり、選択的な抗トリパノソーマ剤として有望である。 以上、本研究では 2 つのリポペプチド天然物の全合成を達成し、その抗寄生虫活性を明らかにした。これは関連する疾患の治療に対する医薬品シードの開発に役立つものと考えられ、本研究成果は天然物化学のみならず関連する創薬化学分野にも貢献するものである。よって、本論文の著者は博士(理学)の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第6120号	氏 名	小塚 太資
主論文題名： Control Theoretic Modeling and Analysis of Molecular Communication Feedback Systems (分子通信フィードバックシステムの制御理論的モデリングおよび解析)			
分子通信は、生体内における個々の生体ナノロボット（人工細胞）同士の通信手段として近年注目を浴びている。多数のナノロボットが分子通信を介して大規模な分子通信フィードバックシステムを形成することで、集団として複雑かつ大規模なタスクを達成することが可能となり、将来的に薬剤の標的輸送や組織工学などへの応用に繋がると期待されている。工学応用に向けて所望の性能を達成する分子通信フィードバックシステムを設計するためには、大規模な分子通信フィードバックシステムの動的モデルを構築し、その基本特性を解析することが重要である。本論文では、分子通信フィードバックシステムの制御に向けた基礎的なモデリングおよび解析のフレームワークを提案する。 第1章では、分子通信システムの生物学的メカニズムおよびその工学応用について述べ、本論文の位置づけと構成を述べる。 第2章では、ナノロボット内の反応システムと拡散ベースの分子通信路からなる分子通信システムの動的モデルについて述べる。また、分子通信システムのシステム論的解析に関する既存研究についてまとめる。 第3章では、密接したナノロボット集団により構成される分子通信システムに注目し、反応拡散方程式に基づき、システムに対する外乱の影響を解析する計算手法を提案する。特に、システムの空間周波数成分ごとに外乱の抑制性能を表す指標を代数的に計算する手法を示す。 第4章では、分子通信システムのフィードバックに必要な双方向分子通信路を、制御理論的にモデル化するためのフレームワークを提案する。提案フレームワークでは、拡散方程式に動的境界条件を導入することで、分散したナノロボット間の拡散による相互作用を捉える。提案フレームワークに基づき双方向分子通信路の周波数応答特性を解析し、望みの周波数帯域の信号を伝達できる分子通信路の設計指針を示す。 第5章では、第4章で提案したフレームワークを発展させ、多数の分散したナノロボットで構成される大規模な分子通信システムの制御理論的モデルを構築し、安定性を解析する手法を提案する。提案する解析法では、大規模なシステムを複数の単入力単出力システムに分解することで、大規模な分子通信システムの安定性解析を容易にする。 第6章では、各章の内容をまとめ、本論文の成果と今後の課題を示す。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6120 号	氏 名	小塚 太資
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士（情報理工学） 堀 豊
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 内山 孝憲
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 井上 正樹
		慶應義塾大学専任講師	博士（工学） 山下 忠紘
学士（工学）、修士（工学）、Master of Science 小塚太資君提出の学位請求論文は、Control Theoretic Modeling and Analysis of Molecular Communication Feedback Systems（分子通信フィードバックシステムの制御理論的モデリングおよび解析）と題し全6章から構成されている。 近年、細胞や生体ナノロボット（分子ロボット）の間で行われる分子による情報伝達機構を「分子通信」と定義し、その特性を通信工学や制御工学の観点で理論解析する研究が行われている。これまでの分子通信の解析では、ナノロボット間の通信路のみに焦点を当てた解析が主流であり、通信主体であるナノロボット内で生じる化学反応のダイナミクスやナノロボット間のフィードバックにより生じる遅れを考慮した包括的な数理モデルや解析法は存在しなかった。そこで本論文では、分子通信によって双方向にフィードバック制御されるナノロボット群全体をシステムと捉え、そのダイナミクスを記述するシステム論的なモデル表現を提案し、分子通信するナノロボット群の周波数特性、安定性、およびロバスト性を理論的に解析するための方法を提案している。 第1章では、分子通信システムの分子生物学的なメカニズムとその工学応用を論じ、本論文の位置づけ、目的、および構成を述べている。 第2章では、ナノロボット内の化学反応と分子拡散による通信路から成る分子通信システム全体の反応拡散モデルを導出し、既存研究が扱うモデルとの相違点に明らかにしている。 第3章では、通信路の遅れが小さい場合の解析として、密接したナノロボット群により構成される分子通信システムに着目し、ナノロボット群の外乱応答特性の解析法を提案している。具体的には、反応拡散モデルの空間周波数分解を利用して、外乱の空間的特徴によるナノロボット群の応答速度の違いを代数方程式に基づいて解析する方法を提案している。 第4章では、通信路の遅れを陽に考慮した解析のために、ナノロボット、通信路、およびそれらの境界をそれぞれ2端子対回路で表現した双方向分子通信路のシステム論的なモデルを提案している。さらに、提案モデルを用いて双方向分子通信路の周波数応答特性を解析し、所望の帯域の信号を伝達するための分子通信路の設計指針を明らかにしている。 第5章では、第4章で提案した理論的枠組みを発展させ、多数のナノロボットで構成される大規模な分子通信システムの制御理論的なモデル表現を導出し、安定性解析法を提案している。特に、一般に解析が困難である大規模で高次元システムを単入力単出力システムに等価変換する方法を示し、ナノロボット群の安定性解析を簡易に行う方法を提案している。 第6章では、各章の内容をまとめ、本論文の成果と今後の展望を示している。 以上要するに、本研究は分子の拡散を介して情報伝達するナノロボット群を対象として、そのダイナミクスをシステム論的な観点で解析するための数理モデルの枠組み、およびシステムの基本的な特性を解析するための数理的な方法論を提案するものであり、システム制御工学および分子ロボティクスの発展に大きく寄与するものである。 よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第6121号	氏 名	鈴木 隆起
主論文題名：			
金属薄膜系におけるスピン流・軌道流の生成現象と電流誘起トルクに関する研究			
スピントロニクス研究において、スピン角運動量の流れ（スピン流）を利用した磁化の制御は、非常に重要な役割を果たしてきた。そのスピン流を生成する現象であるスピンホール効果や異常ホール効果についても積極的に研究が行われてきた。スピンホール効果は Pt などの重金属、異常ホール効果は Ni 及び Co などの遷移金属強磁性体で発現することが広く知られており、今もなお注目されている。さらに近年では、軌道角運動量の流れ（軌道流）の存在が理論的に示唆されたことを契機として、スピン流と同様に、磁化の制御に用いることが可能であると明らかになりつつある。軌道流は、軌道ホール効果によって生成することができるが、これはスピン軌道相互作用を必要としない効果であるため、Ti などの軽金属でも発現する。したがって非常に有望であるが、軌道流に由来する電流誘起トルクの物理は、Ti/Ni および Ti/Ni₈₁Fe₁₉ 二層膜では報告されているが、まだ明らかになっていない部分が多い。本研究では、金属薄膜系における角運動量流の生成現象（スピン・異常・軌道ホール効果）の観測及び強磁性体中で発現する電流誘起トルクに関する新たな知見を得ることを目指した。 本論文は、全 6 章により構成される。第 1 章では序論として、スピントロニクス発展の背景と本研究の目的について説明する。さらに、電子の持つ角運動量や磁化ダイナミクス、角運動量流の生成現象を含むホール効果、電流誘起トルクなど本研究での前提知識となる理論について説明する。第 2 章では、本研究における実験方法や解析方法について説明する。第 3 章では、強磁性体/常磁性体二層膜におけるスピンホール効果を観測し、スピン流由来の電流誘起トルクの電氣的制御を実現した結果を示す。第 4 章では、近年注目を集めるファンデルワールス強磁性体における異常ホール効果の観測及びスケーリング則に基づいた物理的特性の解明を行い、大きな外因性異常ホール効果の発見を示す。第 5 章では、強磁性体/常磁性体二層膜における軌道ホール効果に起因する軌道トルクを観測し、軌道トルクの強磁性層依存性を明らかにする。第 6 章では、本研究の結論として、得られた成果を集約して説明する。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6121 号	氏 名	鈴木 隆起
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士（工学） 安藤 和也
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 神原 陽一
		慶應義塾大学教授	博士（理学） 能崎 幸雄
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 海住 英生
学士（工学），修士（工学）鈴木隆起君の学位請求論文は「金属薄膜系におけるスピン流・軌道流の生成現象と電流誘起トルクに関する研究」と題し，全 6 章より構成される． スピンホール効果の発見を契機にスピン軌道相互作用を介したスピン流の生成が可能となり，このスピン流が生み出す電流誘起トルクを用いた電氣的磁化制御が近年のスピン트로ニクスの基盤となった．また，スピン軌道相互作用によるスピン流の生成機構として，古くから知られる異常ホール効果の重要性も指摘されはじめ，さらに最近では，スピン角運動量の流れであるスピン流ではなく，軌道角運動量の流れである軌道流が生み出す電流誘起トルクの存在も明らかになった．これらの進展により，スピンホール効果・異常ホール効果・軌道ホール効果によるスピン流・軌道流の生成とこれらが生み出す電流誘起トルクの定量的理解がスピン트로ニクスにおける本質的課題となった．本研究は，スピン트로ニクスの周辺分野で発展してきた，電気化学反応を利用した薄膜物性探索や原子層材料に関する知見，さらにコンビナトリアル成膜手法をスピン트로ニクス研究へと展開することで，電流誘起トルク定量手法の洗練化と原子層物質における異常ホール効果の発現機構解明を実現するとともに，軌道ホール効果による電流誘起トルク生成における強磁性体電子構造の重要性を示した． 本論文の第 1 章は序論であり，本研究の背景と位置づけが述べられる．第 2 章では，実験方法および解析手法が述べられ，試料の作製方法と電流誘起トルクの測定手法が示される．第 3 章では，イオン液体による電気化学エッチングを組み合わせたスピントルク強磁性共鳴測定が議論される．電気化学エッチングにより強磁性層膜厚を系統的に変化させた素子におけるスピントルク強磁性共鳴スペクトルの解析から，電流誘起トルクの定量が可能であることが示される．第 4 章では，ファンデルワールス強磁性体 Fe_5GeTe_2 における異常ホール効果に関する実験が述べられる．異常ホール効果の温度・膜厚依存性から，遷移金属強磁性体と比較して一桁巨大なスキュー散乱が Fe_5GeTe_2 に存在することが示される．第 5 章では，軌道ホール効果に起因する電流誘起トルクの強磁性合金組成依存性に関する実験が示される．$\text{Ni}_x\text{Fe}_{1-x}/\text{Ti}$ 構造における電流誘起トルク測定から，軌道ホール効果による電流誘起トルクは強磁性合金組成比に強く依存し，強磁性体における軌道応答が電子構造に極めて敏感であることが示される．第 6 章では本研究のまとめと今後の展望が示される． 以上，本論文は，スピン・異常・軌道ホール効果によるスピン流・軌道流の生成と電流誘起トルクに関する新しい知見を得たものであり，スピン트로ニクスの物理，工学応用に貢献するものである． よって，本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める．			

内容の要旨

報告番号	甲 第6122号	氏 名	道海 陽一
主論文題名：			
環状炭酸エステルの脱炭酸を起点とする炭素-炭素結合形成反応の開発			
本論文では、環状炭酸エステル類の脱炭酸反応を起点とする新規炭素-炭素結合形成反応の開発について、5章17節構成で述べている。 第1章では、環状炭酸エステルの脱炭酸を伴う分子内(3+2)環化付加反応によるビシクロ[3.3.0]オクタノン誘導体の合成について述べた。分子内に1,7-エンイン骨格を有するプロパルギルアルコールに対して、二酸化炭素固定化反応により環状炭酸エステルを合成した。この環状炭酸エステルに、酸触媒を作用させると脱炭酸反応に続く、分子内(3+2)環化付加反応が進行し、対応する5-5縮環化合物が得られると考えた。実際に、対応する環状炭酸エステルを合成し、種々の酸触媒を作用させたところ、1,2-ジクロロエタン溶媒中、加熱条件下で触媒量のトリフルオロメタンスルホン酸無水物を添加すると、脱炭酸型(3+2)環化付加反応が効果的に進行し、単一生成物としてビシクロ[3.3.0]オクタノン誘導体が得られた。生成物の相対立体配置はX線結晶構造解析により決定したところ、アルケン部位の幾何異性に関係なく同一の生成物が得られ、本反応が段階的な反応機構を経ることが示唆された。 第2章から第4章では、環状炭酸エステルと種々の炭素求核剤との分子間反応について述べた。環状炭酸エステルから脱炭酸を経て発生するオキシアリルカチオン等価体と炭素求核剤との分子間反応を実現できれば、あらかじめ環状炭酸エステルに反応部位の導入が必要な分子内反応よりも普遍性がある、合成化学的有用性の高い反応へと展開できると考えた。実際に、ルイス酸存在下、環状炭酸エステルに対して、炭素求核剤としてアリルシラン(第2章)やシリルシアニド(第3章)、シリルエノールエーテル(第4章)を作用させると、それぞれ対応するホモアリルケトン、β-ケトニトリル、1,4-ジカルボニル化合物が得られることを見出した。また、アリルシランおよびシリルエノールエーテルとの反応では、オキシアリルカチオン中間体との立体的な要因で、シリルシアニドとの反応は電子的な要因によって位置選択性が反映される可能性を示した。 第5章では、環状炭酸エステルの脱炭酸型1,2-転位反応について述べた。ピナコール転位は1,2-ジオールを酸性条件下で処理することで、脱水によるカルボカチオン中間体の発生を経た1,2-転位が進行し、カルボニル化合物を与える反応である。筆者は1,2-ジオールに対して、カルボニル化剤を用いて誘導した環状炭酸エステルにルイス酸を作用させることで、脱炭酸を経る1,2-転位反応の開発を試みた。実際に、ジクロロメタン溶媒中、四塩化ジルコニウムを室温で作用させると、脱炭酸を伴う1,2-転位が円滑に進行し対応するカルボニル化合物が得られた。また、環状炭酸エステルの前駆体である1,2-ジオールを同一条件下で反応を行ったところ、ピナコール転位が進行し、カルボカチオン中間体の安定性に基づいて1,2-転位が進行した。興味深いことに、脱炭酸型1,2-転位とピナコール転位では転位基の選択性が完全に逆転した。すなわち、脱炭酸を伴う1,2-転位はピナコール転位と相補的な反応として扱えることを示した。 以上、本論文では有機合成上有用な炭素骨格構築を念頭に、環状炭酸エステル類の脱炭酸を起点とする新規炭素-炭素結合形成反応の開発について述べた。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6122 号	氏 名	道海 陽一
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	理学博士 山田 徹
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 垣内 史敏
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 高尾 賢一
		慶應義塾大学教授	博士（理学） 末永 聖武
		北海道教育大学旭川校准教授	博士（理学） 齊藤 巧泰
本論文では、環状炭酸エステル類の脱炭酸反応を起点とする新規炭素－炭素結合形成反応の開発について、5章 17 節の構成で詳しく述べている。 第 1 章では、環状エノール炭酸エステルの脱炭酸を伴う、分子内(3+2)環化付加反応によるビシクロ[3.3.0]オクタノン誘導体の合成について述べている。分子内に 1,7-エンイン骨格を有するプロパルギルアルコールに対して、所属研究室で開発された二酸化炭素固定化反応によりエノール構造を有する環状炭酸エステルを合成した。この環状炭酸エステルに酸触媒を作用させると、脱炭酸反応で生じるオキシアリルカチオン等価体を經由して分子内(3+2)環化付加反応が進行し、対応する 5-5 縮環化合物が得られると考えた。実際に、1,7-エンイン骨格を有するプロパルギルアルコールから環状炭酸エステルを合成し、種々の酸触媒を作用させたところ、1,2-ジクロロエタン溶媒中、加熱条件で触媒量のトリフルオロメタンスルホン酸無水物の存在下、脱炭酸型(3+2)環化付加反応が速やかに進行し、ビシクロ[3.3.0]オクタノン誘導体が単一生成物として得られた。生成物の相対立体配置を単結晶 X 線構造解析で決定したところ、出発物質のアルケンの <i>E/Z</i> 異性体に関係なく同一生成物が得られたことから、本反応が段階的な反応機構を経ることが示唆されると結論している。 第 2 章から第 4 章では、エノール構造を有する環状炭酸エステルと種々の炭素求核剤との分子間反応について述べている。環状炭酸エステルから脱炭酸を経て発生するオキシアリルカチオン等価体と炭素求核剤との分子間反応は、あらかじめ環状エノール炭酸エステルに反応部位の導入が必要な分子内反応よりも普遍性がある、合成化学的に有用性の高い反応に展開できると考えた。実際にルイス酸触媒存在下、エノール構造を有する環状炭酸エステルに対して、炭素求核剤としてアリルシラン（第 2 章）やシリルシアニド（第 3 章）、シリルエノールエーテル（第 4 章）を作用させると、それぞれ対応するホモアリルケトン、β-ケトニトリル、1,4-ジカルボニル化合物が得られることを見出した。また、アリルシランおよびシリルエノールエーテルとの反応では立体的な要因が、シリルシアニドとの反応は電子的な要因が位置選択性に反映される可能性を示した。 第 5 章では、環状炭酸エステルの脱炭酸型 1,2-転位反応について述べている。1,2-ジオールは酸性条件下で脱水によるカルボカチオンを經由した 1,2-転位が位置選択的に進行し、対応するカルボニル化合物を与え、この反応はピナコール転位として知られている。筆者は 1,2-ジオールからカルボニル化剤により誘導した環状炭酸エステルに対し、ルイス酸を作用させることによる、脱炭酸を經由する 1,2-転位反応の開発を試みた。実際に、ジクロロメタン溶媒中、四塩化ジルコニウムを室温で作用させると脱炭酸を伴う 1,2-転位が円滑に進行し、対応するカルボニル化合物が得られることを見出した。また、環状炭酸エステルの前駆体の 1,2-ジオールからは、同一条件ではピナコール転位反応により、カルボカチオンの安定性に基づいた位置選択性で対応するカルボニル化合物が得られた。興味深いことに、本研究で開発した脱炭酸型 1,2-転位と従来法のピナコール転位では、転位の位置選択性が完全に逆転し、脱炭酸を伴う 1,2-転位はピナコール転位に対する相補的な反応として適用できることを示した。 以上、本論文では有機合成上有用な炭素骨格の構築を念頭に、環状炭酸エステル類の脱炭酸を起点とする新規炭素－炭素結合形成反応の開発について述べている。本研究は、標的化合物の合成研究など有機合成化学への応用展開も期待され、この分野の発展に大きく寄与するものである。 よって、本論文の著者は博士(理学)の学位を受ける資格があるものと認める。			

Thesis Abstract

Registration Number	"KOU" No.6123	Name	Tan, Yi
Thesis Title			
Design of High Efficiency Monolithic Switched-Capacitor DC-DC Converters for IoT Applications			
Switched capacitor power converter circuits are very common in power management integrated circuits. With the advantages of high integrity provided by on-chip capacitors, the switched capacitor circuits, or the charge pumps, are one of the commonly used structures in modern devices. Recently, with the development of Internet-of-Things (IoT) devices, the limited power sources bring a series of new challenges to switched capacitor power converters in many aspects. Therefore, the thesis brings our research on the low-power optimization of switched capacitor power converters. Taking the thermoelectric energy harvester as an example, our research efforts on the optimization of transistor performance under ultra-low-power conditions will be introduced, which enhances the peak efficiency that can be achieved by existing topologies. Meanwhile, the dual lower bound hysteretic control will be demonstrated, which provides efficient operation over a wide output power range. The proposed techniques hence are expected to improve the overall performance of generic switched-capacitor power converters (SCPC) in IoT applications. Chapter 1 describes the background of this research, and the switched capacitor power converter is compared with other types of power management integrated circuits to give an overview of characteristics. Chapter 2 describes the issues of designing switched capacitor power converters in Always-on IoT applications. It also describes the efficiency problems in ultra-low power operations when taking thermoelectric energy harvester as energy sources, the controller speed, and efficiency challenges in standby/wake-up state transitions. Chapter 3 describes the optimization of transistor performance in thermoelectric energy harvesting applications with a detailed analysis on the impact of transistor performance on the efficiency and discussion on the optimum way to enhance the efficiency under limited power constrain. Chapter 4 describes the dual lower bound hysteretic control method to address demand of response speed in standby/wake-up state transitions. It also describes how the proposed control can achieve frequency optimization to provide optimum frequency under different load levels. Chapter 5 summarizes the thesis and presents conclusions for future works.			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6123 号	氏 名	Tan, Yi (譚 藝)	
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	石黒 仁揮
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	中野 誠彦
		慶應義塾大学専任講師	博士（工学）	吉岡 健太郎
		東京大学大学院教授	博士（工学）	高宮 真
	Iowa State University, Assistant Professor, Ph.D., Huang Cheng			

学士(工学), 修士(工学) TAN Yi 君提出の学位請求論文は「Design of High Efficiency Monolithic Switched-Capacitor DC-DC Converters for IoT Applications (IoT 用途向け高効率モノリシックスイッチトキャパシタ DC-DC コンバータの設計)」と題し、5章から構成されている。

IoT 応用で環境発電デバイスが出力する電圧を、システムが必要とする電圧に変換する電源回路の重要性が高まっている。スイッチトキャパシタを用いた電源回路は、オンチップキャパシタを利用することで外付け部品点数を削減することが可能となり、小サイズ、低コストが必須の IoT 端末に向けた電源回路である。本研究は、スイッチトキャパシタ電源回路に関して、マイクロワットからミリワットにわたる幅広い出力電力範囲において変換効率を向上させ、さらに高速制御により負荷変動がある場合においても安定した出力電圧を生成する手法を考案し、試作チップによりその有効性を実証することを目的としている。

第 1 章は、序論であり研究の背景を述べている。スイッチトキャパシタ DC-DC コンバータを他の方式のパワーマネジメント集積回路と比較して、その利点と課題を説明している。

第 2 章では、常時接続 IoT 用途におけるスイッチトキャパシタ DC-DC コンバータの設計の課題を述べている。特にエネルギー源として熱電発電素子を使用する場合の超低電圧、低電力動作における課題として、変換効率、制御回路の速度について説明している。

第 3 章では、熱電発電素子を電源とする IoT 端末への応用を想定した昇圧型スイッチトキャパシタ DC-DC コンバータにおいて、発電素子の極めて低い出力電圧を効率的に昇圧するための MOSFET のゲート電圧の最適化について提案し、設計パラメータが効率に及ぼす影響を詳細に解析している。提案手法を導入したテストチップを試作し、入力電圧が 0.13 V という低電圧において 54% という高効率で昇圧することを可能にしている。

第 4 章では、スタンバイ/ウェイクアップ状態遷移における応答速度を向上するために二重下界ヒステリシス制御方法について提案し、その動作について解析している。提案手法を導入したテストチップを試作し、2 桁の負荷変動時に 80 ns という応答時間で出力電圧が安定化されることを実証している。

第 5 章は結論であり、各章のまとめ、および将来の研究の展望を述べている。

以上要するに、本研究はモノリシックスイッチトキャパシタ DC-DC コンバータにおいて、電力効率と応答速度を向上する手法を提案し、その有効性を実証したものであり、集積回路分野において工学上、工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

内容の要旨

報告番号	甲 第6124号	氏 名	奥岡 耕平
主論文題名：			
半自律テレプレゼンスロボットにおけるコミュニケーション操作調停の研究			
テレプレゼンスロボットは遠隔地に居る対話者との遠隔コミュニケーションを目的とした遠隔操作ロボットである。ビデオ通話等の平面的な映像を用いた手段に比べ、非言語動作や遠隔操作者の存在感を効果的に伝達できる。一方で、ロボットを操作する負荷が遠隔操作者に生じてしまうため、ロボットを自律化して共有制御する半自律テレプレゼンスロボットが提案されている。自律化によって操作負荷を削減するだけでなく、頷き等のコミュニケーションに有用な動作を自律化することで対話者への印象を向上することができる。しかし自律動作が遠隔操作者の意図と合致しない際に自律動作と遠隔操作の間で操作衝突を起こしてしまい、遠隔操作者に不快感を与えてしまう。衝突を削減するためには遠隔操作と自律動作を調停する必要があるが、コミュニケーションにおいてタスク情報に依存した既存の操作調停手法を適応することは困難である。そこで本論文では、タスク情報に依存しない操作調停をコミュニケーション操作調停と定義し、遠隔操作の入力に応じてシステムが自律動作を抑制するシステム側のアプローチと、操作者のシステムに対するトラストに応じて調停する操作者側のアプローチを組み合わせた半自律テレプレゼンスロボットの設計を提案する。前者のアプローチでは、汎用調停モデル ABAM を用いて遠隔操作と自律動作を適応的に切り替える調停機構を提案し、提案手法が操作負荷の削減と操作衝突の回避を両立できることを示した。後者のアプローチでは、操作者の自律システムに対するトラストに応じて自律動作と遠隔操作を切り替える手法に着目した。トラストに応じた調停では操作者のトラストを正確に推定する必要がある。そこで、半自律テレプレゼンスロボットにおいてトラストを正確に推定するために、複数の異なるロボットを用いる際のトラストの変化について調査した。自動運転車やドローンといった身近なデバイスの映像を用いて実験を行い、1つのデバイスに対するトラストの変化が他のデバイスに対するトラストに影響が生じること、エージェントデザインによってトラストの変化を制御できることを明らかにした。これらの研究の知見を基に、操作者のトラストに応じて自律動作の抑制を調整することで操作調停する半自律テレプレゼンスロボットの設計を示した。また、複数の半自律テレプレゼンスロボットを並列操作する際に有効となるエージェントデザインを提案した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6124 号	氏 名	奥岡 耕平
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 今井 倫太
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士 斎藤 博昭
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 杉本 麻樹
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 大澤 博隆
学士（工学）、修士（工学）奥岡耕平君提出の学位請求論文は、「半自律テレプレゼンスロボットにおけるコミュニケーション操作調停の研究」と題し、全7章で構成される。 本論文は、半自律テレプレゼンスロボットにおいて自律動作と遠隔操作の間に生じる操作衝突について論じている。半自律テレプレゼンスロボットは、遠隔コミュニケーションを目的とした遠隔操作ロボットであるテレプレゼンスロボットの動作を自律化して遠隔操作者と共有制御を行うロボットである。ここで、遠隔操作者の意図と合致しない自律動作は遠隔操作との間で操作衝突が生じてしまうため、衝突を削減しつつ自律化を維持するように操作を調停する必要がある。本論文では、タスク情報に基づいた操作調停が困難であるコミュニケーションにおける操作調停をコミュニケーション操作調停課題と定義し、課題に対してシステムが遠隔操作の入力に応じて自律動作を抑制するアプローチと、操作者のシステムに対するトラストに応じて操作を切り替えるアプローチを組み合わせた半自律テレプレゼンスロボットの設計を提案している。 第1章では、半自律テレプレゼンスロボットにおける操作衝突を問題として挙げると共に、他の共有制御を行う自律システムにおける操作衝突の性質と比較して、タスク情報に対する依存性の低い操作調停手法の必要性和実現に向けた本研究のアプローチについて論じている。 第2章では、本論文の前提となる知識を説明した上で、従来の操作衝突に対する研究を紹介し、コミュニケーション操作調停という観点から従来手法の問題点を整理すると共に、本研究の位置づけを明確化している。 第3章では、第4章で提案するシステムの基盤となる半自律テレプレゼンスロボットを開発した先行研究について述べている。また、先行研究で得られた知見から、人が意識的に行う動作である随意運動の自律化において操作衝突が生じやすく、調停において重要であることを明らかにした。 第4章では、汎用調停モデル Accumulator Based Arbitration Model(ABAM) を用いて遠隔操作の入力に則して自律動作を抑制することで特定のタスク情報に依存せずに操作衝突を調停する、半自律テレプレゼンスロボットアーキテクチャ「One Minder」を提案している。また、実験を通して One Minder が操作者の操作負荷の削減と操作衝突回避の両立させたことを実証している。 第5章では、半自律テレプレゼンスロボットにおいて操作者のトラストを正確に推定するために、複数の異なるロボットを用いる際のトラストの変化について調査した研究について述べている。自動運転車やドローンといった身近なデバイスの映像を用いて被験者実験を行い、1つのデバイスに対するトラストの変化が他のデバイスのトラストに影響が生じることを明らかにしている。 第6章では、これまでの研究で得られた結果を統合して、操作者のトラストに応じて自律動作の抑制を調整することで調停を行う半自律テレプレゼンスロボットアーキテクチャの設計を提案すると共に、将来の展望に関して述べている。 最後に第7章では、本論文で得られた成果と結論についてまとめている。 以上、本論文は、タスク情報に対する依存性の低い操作調停手法の実現に向けた要素技術の提案・設計・実装および調査を行い、半自律テレプレゼンスロボットにおけるコミュニケーション操作調停課題に対する有用性を示した点で、工学上寄与するところが少なくない。 よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第6125号	氏 名	茂木 厚憲
主論文題名： Manufacturing Digital Twin by Edge-based Monocular 6 DoF Object Pose Estimation (単眼カメラによる6自由度物体姿勢推定に基づく製造デジタルツイン)			
製造業における様々な課題に対処するため、近年デジタルツイン技術が提唱され始めている。デジタルツインの実現には、忠実に物理環境の条件を複製するために、現実世界の作業者や対象物体の位置や姿勢を正確に推定することが必須である。また、導入コストの低減を考慮し、単眼カメラ画像を用いることが好ましい。本論文では、人物・物体の単眼姿勢推定に関する新たな手法と、デジタルツイン技術における実際の応用事例について述べる。 初めに、単眼カメラ画像を用いた物体の6自由度姿勢推定手法について述べる。物体姿勢推定では実写の学習データの用意が困難であるため、CG データで学習し実写データで推論するアプローチがある。その際のドメインシフト問題（学習・推論で異なるドメインのデータを使うことによる精度低下）への対応のため、CG データと実際のデータで共通して得られる特徴であるエッジ情報を用いる。実験により、多数の直線を持つ物体の姿勢推定において本手法が効果的であることを示す。またドメインシフトの観点では、少数の実写の正解データによる Fine-tuning により精度が向上することを示す。 続いて、製造物を撮影した画像と CAD モデルの重ね合わせにより、製造ミスを検知する手法について述べる。この技術は、製造物一個一個に対しデジタルツインの概念を適用したと見做すことができる。ミスの存在下でも正確な位置合わせを行うため、一部ユーザ操作を含んだ粗密推定手法を用いる。実際の製造物を模した物体を用いた実験により、製造物にある製造ミスを特定できることを示す。 さらに、物体の6自由度推定技術と人物の絶対姿勢推定技術を統合した、物体の座標系をベースとしたデジタルツイン表現手法について述べる。本手法では、マルチホモグラフィから推定される関節座標を用いて、腰中心の相対座標から物体座標への変換を行う。これにより、未校正の単眼カメラが使用され、大量のデータセットの取得が困難な現場環境においても、リアルタイムでの人物・物体の可視化が可能である。ユーザスタディを含めた定性・定量評価により、本手法が多様な環境に対応可能であることを示す。 最後にまとめとして、本論文の概要と、製造業全体へのデジタルツインの実現のための将来課題を述べる。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6125 号	氏 名	茂木 厚憲
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 斎藤 英雄
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 杉本 麻樹
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 五十川 麻理子
		奈良先端科学技術大学院大学教授	博士（工学） 加藤 博一
学士（工学）、修士（情報理工学）茂木 厚憲君提出の学位請求論文は、「Manufacturing Digital Twin by Edge-based Monocular 6 DoF Object Pose Estimation（単眼カメラによる 6 自由度物体姿勢推定に基づく製造デジタルツイン）」と題し、6 章で構成されている。 製造業のさまざまな課題に対処するため、デジタルツイン技術が効果的な解決策として注目されている。本論文では、製造業のためのデジタルツイン構築のために不可欠な要素技術である、現実世界の作業員と作業物の位置と姿勢の推定のために、実装コストを抑えた単眼カメラシステムを利用した新しいアルゴリズムを提案し、その有効性検証結果についてまとめたものである。 第 1 章では、製造業の現場におけるデジタルツイン利用に向けた動向を紹介し、本論文でのユースケースとして対象としている鉄構製造現場のデジタルツイン化には、作業員と作業物の位置と姿勢の推定が重要であることを指摘し、本論文の目的と位置付けを明らかにしている。 第 2 章では、人物や物体の姿勢を推定するためのコンピュータビジョン技術と、製造現場で行われる作業員と物体のインタラクション支援技術に関する関連研究のサーベイが示されている。 第 3 章では、単眼カメラにより撮影された物体の姿勢を推定するために、対象製品の CAD モデル形状から様々な 6 自由度姿勢において合成したエッジ画像とその姿勢の関係を教師データとして学習した CNN を利用した手法を提案し、実験によりその有効性と性能を検証している。提案手法では、シミュレーションと物理的状況の両方に共通する特徴であるエッジ情報を利用することにより、推定精度とドメインシフトによる精度低下に対する堅牢性が改善できることを示している。 第 4 章では、カメラで撮影した製品の画像上に製品と CAD モデルの姿勢を一致させて重畳表示することにより、製品の製造ミスを検出する方法を提案している。提案手法では、製品の画像から抽出された 2D エッジと CAD モデルの 3D ラインをインタラクティブに一致させて製品の姿勢を推定することにより、従来手法と比較して製品の姿勢推定精度が向上できることを示している。 第 5 章では、物体の姿勢推定と、物体姿勢の基準となる座標系に対して絶対スケールを推定した人間の姿勢推定とを組み合わせたデジタルツイン構築手法を提案している。提案手法は、単眼カメラを利用するだけで、学習のための教師データセットの取得等の事前処理が困難な現場環境において、実時間で物体と人物の姿勢をリアルタイムにデジタルツインとして可視化できる。複数名の被験者によるユーザースタディにより提案手法が現場環境の利用に十分な姿勢推定精度を得られることと、公開データセットによる定量的評価により人間の関節位置を 200 mm 未満の精度で推定可能であることを実験により検証している。 最後に第 6 章では、本論文で得られた成果と結論をまとめ、本論文で提案した物体や人物の 6 自由度の姿勢推定による製造デジタルツインの実利用の可能性や、そのための今後の研究課題について議論している。 以上要するに本研究は、物体や人物の姿勢推定に画像のエッジ特徴を利用した新たな方法を提案し、姿勢推定により製造デジタルツイン構築を実現可能であることを示したものであり、工学上寄与するところが少なくない。 よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

Thesis Abstract

Registration Number	“KOU” No.6126	Name	Bai, Yue
Thesis Title			
Flexible Operation Modes in Fresh Fruit Supply Chains with Cold Storages			
This dissertation explores flexible operation strategies in fresh fruit supply chains (FSCs) with cold storages. In traditional FSCs, growers usually sell fresh fruits with thin profit right after harvesting due to the perishability. In order to mitigate the deterioration of fresh fruits, cold storages, which are generally divided into the regular atmosphere storage (RAS) and the controlled atmosphere storage (CAS), are built accelerating in rural areas. Depending on the extension period of shelf life, we propose flexible operation modes in fresh FSCs with RAS and with CAS, respectively. For RAS, we propose the flexible supply contract with put options (SCPO) for a rural fresh FSC with RAS, where the grower stores fresh fruits in RAS to extend the shelf life, which incurs extra storage costs that can be recovered by salvaging at a higher price later. The proposed model is analyzed from both the grower’s and the buyer’s perspectives. And the buyer’s and the grower’s profit functions are formulated. We derive the buyer’s optimal policies for the initial order and put options as well as the grower’s optimal policy for the planting quantity. The grower’s optimal supply tariff can be obtained only numerically. In particular, we obtain closed-form formulae to determine the buyer’s optimal order policy and the grower’s optimal planting quantity in a special case. We show numerical experiments in which we examined the effectiveness of the proposed model and analyze how the parameters affect the performances of both the grower and the buyer. For CAS, we consider a single-period, three-stage model in a rural fresh FSC with CAS. With CAS, the grower produces fresh fruits and then sells them to a two-stage market, i.e., in-season and off-season, in sequence. We formulate the grower’s profit function, propose the solution for the grower to make the optimal planting quantity and derive the optimal rental capacity of CAS. In particular, we study this model in a special case, and analyze numerically how the parameters influence the grower’s behavior in such a supply chain. Finally, the conclusions of this dissertation are presented and we explain the future direction of this research.			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6126 号	氏 名	Bai, Yue (白 ゲツ)
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 松川 弘明
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 鈴木 秀男
		慶應義塾大学教授	博士（理学） 成島 康史
		上智大学教授	博士（工学） 伊呂原 隆
上記の Bai Yue（ハク・ゲツ）君の学位請求論文では、「Flexible Operation Modes in Fresh Fruit Supply Chains with Cold Storages（低温倉庫を備えた新鮮な果物のサプライチェーンにおける柔軟なオペレーションモードに関する研究）」との題目のもとで、従来のオペレーションモードを拡張し、オプション手法を取り入れたサプライチェーン契約手法に基づいた柔軟なオペレーションモードのモデルを提案している。 近年、果物のサプライチェーンマネジメントの研究の1つの課題として、廃棄の問題と農家の収入減少問題が注目を浴びている。工業製品とは異なり、果物は1年に1回短い期間中に収穫され、市場に出荷される特徴がある。鮮度が価格に大きな影響を与え、売れなければ廃棄される。そのため、売り手である農家の交渉力が弱く、果物の卸売値が安い。また、果物にも「豊作貧乏」という問題があり、市場における価格形成メカニズムにより農家の収入は最終顧客の需要や競争相手の影響も受ける。ここで問題になるのは需要の不確実性と産出の不確実性に起因する需要と供給のミスマッチである。この問題を解決するための固有技術として果物の鮮度を長く保つための技術、すなわち低温倉庫の活用がある。 このような背景のもとで、本論文は、2種類の低温倉庫を活用するときの柔軟なオペレーションモードのモデルを提案し、主に農家の収入を減らさないことを目的に研究を行っている。本論文の貢献は、1番目に不確実な供給と不確実な需要を同時に考慮したプットオプションのサプライチェーン契約モデルを提案したことである。本モデルでは、バイヤーの初期注文量、オプション購入量、オプション行使量を最適に決めるだけでなく、農家の産出量計画（Planting）、バイヤーに提示するオプション価格、およびオプション行使価格も最適にきめる方法を提案している。2番目の貢献は従来のインシーズン販売に加えて、鮮度をより長く保つことができるCA（Controlled Atmosphere）低温倉庫を活用する場合、オフシーズン販売のためのCA低温倉庫のレンタルスペースを最適に決定する方法を提案したことである。 まず、1番目の貢献においては1つの農家と1つのバイヤーのプットオプション契約問題を対象に、農家の産出量と市場における需要の両方が不確実である条件の下で、卸売価格は市場で形成され、バイヤーは最適な意思決定を行うことを前提とし、農家の産出計画、オプション価格、およびオプション行使価格を最適に決めるモデルを構築し、最適解を導出する方法を提案している。ここで、農家は産出量が不確実であるために、産出量が初期注文量とオプション行使量の合計より少ない場合にはスポットマーケットで果物を購入してバイヤーに納品しなければならない。数値実験では、このような新しい制約を取り入れても、従来の取引モードに比べて提案モデルが優位であり、農家の利益のみならずバイヤーの利益も増やすことができることを示している。 次に、2番目の貢献においてはCA低温倉庫を活用することを前提条件とし、インシーズンの販売が終了する時点でどれぐらいのCA低温倉庫をレンタルすればよいかを決めるモデルを提案している。オフシーズンの販売価格は通常インシーズンより高いが、CA低温倉庫のレンタル費用が発生するので、産出量と需要量の分布、製品価格、およびレンタル費用を考慮してレンタルスペース（貯蔵量）を最適に決める必要がある。本論文では、数値実験を用いて農家が提案モデルを用いて果物を直接販売することにより利益を増やすことができることを示している。 以上を要するに、本論文は果物の産出量と市場における需要量の両方が不確実である条件のもとで、低温倉庫を備えた新鮮な果物のサプライチェーンにおける柔軟なオペレーションモードに関して2つのモデルを提案し、その有効性を示したものであり、学術的貢献は大きい。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第6127号	氏 名	Wang, Yanan (王 亜楠)
主論文題名：			
Performance Efficiency in Multimodal Representation Learning (マルチモーダル表現学習の効率化に関する研究)			
大規模基盤モデルは、マルチモーダル情報（例えば、画像、テキスト、音声など）を融合し、高性能な人工知能システムの実現に大きな可能性を示している。ただし、従来システムは、すべてのモダリティが存在する前提で構築されており、モダリティ不足によるモデルの推論性能が低下する。そのため、実用的なアプリケーションの推論能力が制限される。さらに、マルチモーダルモデルを用いた推論に膨大なパラメータ数が必要になるため非効率である。そのため、パフォーマンス効率的なマルチモーダル表現学習を実現する必要がある。 本論文は、パフォーマンスかつ効率的なマルチモーダル表現学習への改善に向けてさまざまな手法に取り組む。従来のマルチモーダル融合手法を効果的に改善するだけでなく、ユニモーダル入力を与えられた場合でも高性能なマルチモーダル推論を実現する可能とする。本論文は2つの部分で構成されている。第1部では、パフォーマンスが高いマルチモーダル融合の改善に焦点を当てる。我々は、マルチモーダル間のダイナミックな相互作用をマルチモーダル表現として獲得するために、マルチモーダルドメイン適応モジュールを含むアテンションベース融合ネットワーク（MAFN）を提案する。さらに、モーダル間の表現の違いを減らすために、VAE ベースの敵対マルチモーダルドメイン転移手法（VAE-AMDT）を提案する。また、構造化（例えば、グラフデータ）と非構造化（例えば、言語モデルによる分散表現）マルチモーダル知識の双方向融合手法 VQA-GNN を提案する。第2部では、効果的なマルチモーダル転移学習によるマルチモーダルモデルの効率化に焦点を当てる。我々は、暗黙の言語知識を獲得可能とする視覚モーダルモデルを実現するために、言語知識注入可能なディープニューラルネットワーク（LDNN）を提案する。そして、我々はビデオ知識蒸留手法 VideoAdviser を開発し、ステップ蒸留目標損失関数による効果的なマルチモーダル転移学習を行うことで、マルチモーダル基盤モデル（例えば、CLIP）の性能を維持可能とする効率的なユニモーダル基盤モデル（例えば、RoBERTa）を実現する。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6127 号	氏 名	Wang, Yanan (王 亜楠)
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 栗原 聡
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 山田 秀
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 篠沢 佳久
		慶應義塾大学教授	博士（情報学） 杉浦 孔明
学士(工学), 修士(工学), 王亜楠君の学位請求論文は, Performance Efficiency in Multimodal Representation Learning (マルチモーダル表現学習の効率化に関する研究) と題しており, 全 8 章からなる. ChatGPT で注目されることとなった大規模言語モデルは, 言語に加えて画像や音声といったマルチモーダル情報をも取り込むことで, 汎用 AI 実現に向けた大きな進展をしようとしている. 当該研究分野は「マルチモーダル表現学習」と呼ばれ世界的に精力的に研究が進んでいる中, 本研究では, 現状におけるマルチモーダル表現学習の主要な課題である, 「複数モダリティの統合過程の高性能化」と, 「マルチモーダルモデルの推論効率化」について研究を展開している. 第 1 章の序論では, マルチモーダルシステムに関連するさまざまな研究をレビューしたうえで, この論文の焦点を明確にしている. 複数モダリティの統合過程の高性能化の実現に「マルチモーダル間の表現の違いを考慮する必要があること」と, マルチモーダルモデルの推論効率を向上させるには「マルチモーダル基盤モデルからユニモーダルモデルに効果的に知識を遷移させる必要があること」を問題として提起している. 第 2 章では, 第 1 章での問題提起を受け, モーダル間のダイナミックな相互作用をマルチモーダル表現として獲得するために, アテンションベース融合ネットワークを提案している. このモデルの有効性をマルチモーダル感情分析のタスクで立証している. 第 3 章では, 第 2 章で提案されたモデルにマルチモーダルドメイン適応モジュールを加えて, モーダル間の表現の違いを減らすために, VAE ベースの敵対マルチモーダルドメイン転移手法を提案している. この研究の成果が発表された時点では世界トップの性能を出すに至っている. 第 4 章では, 画像と言語の統合の仕方について, シーングラフのような画像からの構造化データとコンセプトネットのようなシンボル表現での言語ネットワークを融合する手法を提案している. これはニューラルネットワークとシンボルの融合を目指す取り組みであり, シンボルとしての知識の利活用に関する取り組みは今後高まることが想定される. 第 5 章では, 言語モデルから画像モデルに知識転移させる手法を提案している. これはマルチモーダル転移学習に関する取り組みであり, 言語モデルの知識を獲得できた画像モデルは, 推論時に画像入力のみで言語モデルの性能を実現することに成功している. 第 6 章では, 第 5 章の提案モデルを更に拡張し, 複数モダリティのモデルからマルチモーダルモデルへの知識蒸留手法を提案している. これは任意のモーダル間での知識転移が可能であることを示唆している. 第 7 章では, 第 6 章の提案手法を更に拡張し, マルチモーダル転移学習のためのビデオ知識蒸留手法を提案している. これによりマルチモーダル基盤モデル (例えば, CLIP) からユニモーダル基盤モデル (例えば, RoBERTa) への効果的なマルチモーダル知識遷移を実現することによって, マルチモーダル基盤モデルの性能を維持可能とする効率的なユニモーダル基盤モデルを実現している. 第 8 章は, 総括的結論である. 第 1 章の問題提起に対して有効なモデル, 方法を理論的な立場から示すとともに, 様々なマルチモーダルタスクにおいて有効性があることを論じている. 提案するニューラルネットワークとシンボルの融合手法と, マルチモーダル基盤モデルにおける転移学習手法は, マルチモーダルモデルの性能改善および効率化に対する貢献が大きく, AI システムの実世界応用の加速にも起用できる. よって, 本論文の著者は博士 (工学) の学位を受ける資格があるものと認める.			

内容の要旨

報告番号	甲 第6128号	氏 名	Jing, Weidong (景 偉東)
主論文題名： Detection, Contamination Assessment, and Human Exposure Protection Measure of Aerosol Particle-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Collected by the Cyclone Sampler (サイクロンサンプラーを用いて採取したエアロゾル粒子に含まれる多環芳香族炭化水素類の測定と汚染評価および健康影響防止対策)			
本論文は、大気中の浮遊粒子状物質(エアロゾル粒子)の毒性に対して無視できない寄与を持つと考えられる多環芳香族炭化水素類(PAHs)について、毒性評価の観点から新規測定法を開発し、環境中濃度を把握し、健康影響防止対策を提示することを目的とした。第1章では、粒子状物質の定義と環境影響について概観した後、粒子に結合した PAHs について、その物理化学的特性、発生源と放出特性、環境中濃度および健康毒性等の一般的な情報を示した。そして、従来のフィルター粒子捕集方法と PAHs 抽出操作の問題点を指摘し、サイクロンを用いたサンプリングに基づく本研究の優位性を提示した。 第2章では、粉体状の環境標準物質(SRM1944)中の PAHs 測定のための QuEChERS (Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged, and Safe) 抽出法の最適化を実施し、実環境中におけるサイクロン捕集エアロゾル粒子中 PAHs 分析にも有効であることを示した。 第3章では、本研究により開発された手法を用いて、2018年から2023年までの長期間にわたり横浜でサイクロンにより採取された30個のエアロゾル粒子試料中の PAHs 濃度の変動を調査した。その結果、PAHs 濃度の総和の年平均値は日本における COVID-19 の発生を境に減少傾向を示した。この結果を基に PAHs による健康曝露リスクを計算し、小児と成人の生涯発がんリスクの変化を推定した。 第4章では、PAHs による健康影響防止対策の一環として、抗酸化物質による PAHs の毒性低減効果を調査した。その結果、アスタキサンチンの存在下において、PAHs によるヒト肺上皮腺がん由来 A549 細胞の障害性が低減されることを見出した。この原因として、PAHs により生成される活性酸素種がアスタキサンチンの抗酸化作用により除去される可能性を実験的に示した。 第5章では、エアロゾル粒子において PAHs と共存することによって相加的な毒性の発現が懸念される数種類の金属について、サイクロン捕集エアロゾル粒子中の濃度および化学状態の分析を行った。その結果、各金属の濃度および化学状態と、それから推定される粒子の発生源は、試料採取地域の産業構造や地理的位置に依存することが示された。 第6章では、本論文で得られた知見に基づき、まとめを行った。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6128 号	氏 名	Jing, Weidong (景 偉東)
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（農学） 奥田 知明
	副査	慶應義塾大学教授	Dr. sc. nat. チッテリオ, ダニエル
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 藤岡 沙都子
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 伴野 太祐
学士(Engineering)、修士(Engineering)景偉東君提出の学位請求論文は「Detection, Contamination Assessment, and Human Exposure Protection Measure of Aerosol Particle-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Collected by the Cyclone Sampler（サイクロンサンプラーを用いて採取したエアロゾル粒子に含まれる多環芳香族炭化水素類の測定と汚染評価および健康影響防止対策）」と題し、6 章から構成されている。 本論文は、大気中の浮遊粒子状物質（エアロゾル粒子）の毒性に対して無視できない寄与を持つと考えられる多環芳香族炭化水素類(PAHs)について、毒性評価の観点から新規測定法を開発し、環境中濃度を把握し、健康影響防止対策を提示することを目的としている。 第1章では、粒子状物質の定義と環境影響について概観した後、粒子に結合した PAHs について、その物理化学的特性、発生源と放出特性、環境中濃度および健康毒性等の一般的な情報を示している。そして、従来のフィルター粒子捕集方法と PAHs 抽出操作の問題点を指摘し、サイクロンを用いたサンプリングに基づく本研究の優位性を提示している。 第2章では、粉体状の環境標準物質(SRM1944)中の PAHs 測定のための QuEChERS (Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged, and Safe) 抽出法の最適化を実施し、実環境中におけるサイクロン捕集エアロゾル粒子中 PAHs 分析にも有効であることを示している。 第3章では、本研究により開発された手法を用いて、2018 年から 2023 年までの長期間にわたり横浜でサイクロンにより採取された 30 個のエアロゾル粒子試料中の PAHs 濃度の変動を調査した結果を示している。その結果、PAHs 濃度の総和の年平均値は日本における COVID-19 の発生を境に減少傾向を示していた。この結果を基に PAHs による健康曝露リスクを計算し、小児と成人の生涯発がんリスクの変化を推定している。 第4章では、PAHs による健康影響防止対策の一環として、抗酸化物質による PAHs の毒性低減効果を調査し、アスタキサンチンの存在下において、PAHs によるヒト肺上皮腺がん由来 A549 細胞の障害性が低減されることを見出している。この原因として、PAHs により生成される活性酸素種がアスタキサンチンの抗酸化作用により除去される可能性を実験的に示している。 第5章では、エアロゾル粒子において PAHs と共存することによって相加的な毒性の発現が懸念される数種類の金属について、サイクロン捕集エアロゾル粒子中の濃度および化学状態の分析を行った結果を示している。各金属の濃度および化学状態と、それから推定される粒子の発生源は、試料採取地域の産業構造や地理的位置に依存することを示している。 第6章では、本論文で得られた知見をまとめ、将来の展望を述べている。 以上要するに、本研究は、大気中の粒子中に含まれる成分として毒性が懸念される PAHs について、その新規な分析法を開発し、環境中の大気粒子試料に応用し、その対策方法について示唆しているものであり、環境化学の分野において工学上寄与するところが少なくない。 よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第6191号	氏 名	稲葉 和樹
主論文題名：			
ホウ素媒介アグリコン転移反応の開発とテルピオシド B の全合成 およびアラビノガラクトタン合成への応用			
天然には、恒常的な生命現象や様々な疾病に関与する生物活性糖質が数多く存在しており、それらの詳細な機能解明や構造活性相関の解明、さらには新たな医薬品開発を目的とした研究が、生物学や医学を含む多くの分野で注目を集めている。そのため、糖と糖または糖と非糖部分とを連結する重要な素反応の 1 つであるグリコシル化反応の開発が、国内外を問わず精力的に行われてきた。しかし、1,2-<i>cis</i>-立体選択的グリコシル化反応の開発は、依然として困難であり、有機合成化学分野において克服すべき喫緊の課題である。このような背景の中、最近、当研究室では、有機ホウ素触媒を用いて、反応する水酸基の位置と 1,2-<i>cis</i>-立体選択性を同時に制御するホウ素媒介アグリコン転移 (BMAD) 反応を開発している。そこで本論文では、本 BMAD 反応の適応範囲の拡張と天然糖脂質テルピオシド B の全合成およびアラビノガラクトタン合成への応用について記述した。 序論では、従来の 1,2-<i>cis</i>-グリコシル化反応とその問題点、および当研究室で開発した BMAD 反応について概説した。さらに、本研究の目的および位置付けについて記述した。 本論第 1 章では、BMAD 反応を用いた天然スフィンゴ糖脂質テルピオシド B の全合成について記述した。テルピオシド B は、生物活性としてリポ多糖 (LPS) 刺激により誘発される一酸化窒素 (NO) の産生抑制活性を有する糖脂質であり、また、構造的特徴として構築困難な 1,2-<i>cis</i> 型の Galα(1,4)Gal 構造を有している。そこで、ボロン酸触媒、1,2-アンヒドロガラクトース、および無保護の 1,6-アンヒドロガラクトースを用いた BMAD 反応を鍵反応としたテルピオシド B の全合成を検討した。すなわち、鍵反応では、望む Galα(1,4)Gal 構造が高い位置および完全な 1,2-<i>cis</i>-α-立体選択性で得られることを見出し、さらに、計 55 工程にて、テルピオシド B の初の全合成を達成した。以上の結果より、本 BMAD 法が天然物合成に適応可能な有用な手法であることを明らかにした。 本論第 2 章では、BMAD 法を用いた位置選択的かつ立体特異的β-アラビノフラノシル化反応の開発とアラビノガラクトタン合成への応用について記述した。五員環糖である 1,2-<i>cis</i>-フラノシドの立体選択的構築は、六員環糖の 1,2-<i>cis</i>-ピラノシドと比較して、立体的および電子的に困難であることから、新たな方法論の開発が急務である。そこで本研究では、1,2-<i>cis</i>-フラノシドの中でも、天然生物活性糖質に散見されるβ-アラビノフラノシドに着目し、BMAD 法を用いた新規β-アラビノフラノシル化反応の開発と応用を目的とした。すなわち、ボロン酸触媒存在下、1,2-アンヒドロ-D/L-アラビノフラノースと種々のジオールとのグリコシル化反応を検討した。その結果、対応するアラビノフラノシドが高い位置選択性および完全なβ立体選択性で得られることを見出した。次に、DFT 計算および NBO 解析を用いた反応機構解析により、本反応が協奏的 S_Ni 型機構で進行することが支持された。さらに、DFT 計算の結果から、BMAD 反応の位置選択性を予測する予測モデルの構築を達成した。最後に、本反応の反応条件を再精査することで、本反応の位置選択性を逆転できる反応系を初めて見出し、これを用いたアラビノガラクトタンの部分糖鎖の合成を達成した。以上の結果より、本 BMAD 法が生物活性糖質合成に適応可能な有用な手法であることを明らかにした。 結論では、本研究を総括し、今後の展望について記述した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6191 号	氏 名	稲葉 和樹
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士 戸嶋 一敦
	副査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 藤本 ゆかり
		慶應義塾大学教授	博士（理学） 末永 聖武
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 高尾 賢一
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 高橋 大介
学士（工学）、修士（工学）稲葉和樹君の学位請求論文は、「ホウ素媒介アグリコン転移反応の開発とテルピオシド B の全合成およびアラビノガラクトサン合成への応用」と題し、序論、本論第 1、第 2 章、および結論で構成されている。 天然には、恒常的な生命現象や様々な疾病に関与する生物活性糖質が数多く存在しており、それらの詳細な機能および構造活性相関の解明、さらには新たな医薬品開発を目的とした研究が、生物学や医学を含む多くの分野で注目されている。そのため、糖と糖、または糖と非糖部分とを連結する重要な素反応の 1 つであるグリコシル化反応の開発が、国内外を問わず精力的に行われてきた。しかし、1,2-<i>cis</i>-立体選択的グリコシル化反応の開発は、依然として困難であり、糖質合成化学分野において克服すべき喫緊の課題である。このような背景の中、近年、当研究室において、有機ホウ素触媒を用いて、反応する水酸基の位置と 1,2-<i>cis</i>-立体選択性を同時に制御するホウ素媒介アグリコン転移(BMAD)反応が開発された。本論文では、本 BMAD 反応の適用範囲の拡張と天然糖脂質テルピオシド B の全合成およびアラビノガラクトサン合成への応用について記述している。 序論では、従来の 1,2-<i>cis</i>-グリコシル化反応とその問題点、および当研究室で開発した BMAD 反応について概説している。さらに、本研究の目的および位置付けについて記述している。 本論第 1 章では、BMAD 反応を用いた天然スフィンゴ糖脂質テルピオシド B の全合成について記述している。テルピオシド B は、生物活性としてリポ多糖(LPS)刺激により誘発される一酸化窒素(NO)の産生抑制活性を有する糖脂質であり、また、構造的特徴として構築困難な 1,2-<i>cis</i> 型の Galα(1,4)Gal 構造を有している。そこで、ボロン酸触媒、1,2-アンヒドロガラクトース、および無保護の 1,6-アンヒドロガラクトースを用いた BMAD 反応を鍵反応としたテルピオシド B の全合成を検討した。その結果、構築困難であった望む Galα(1,4)Gal 構造が、高い位置および完全な 1,2-<i>cis</i>-α-立体選択性で得られることを見出し、テルピオシド B の初の全合成を達成した。 本論第 2 章では、BMAD 法を用いた位置選択的かつ立体特異的β-アラビノフラノシル化反応の開発とアラビノガラクトサン合成への応用について記述している。五員環糖である 1,2-<i>cis</i>-フラノシドの立体選択的構築は、六員環糖の 1,2-<i>cis</i>-ピラノシドと比較して、立体的および電子的に困難であることから、新たな合成方法論の開発が急務であった。本研究では、1,2-<i>cis</i>-フラノシドの中でも、天然生物活性糖質に散見されるβ-アラビノフラノシドに着目し、BMAD 法を用いた新規β-アラビノフラノシル化反応の開発と応用を目的とした。すなわち、ボロン酸触媒存在下、1,2-アンヒドロ-D/L-アラビノフラノースと種々のジオールとのグリコシル化反応を検討した。その結果、対応するアラビノフラノシドが高い位置選択性および完全なβ立体選択性で得られることを見出した。次に、DFT 計算および NBO 解析を用いた反応機構解析により、本反応が協奏的 S_Ni 型機構で進行することが支持された。さらに、DFT 計算の結果から、BMAD 反応の位置選択性を予測する予測モデルの構築に成功した。最後に、本反応の反応条件を再精査することで、本反応の位置選択性が逆転する反応条件を初めて見出し、これを用いたアラビノガラクトサンの部分糖鎖の合成を達成した。 結論では、本研究を総括し、今後の展望について記述している。 以上、本論文の成果は、糖質合成の根幹をなすグリコシル化反応において、新しい効率的な反応を開発し、その広い適用範囲を複雑な有用糖質の合成において実証しており、学術的及び工学的にも意義深い。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6192 号	氏 名	手塚 宙之
主論文題名：			
機械学習の適用による量子アルゴリズムの実装性向上に関する研究			
本論文は、全7章により構成される。 第1章では、本論文の研究背景と問題提起、構成について記す。本論文では、量子計算を実行する場合に一般的に直面する課題に着目し、それらの解法の一つを記す。具体的には、データ入力、データ処理アルゴリズムの実装、データ読出し、機械学習 (machine learning; ML) における学習の観点について議論する。 第2章では、量子計算の基礎事項について説明する。 第3章では、効率的なデータロード手法である「Approximate amplitude encoding (AAE)」について説明する。量子計算における最も重要な問題の一つが、いかに効率的にデータを量子状態に埋め込むかである。既存手法では問題サイズのスケールリングに対し、必要な計算ステップが指数関数的に増加してしまう問題を抱えていた。本アルゴリズムでは、生成される状態に有限の誤差を許容できれば、MLの手法を用いることで計算ステップを既存手法に比べて指数関数的に抑えることが可能になる。 第4章では、「ブラックボックスの無い Grover's algorithm (GA)」について説明する。GAは量子振幅増幅アルゴリズムとも呼ばれ、量子計算において不可欠なアルゴリズムである。重要な応用として探索タスクが挙げられる。重ね合わせ状態の中からクエリに合致する量子状態のみを抽出し、振幅の増幅を行う。しかし、既存手法ではアルゴリズムの中核にブラックボックス回路を含んでおり、汎用かつ実用的な実装ができなかった。本アルゴリズムでは、第3章で説明した AAE を応用することで、このブラックボックスを不要とした。具体的な実装例として、量子画像探索を行い性能評価を行った。 第5章では、「NTKを利用した量子-古典ハイブリッドニューラルネットワーク (qcNN)」について説明する。NTKは、元々は古典MLの領域で発見され、ノード数が無限大の極限で時不変となる性質をもつ。すなわち、学習過程の解析的評価が可能になる。本章では、これが成立するような qcNN を提案し、理論的な解析により量子優位性を示しうる条件を議論する。さらに数値実験により優位性を示す具体的な実装例を示す。本モデルは、学習対象を意図的に古典NN部に限定しており、洗練された古典MLの手法が適用可能、かつ量子MLで深刻な問題である勾配消失の心配が無い。一方で、出力関数が projected quantum kernel (PQK)の非線形変換に対応しており、量子MLの利点と実装性を両立している。 第6章では、「最適輸送を用いた量子生成モデル」について説明する。生成モデルの特徴は、所望のクラスに属する学習データセットに含まれない状態を生成できる点である。古典MLでは画像生成や異常検知で高い性能を発揮している。本章では量子状態を扱う生成モデルを提案する。しかし、既存手法の適用範囲は混合状態の学習に限られ、量子アンサンブルの学習が不可能だった。そこで、個々の純粋状態を保ったまま扱うための損失関数として、量子アンサンブルに対する最適輸送距離を新たに導入し、適切に学習可能なモデルを提案する。本章では、異常検知タスクをモチーフとして、数値実験により提案アルゴリズムの有効性を確認した。将来的には、量子状態の内挿・外挿により所望の状態生成の計算コスト低減に貢献できる。 第7章では、本論文のまとめと展望を記す。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6192 号	氏 名	手塚 宙之
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（情報理工学） 山本 直樹
	副査	慶應義塾大学准教授	博士（工学） 渡辺 宙志
		慶應義塾大学准教授	博士（理学） 田中 宗
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 武岡 正裕
学士(工学)、修士(工学) 手塚宙之君の学位請求論文は「機械学習の適用による量子アルゴリズムの実装性向上に関する研究」と題し、全7章より構成される。 近年、世界中で、量子計算機のデバイス開発が急速に進んでいる。それらは現状ではノイズ耐性をもたない中規模デバイスであり、従って、限られた計算資源(高純度の量子ビットや高精度で使える量子演算)を有効活用するための様々な提案がなされている。そして、それに伴い、実機実装のハードルが低い量子アルゴリズムが数多く提案されている。本論文で記載されている成果は、これら両面について大きな貢献をするものである。 第1章では、本論文の研究背景と問題および結果のまとめが記載されている。 第2章では、量子計算の基礎事項についての説明が与えられている。 第3章では、データを量子状態にロードするアルゴリズムに関する説明が与えられている。既存手法では、問題サイズに対し、データロードに必要な計算ステップ数(量子回路の長さ)が指数関数的に増加してしまう問題を抱えていた。本アルゴリズムは、固定長のパラメトライズ量子回路を用意し、生成された量子状態を目標状態に近づける最適化を行うことで、有限の計算ステップで近似データロードを可能にするものである。 第4章では、グローバールアルゴリズム(GA)の実装性向上および実応用に関する成果の説明が与えられている。GAは様々な量子計算アルゴリズムのサブルーチンとして用いられる基幹アルゴリズムであり、とくに重要な応用として探索タスクがある。これは量子重ね合わせ状態の中から目標に合致する状態のみを抽出し、振幅の増幅を行うことで、探索に要する問い合わせ回数を平方根で減らすものである。しかし、これまでの探索タスク GA においては、目標と一致する状態を抽出するプロセスはオラクルとして与えられており、汎用かつ効率的な実装法は不明であった。本成果は、第3章で説明した近似データロードアルゴリズムに基づき、このオラクル部分の効率的・明示的な実装を実現するものである。具体的な実装例として、画像探索タスクに適用され、性能評価が行われている。 第5章では、Neural Tangent Kernel (NTK) 理論に基づく量子-古典ハイブリッドニューラルネットワーク(qcNN)に関する成果の説明が与えられている。従来の機械学習の設定において、NTKはノード数が無限大の極限で時不変となることが証明されている。これにより、学習過程の解析的評価が可能になるという恩恵がある。本章では、この状況が成立する qcNN を提案し、理論解析によりその学習性能を議論している。このモデルは学習対象を意図的に古典ニューラルネット部に限定しており、洗練された古典 ML の手法が適用可能、かつ勾配消失の心配が無いという利点がある。さらに、数値実験により qcNN が通常の機械学習器に対して優位性がある状況を明らかにしている。 第6章では、最適輸送距離に基づく量子生成モデル構築法に関する成果が説明されている。生成モデルとは、訓練データを出力する確率分布を学習し、それを用いて訓練データセットに含まれない新規データを生成するという用途に用いることができる。本章では熱平衡状態などの量子状態からなるアンサンブルを目標データセットとする生成モデルの構築法が提案されている。既存手法の適用範囲はいわゆる混合状態の学習に限られ、量子アンサンブルの学習が不可能だった。そこで、個々の純粋状態を評価できる損失関数として量子アンサンブルに対する最適輸送距離を新たに導入し、その性質の解析がなされている。そして、量子状態の異常検知タスクをモチーフとする数値実験を実施し、提案アルゴリズムの有効性を確認している。 第7章では、本論文のまとめと展望が記載されている。 本論文の成果は、基礎・応用の両面において量子計算分野のさらなる発展に資することが期待される。よって、本論文の著者は博士(工学)の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第6193号	氏 名	矢野 碩志
主論文題名：			
量子機械学習におけるデータエンコーディングとモデル選択			
量子コンピュータは、従来の古典コンピュータでは現実的な時間で計算困難ないくつかの問題を効率的に解くことが可能であると示されている。量子計算が得意な分野として、素因数分解やデータベース探索などが有名である。加えて、より汎用的な応用を目指して、機械学習アルゴリズムの性能向上も期待されている。 本論文では、量子コンピュータ上で動作する機械学習アルゴリズムを量子機械学習アルゴリズムと呼ぶ。量子機械学習アルゴリズムが取り扱うデータは、古典コンピュータが取り扱う画像などの古典的データか、ハミルトニアン基底状態などの量子データのどちらであるかは問わない。このような設定のもとで、どのように量子機械学習アルゴリズムを設計すべきか、さらには果たして量子コンピュータを使うことで古典コンピュータ上で動作するアルゴリズムより優位な点があるのか、ということは量子機械学習における重要な研究課題である。後者については、学習理論などを通して優位性のある学習タスクの解明が進んでいるが、未だ優位性が証明されている事例は数少ない。前者についても、具体的な量子回路の構成に至るまで検討が進んでいる一方数多くの課題が残る。本論文では、この量子機械学習アルゴリズム設計における課題を解決すべく、二つの課題に着目した。 一つ目の課題はデータエンコーディングである。古典的データを扱う量子機械学習アルゴリズムでは、古典的データを量子コンピュータにどのように入力するかという課題が残っており、体系的な枠組みが未だ存在しない。バイナリ変数やカテゴリ変数は統計的な取り扱いが自明ではないが機械学習の実用場面では重要な役割を果たすことから、我々は古典的データの中でも離散的なデータに着目した。そして、離散的データの量子コンピュータへの入力方法として、量子通信理論で優位性が証明されている量子ランダムアクセス符号 (QRAC) という古典ビット列の符号化手法を用いることを提案した。QRAC は古典ビット列をより少ない数の量子ビットに符号化できるため、問題の難しさに応じてアルゴリズムが必要とする量子ビット数を削減することができる。論文中では数値実験を通して、QRAC を用いた量子機械学習アルゴリズムの性能を網羅的に調べている。 二つ目の課題はモデル選択である。古典・量子問わず機械学習アルゴリズムの重要な設計指針として、手元にあるデータだけに限らず未知のデータにも精度良く予測を行うために、いくらか考えられる候補の中から最も良いモデルを選択する必要がある。このような汎化性能を考慮したアルゴリズムの設計は、古典では古くから調べられているものの、量子機械学習においては未だ発展途上である。この観点から我々は、量子状態推定におけるモデル選択指標として、量子情報量規準という量を提案した。量子状態推定は量子機械学習にとって基礎的なタスクであり、未知の量子状態に対して測定を行いその量子状態を表す密度演算子の推定を目的とする。量子情報量規準は、推定された量子状態を量子相対エントロピーに基づいて評価することが可能な初めての量である。論文中では数値実験を通して、従来のモデル選択指標との比較を行っている。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6193 号	氏 名	矢野 碩志
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（情報理工学） 山本 直樹
	副査	慶應義塾大学准教授	博士（理学） 田中 宗
		慶應義塾大学教授	博士（情報理工学） 小林 景
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 武岡 正裕
学士(工学)、修士(工学) 矢野 碩志君の学位請求論文は「量子機械学習におけるデータエンコーディングとモデル選択」と題し、全5章より構成される。 量子コンピュータは、従来型（非量子型）コンピュータでは現実的な時間での計算が困難である様々な問題を、効率的に解くことが可能である。とくに、機械学習アルゴリズムを量子コンピュータで実行し性能向上を狙う「量子機械学習」に関する研究が盛んに行われている。一方で、現状実現されている量子コンピュータデバイスはノイズ耐性をもたないため、限られた計算資源を有効活用するための様々な方法論が提案されている。本論文で記載されている成果は、この研究領域において大きな貢献をするものである。 第1章では、本論文の研究背景と問題および結果のまとめが記載されている。 第2章では、量子計算の基礎事項についての説明が与えられている。 第3章では、データエンコーディングのための新規手法の提案と、それを利用したデータ分類器の構築法が記載されている。量子機械学習アルゴリズムでは、画像などのデータをいかに効率的に量子コンピュータ（量子状態）にエンコードするか、が大きな問題となる。本研究では、バイナリ変数やカテゴリ変数などの離散データに着目し、量子通信理論で優位性が証明されている「量子ランダムアクセス符号(QRAC)」というビット列の符号化手法を用いる新規データエンコーディング手法を提案している。QRACは、量子ビットが0と1の重ね合わせ状態を実現できるという特性を利用し、古典ビット列をより少ない数の量子ビットに符号化する手法である。これにより、データを表現するのに必要なビット数を削減し、その結果、少ない演算数で所望タスクを実行するアルゴリズムを構築することが可能になる。本研究では、クラス分類を行う量子機械学習器のエンコード部分にQRACを用いる設定を考察している。具体的には、QRACによって離散データを量子機械学習器（クラス分類器）にエンコードし、次いで学習器を訓練・評価する解析を行なっている。とくに、超伝導型量子コンピュータ実機を用いた検証も実施しており、心臓疾患データの分類という実応用タスクにおいて手法の有効性を確認している。 第4章では、量子コンピュータのモデル選択に関する問題が議論されている。古典・量子問わず、機械学習器は、手元にある訓練用データを精度良く再現することに加え、未知データの生成すなわち予測を高精度に行うことが求められる。この目的を満たすために、機械学習器として良い数理モデルを選ぶ必要がある。モデル選択に関する研究は、従来型（非量子）コンピューティングの枠組みでは、情報量規準という概念の導入によりたいへん深く調べられているが、その量子版はこれまで皆無であった。この状況において、本研究では、量子状態推定問題における量子情報量規準をはじめて導出し、その性能解析を行なっている。量子状態推定アルゴリズムは量子機械学習の基本的なサブルーチンであり、データをもとに、未知の量子状態の推定を効率よく行うためのアルゴリズムである。最も基本的な従来型情報量規準はいわゆるカルバックライブラー分離度に基づいて導出されるが、提案している量子情報量規準は、量子相対エントロピーに基づいて導出される。とくに本研究では、いくつかの仮定のもと複数の量子情報量規準を導出しており、数値実験を通して、それらの比較を行なっている。そして、導出した量子情報量規準を用いることで、（訓練データの説明と高度な予測性能を両立するという意味で）適切な数理モデルの選択が可能であることを実証している。 第5章では、本論文のまとめと展望が記載されている。 以上の通り、本論文の成果は、基礎・応用の両面において量子コンピューティング分野のさらなる発展に資することが期待されるものである。よって、本論文の著者は博士(工学)の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第6194号	氏 名	三家 雅弘
主論文題名： Toughness, forbidden subgraphs and hamiltonicity of graphs (グラフのタフネスと禁止部分グラフおよびハミルトン性)			
t を実数とする. グラフ G が t-タフであるとは, $G - S$ が非連結となるような頂点部分集合 S に対して, S が少なくとも $G - S$ の連結成分数の t 倍となることをいう. グラフ G が t-タフとなるような最大の数 t を, G のタフネスという. グラフのすべての頂点を通る閉路をハミルトン閉路という. 1973 年に Chvátal は, タフネスがある定数以上となるグラフはハミルトン閉路を持つことを予想した. この予想は現在も未解決となっている. 本論文では, 主に禁止部分グラフ条件の観点から, グラフのタフネスとハミルトン閉路に関する既存の定理の改良, およびさらなる拡張可能性に関する結果を紹介する. はじめに, $2K_2$-free グラフについて考察する. $2K_2$-free グラフとは, $2K_2$ を誘導部分グラフとして含まないグラフのことである. Chvátal 予想に関連する定理として, 任意の $3/2$-タフスプリットグラフはハミルトン閉路を持つことが知られているが, $2K_2$-free グラフのクラスはスプリットグラフのクラスの拡張となっている. また, $2K_2$-free グラフにおける Chvátal 予想について, いくつかの定理が示されてきた. 本論文では, 任意の 2-タフ $2K_2$-free グラフはハミルトン閉路を持つことを証明し, 既存の定理におけるタフネス条件を改善する. 禁止部分グラフ $2K_2$ の更なる拡張として, Shan は $(P_2 \cup P_3)$-free グラフのクラスにおける Chvátal 予想について結果を得た. 一方で, スプリットグラフに関する結果より, $(P_2 \cup P_3)$-free グラフのハミルトン閉路の存在を保証するタフネス条件は, $3/2$ より減らすことはできない. そこで, $3/2$-タフ $(P_a \cup P_b)$-free グラフに着目し, ハミルトン閉路の代わりに 2-因子の存在性を考察する. ここで, グラフの 2-因子とは, 2-正則な全域部分グラフのことである. その結果として, 本論文では, 任意の $3/2$-タフ $(P_4 \cup P_{10})$-free グラフは 2-因子を持つことを証明し, また $P_4 \cup P_{10}$ は禁止部分グラフとしてある種の最善性を満たしていることを示す. さらに, $k \geq 3$ に対して, k-因子の存在性とタフネスおよび禁止部分グラフ条件について考察する. Chvátal と Erdős による古典的な定理として, 連結度が独立数以上となるグラフはハミルトン閉路を持つことが知られている. 本論文では, 独立数条件を禁止部分グラフ $K_2 \cup kK_1$ に置き換え, $(K_2 \cup kK_1)$-free グラフのハミルトン性について考える. その結果として, 任意の 1-タフ k-連結 $(K_2 \cup kK_1)$-free グラフは, 最小次数が $3(k-1)/2$ 以上ならば, ペテルセングラフを除いてハミルトン閉路を持つことを証明する. この結果は, $(K_2 \cup kK_1)$-free グラフに関する既存の定理を改善しており, $k \leq 3$ のとき, 連結度および最小次数条件は最善である. また, $k \geq 4$ の場合における連結度と最小次数条件の改良可能性を考察する.			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6194 号	氏 名	三家 雅弘
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	理学博士 太田 克弘
	副査	慶應義塾大学教授	理学博士 田村 明久
		慶應義塾大学准教授	博士（理学） 小田 芳彰
		慶應義塾大学准教授	博士（情報理工学） 垣村 尚徳
三家雅弘君の学位請求論文は、「Toughness, forbidden subgraphs and hamiltonicity of graphs」（グラフのタフネスと禁止部分グラフおよびハミルトン性）と題し、全 7 章よりなる。グラフにおいて、すべての頂点をちょうど一度ずつ通る閉路はハミルトン閉路と呼ばれ、理論・応用の両面から盛んに研究されている。その存在判定は NP 完全で、理論的にも存在のための意味のある必要十分条件は知られていない。グラフのハミルトン性と密接に関連する不変量として、Chvátal(1973)によって導入されたタフネスの概念がある。グラフ G から頂点集合 S を取り除いてできるグラフ $G-S$ の連結成分数を $\omega(G-S)$ で表すとき、すべての切断頂点集合 S にわたり $S /\omega(G-S)$ が t 以上となるとき、グラフ G は t-タフであるという。ハミルトン閉路を含むグラフが 1-タフであることは容易にわかるが、Chvátal は逆に、ある定数 t_0 が存在し、任意の t_0-タフグラフはハミルトン閉路を含むだろうと予想した。この予想はこの分野における最も大きな未解決問題の一つである。本論文では、この Chvátal 予想の解決に向けた研究の方向として、いくつかのグラフの族、特に、禁止部分グラフによって制限されたグラフの族で予想を肯定的に解決することを行っている。以下、与えられたグラフ H に対して、H と同型な誘導部分グラフを含まないグラフを H-フリーグラフと呼ぶことにする。 序論である第 1 章と第 2 章では、背景となる既存研究を総括し、以降の議論で必要となる基礎的な概念の定義を与えその性質等に触れている。 第 3 章では $2K_2$-フリーグラフを扱い、2-タフであればハミルトン閉路を含むことを示している。このグラフの族については、Broersma ら(2014)が 25-タフで、Shan(2019)が 3-タフという仮定の下で証明していて、本結果はこれらをさらに改良したものとなっている。 第 4 章と第 5 章では、ハミルトン閉路を 2-因子に緩和し、さらにそれを一般化した k-因子の存在について、禁止部分グラフとの関連について議論し結果を得ている。k-因子とは、すべての頂点の次数が k であるような全域部分グラフのことで、特に 2-因子は、いくつかの閉路でグラフのすべての頂点をちょうど一度ずつ覆うものである。この 2-因子については、$3/2$-タフであるような $(P_4 \cup P_{10})$-フリーグラフに存在することを示しているが、この結果はタフネス条件においても、禁止部分グラフ条件においても、最善のものとなっている。 第 6 章では、$(K_2 \cup kK_1)$-フリーグラフを扱っている。この禁止部分グラフは、互いに非隣接な頂点集合の最大サイズである独立数と密接に関連し、k-連結で独立数が k 以下であればハミルトン閉路を持つという Chvátal-Erdős の定理を、$(K_2 \cup kK_1)$-フリーグラフに広げて議論していることに相当する。この章では、k-連結な $(K_2 \cup kK_1)$-フリーグラフに 1-タフを仮定すると、最小次数を $3(k-1)/2$ 以上と仮定するだけでハミルトン閉路が存在することが証明されている。 第 7 章では、ハミルトン閉路の存在を証明する際に道具となる D_λ 閉路の存在について、タフネスとの関連について議論している。 以上、本研究は、グラフのハミルトン閉路に関する Chvátal 予想にアプローチし、禁止部分グラフによって制限されたいくつかのグラフの族に対して既存の結果を拡張する定理を証明している。これらは、グラフのハミルトン性に関する重要な理論的成果であり、グラフ理論に貢献するところが少なくない。国外研究者との共同研究成果もあり、これは著者が自立して研究活動を行うために必要な高度な研究能力および学識を有することを示したものである。よって、本論文の著者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第6195号	氏 名	金村 佳範
主論文題名： Existence of Rational Points and Integer Points on Certain Algebraic Varieties (ある代数多様体上の有理点や整数点の存在について)			
数論幾何において、与えられた代数多様体上の有理点の有無を決定する問題は主要な問題の1つである。本論文では、この問題に関連して、特定の代数多様体の族において有理点を持つものの割合を扱う。 第1部では対角的超曲面族を考える。Bright--Browning--Loughran は、次数及び次元を固定した対角的超曲面族において、局所点を持つものの割合が $\mathbb{Q}_{\mathbf{v}}$-有理点を持つ割合の素点 $\mathbf{v}$ に渡る積に一致することを示した。本研究では、各次数及び次元に対して対角的超曲面族で $\mathbb{Q}_{\mathbf{v}}$-有理点を持つ割合を計算する方針を与えた。また、この結果の系として、一定の仮定の下で2次及び3次の場合に各次元に対して有理点を持つ割合の近似値を与えた。この結果は、Baker や Bright--Browning--Loughran などの先行研究を含む。第1部の内容は平川義之輔氏との共同研究に基づいており、申請者は2次及び3次の対角的超曲面族における局所点をもつものの割合の計算などの主要な部分に貢献した。 第2部では2元4次形式より定まる種数1の曲線族を考える。Bhargava や Bhargava--Ho は、楕円曲線族の n-Selmer 群の平均位数を求めた系として、2元4次形式より定まる種数1の局所点を持つ曲線族において有理点を持つ割合を評価した。本研究では、それらの先行研究で扱っている曲線族より更に小さな部分族において、局所点を持つものの中で有理点を持つ割合を評価した。この結果の一部は、3元3次形式より定まる種数1の曲線族の部分族において有理点をもつものの割合が正であるという Browning の結果の2元4次形式類似とみなせる。第2部の内容は石塚裕大氏との共同研究に基づいており、申請者は主定理群の定式化及びその証明に必要な局所点をもつ曲線の数え上げなど主要な部分に貢献した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6195 号	氏 名	金村 佳範
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（数理科学） 坂内 健一
	副査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 栗原 将人
		慶應義塾大学教授	博士（理学） 田中 孝明
		慶應義塾大学准教授	博士（数理科学） 服部 広大
学士(理学)、修士(理学)金村佳範君提出の学位請求論文は、「Existence of Rational Points and Integer Points on Certain Algebraic Varieties (ある代数多様体上の有理点や整数点の存在について)」と題し、本文全5部19章（その内、付録1部1章）からなる。 代数方程式の整数解や有理数解の存在を調べることは、古代ギリシア時代より重要な問題として研究されてきた。この問題は一般的には非常に難しいことが知られており、整数係数の多変数代数方程式の整数解については、一般的に決定するアルゴリズムは、原理的に存在しないことが Hilbert の第10問題の否定という形で証明されている。多変数代数方程式の有理数解は、現代では代数多様体と呼ばれる幾何学的対象の有理点として解釈される。代数多様体の無限族が与えられたとき、その中で有理点を持つものの割合などの統計的性質は、近年の Poonen と Voloch による研究などにより、次第に解明されつつある。本論文の目的は、次数及び次元を固定した対角的超曲面族やある種の2元4次形式により定まる代数曲線族など、重要な代数多様体の無限族に対して、その族の有理点の統計的性質を具体的に決定することにある。 本論文の第0部は序論であり、論文の概要が述べられている。第1章と第2章で Hilbert の第10問題、局所大域原理、無限族における有理点の割合の定式化、およびこの割合にまつわる Poonen と Voloch の予想が紹介されている。第3章と第4章では、対角的超曲面族と2元4次形式により定まる代数曲線族のそれぞれの場合について、先行研究と本論文の主結果が述べられている。第5章では関連する成果として、整数係数周期連分数展開に関する結果が紹介されている。 本論文の第1部で、著者は最初の主結果を証明している。次数及び次元を固定した対角的超曲面族に対して、局所大域原理にまつわる Brauer-Manin 障害に関する条件を仮定すると、有理点をもつ超曲面の割合が、各素点ごとの局所点をもつ超曲面の割合の積と一致する。本論文ではこの事実を用いて、有理点をもつ超曲面の割合の近似値を、次数が2と3の場合に具体的に決定している。本研究の貢献は、対角的超曲面の係数に適切な同値関係を導入することで、各素点ごとに局所点をもつ割合を決定する、新しい手法を生み出した点にある。第6章で同値関係を導入し、第7章で一般次数の場合に、良い素点に対して局所点の割合を決定している。第8章では次数が2と3の場合に、悪い素点の局所的割合を直接的な計算で決定している。これらの成果を合わせて、第9章で証明が完結する。本論文の第2部で、著者は2つ目の主結果を証明している。すなわち、Bhargava と Ho によって研究された2元4次形式より定まる代数曲線族に対して、全ての素点で局所点を持つ代数曲線のうち有理点を持つものの割合が決定できる、具体的な部分族を構成している。第10章で基本的な事項を復習し、第11～13章で、有理点をもつ割合がそれぞれ 100%、0%、正(42%以上)となる部分族を与えている。3つ目の部分族は、有理点の存在と、全ての素点での局所点の存在が、大きく異ならないことが期待できる興味深い例である。本論文の第3部で、著者は整数係数周期連分数展開(PCF)に関する成果を述べている。第14章と第15章で PCF 多様体の有理点を調べ、それを用いて第16章で、自然数の平方根について、従来の正則連分数展開の拡張となる、整数係数周期連分数展開を新たに決定している。付録ではアフィンと射影的な代数多様体族の有理点の割合を比較している。 本論文で著者は、様々な技術的な工夫を駆使することで、対角的超曲面族や代数曲線族など基本的な代数多様体の無限族に対して有理点の統計的性質を証明することに成功し、この分野の学術的発展に大きく貢献している。以上の理由により、本論文の著者は博士(理学)の学位を受ける資格があるものと認められる。			

内容の要旨

報告番号	甲 第6196号	氏 名	竹内 裕隆
論文題 名 :			
Homogenization Results for Reflecting Diffusions on a Continuum Percolation (連続パーコレーション上の反射壁を持つ拡散過程に関する均一化)			
拡散や電流の流れは、媒質内の不純物により複雑な挙動をする。ランダム媒質の研究では不純物が乱雑に混ざっていると解釈し、これらの現象を調べる。巨視的・粗視的にはランダム性は失われ、熱拡散や電流の流れ等の挙動が単純に見える事があり、拡散係数や電気抵抗を求める事ができる。これを均一化と言う。ランダム媒質における均一化として、annealed な結果とquenchedな結果がある。直感的には、annealed result は 媒質の平均に対する均一化であり、quenched result は媒質を固定する毎に均一化が成り立つというものである。quenched result が成り立てば annealed result が成り立つため、quenched result のほうが強い性質である。 本論文では、連続パーコレーション上の反射壁を持つ拡散過程に対する均一化の研究を行なった。連続パーコレーションはサイト・パーコレーションを連続モデルに拡張したものであり、1990 年代にTanemura によりannealed invariance principle が証明され、Osada とSaitoh によっても研究がなされたが、quenched invariance principle に関してはこの30 年ほど未解決のままであった。しかし、近年quenched result に関する研究が発展しており、その手法を用いる事によって著者はquenched invariance principle と局所中心極限定理の証明に成功した。 quenched invariance principle はランダム媒質上を動くマルコフ過程に関する極限定理である。証明には、harmonic embedding と呼ばれる当分野では基本的な手法を用いる。この方法の鍵となるものはcorrector である。corrector はPoisson 型方程式の解であり、これにより拡散過程をマルチンゲール項と誤差項に分解する。マルチンゲールに関する収束は基本的な議論から容易に示すことができる。そのため、誤差項が0 に収束する事を示せば十分であるが、これは corrector の増大度が線形より劣る事から従う。この性質はsublinearity と呼ばれる。 局所中心極限定理はquenched invariance principle をより精密化した結果であり、拡散過程の推移密度に対する時空間に関して局所様な収束を示す物である。証明の鍵となるのは放物型 Harnack 不等式である。quenched invariance principle の証明においてcorrector のsublinearityは楕円型Harnack 不等式を考える事によって導かれる。局所中心極限定理においては、時間を含めての評価をする為に放物型Harnack 不等式を用いる必要がある。放物型Harnack 不等式からは推移密度のヘルダー連続性が従い、これとquenched invariance principle から局所中心極限定理を示す事ができる。 主定理の証明は主に ChiariniとDeuschel による 2015年と2016 年の論文で用いられた方法を採用する。彼らは当該論文において定常エルゴード的だが退化した媒質上の拡散過程に関する quenched invariance principle と局所中心極限定理を解析的な手法を用いて示した。本論文と 彼らの論文における相違点は、本論文では反射を持つ確率過程を扱うため、境界の影響を考慮しなければならない点である。著者は幾何的な条件を課す事でSobolev 不等式とPoincare 不等式を導く事により、Chiarini とDeuschel が用いた手法を適用する事に成功した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6196 号	氏 名	竹内 裕隆
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	理学博士 種村 秀紀
	副査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 厚地 淳
		慶應義塾大学教授	博士（理学） 高橋 博樹
		慶應義塾大学准教授	博士（理学） 坂川 博宣
学士（理学）、修士（工学） 竹内裕隆君の学位請求論文は「Homogenization Results for Reflecting Diffusions on a Continuum Percolation」（連続パーコレーション上の反射壁を持つ拡散過程に関する均一化）と題し、5 章と補遺から構成されている。 熱拡散や電流の流れは、媒質内の不純物により複雑な挙動をする。しかし、巨視的・粗視的には媒質のランダム性による影響は失われ、熱拡散や電流の流れ等の挙動が単純に見える事があり、拡散係数や電気抵抗等を求める事ができる。これを Homogenization（均一化）と言う。ランダム媒質における均一化としては、Annealed（焼き鈍し）と Quenched（焼き入れ）がある。ここで Annealed とは 媒質の平均化した設定のもとでの均一化であり、Quenched とは媒質を固定した設定のもとでの均一化である。Quenched の結果から Annealed での結果が導かれるので、Quenched の結果の方がより精密であることが分かる。本研究は、ユークリッド空間上のランダム媒質内の拡散過程に対して均一化問題を議論し、かなり一般的な条件のもとで Quenched Invariance Principle（焼き入れ普遍原理）と Local Central Limit Theorem（局所極限定理）を証明した。 第 1 章は、序論であり、問題の設定と既存研究の紹介、主結果、証明で用いる手法の概要、主論文の構成を述べている。 第 2 章では、扱う「連続パーコレーション上の反射壁を持つ拡散過程」の数学的に厳密な構成を与えている。そして定理の仮定で用いられる解析的、幾何的な条件を述べ、それらの条件を満たす例を与えている。 第 3 章では、第 1 の主定理である Quenched Invariance Principle の証明を与えている。 第 4 章では、第 2 の主定理である Local Central Limit Theorem の証明を与えている。 第 5 章では、第 3 章と第 4 章で用いた解析的な評価の証明を与えている。証明の鍵となるものは、Homogenization では Sobolev 不等式と Poincaré 不等式、Local Central Limit Theorem では放物型 Harnack 不等式等の解析的評価であるが、その導出には、拡散過程が駆動するランダムな領域の幾何的な性質を精査する必要がある。本論文では、上述の不等式を導くために十分で、かつ Continuum Percolation Model（連続浸透過程）で定まるランダムな領域が確率 1 で満たす幾何的な性質を導入したことにより厳密な証明をすることを可能にした。 補遺では、本論文で適用された、基礎となる理論（Dirichlet Form Theory）と基礎的な定理（熱核評価と被服定理）を纏めている。 Quenche Invariance Principle に関する先行研究では、ランダム媒質として正方格子等の離散空間上でのランダム場を扱ったものが中心であり、ユークリッド空間に代表される連続空間でもいくつかの研究がされているが、確率過程の駆動領域が制限される Continuum Percolation Model 等は扱われていなかった。本論文では、ランダムに制限された領域内で反射壁境界条件をもつ拡散過程を考え、領域が満たす幾何的な条件を捉えることにより Quenched Invariance Principle とその精密化となる Local Central Limit Theorem を証明している。本研究はランダム領域の漸近的な幾何的な性質と確率過程の極限定理との関連を明確にした点で新規性が高く、独自性があると判断される。 よって、本論文の著者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第6197号	氏 名	大六野 翔太
主論文題名：			
パクリタキセルの全合成および ポリケチド合成を指向したアミド基の還元的オレフィン化反応の開発			
多数の酸素官能基や二重結合を有する高酸化度化された天然物は、生体内標的との多点相互作用ができるため、優れた生物活性を示す。その代表的な天然物として、テルペン類やポリケチド類が挙げられる。しかし、複雑な骨格に対する酸素原子の位置・立体選択的な導入反応や、二重結合の構築反応において、課題が残されている。重要な生物活性にもかかわらず、これら天然物群の化学合成による実践的な供給は阻まれており、創薬研究が立ち遅れている。以上を背景に、本論文では、ジエノールエーテルの位置・立体選択的な酸化反応を鍵反応とした高酸化度テルペンであるパクリタキセルの全合成と、ポリケチドの効率的合成を指向したアミド基に対する還元的オレフィン化反応の開発について述べた。 緒論では、パクリタキセルとポリケチド類の研究背景について示した。まず、パクリタキセルの単離、構造、生物活性や生合成について述べた後、これまでの全合成について戦略ごとにまとめた。続いて、ポリケチド類の構造的特徴や生合成、従来の合成法について示した後、本研究の鍵となるイリジウム触媒を用いたアミド基の変換反応についてまとめた。 本論第一章では、パクリタキセルの全合成について述べた。パクリタキセルは、歪んだ橋頭位二重結合やオキセタン環を含む四環性骨格上に、多数の酸素原子を有する高度に酸化されたジテルペンである。四環性骨格に対し、いかに効率的に酸素官能基や二重結合を導入するかが合成の鍵となる。まず初めに、ジエノールシリルエーテルの酸化反応を開発した。四環性骨格上にあるケトンを経プロトン化すると、位置選択的に Z 体のジエノールシリルエーテルが生成した。続いて、酸化剤として DMDO を加えると、位置選択的かつ立体選択的にエポキシ化が進行した。開発した酸化反応をダブル Rubottom 酸化へと展開し、橋頭位二重結合と 2 つの酸素官能基の一举導入に成功した。続いて、保護基を必要としないオキセタン環構築法を開発した。従来のオキセタン環構築法では、強塩基の添加が必須であり、アルコールの保護が不可欠であったため、環化に多数の工程数を必要とした。そこで、脱離基である臭素を AgOTf で活性化する反応条件を確立し、穏和なオキセタン環の構築に成功した。これら新たに開発した反応により、最長 47 工程にてパクリタキセルの全合成を達成した。 本論第二章では、ポリケチド合成を指向したアミド基の還元的オレフィン化反応の開発について述べた。ポリケチドは、アルコールや二重結合を含む繰り返し構造から構成されている。ポリケチドの炭素-炭素結合形成に利用されるアミド基から、直接的なオレフィン化ができれば、ポリケチドの迅速的な合成になる。N-メトキシアミド基に対して、触媒量の IrCl(CO)(PPh₃)₂ とテトラメチルジシロキサンを用いたヒドロシリル化で、アミド基を半還元して <i>N,O</i>-アセタール中間体とした。ワンポット反応にて、TBACl を添加して生じたアルデヒドにリンイリドを作用させると、Wittig 反応で二重結合が構築され、わずか 1 工程にて不飽和エステルが合成できた。本手法は、様々なアミドに対して適用可能であり、高立体選択的に二重結合が構築できた。さらに、開発した還元的オレフィン化を、抗マラリア活性を有する samroiyotmycin A の合成へ適用した。本反応を 2 回利用し、20 員環マクロライド骨格の効率的な合成に成功した。このように開発した還元的オレフィン化は、ポリケチド骨格の効率的な合成に利用できることが明らかとなった。 総括では、本研究の成果を簡潔にまとめた。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6197 号	氏 名	大六野 翔太
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士（理学） 佐藤 隆章
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 高尾 賢一
		慶應義塾大学教授	博士（理学） 末永 聖武
		慶應義塾大学准教授	Ph. D. 河内 卓彌
学士（工学）、修士（理学）大六野翔太君提出の学位請求論文は、「パクリタキセルの全合成およびポリケチド合成を指向したアミド基の還元的オレフィン化反応の開発」と題し、緒論、本論二章、総括および実験編より構成されている。 多数の酸素官能基や二重結合を有する高度に酸化された天然物として、テルペン類やポリケチド類が知られている。複数の官能基により、生体内標的と多点相互作用できるため、優れた生物活性を示す。しかし、複雑な骨格に対する酸素原子や二重結合の位置および立体選択的な導入反応において、課題が残されている。これら天然物群の化学合成による実践的な供給は阻まれており、創薬研究が立ち遅れている。著者は本論文において、ジエノールシリルエーテルの位置・立体選択的な酸化反応を鍵反応としたパクリタキセルの全合成と、ポリケチドの効率的合成を指向したアミド基に対する還元的オレフィン化反応の開発について述べている。 緒論では、パクリタキセルとポリケチド類の研究背景について述べている。パクリタキセルの単離、構造、生物活性や生合成について述べた後、既存の全合成について戦略ごとにまとめている。次に、ポリケチド類の構造的特徴や生合成、従来の合成法について示した後、本研究の鍵となるイリジウム触媒を用いたアミド基の変換反応について記載している。 本論第一章では、パクリタキセルの全合成について述べている。パクリタキセルは、歪んだ橋頭位二重結合やオキセタン環を含む四環性骨格上に、多数の酸素原子を有する高度に酸化されたジテルペンである。多環性骨格に対し、いかに効率的に酸素官能基や二重結合を導入するかが合成の鍵となる。これに対し、ジエノールシリルエーテルの酸化反応を開発している。三環性骨格上にあるケトン脱プロトン化すると Z 体のジエノールシリルエーテルが生成する。続いて、酸化剤としてジメチルジオキソランを加えると、位置選択的かつ立体選択的にエポキシ化が進行する。生じたエポキシドに酸を加え、橋頭位二重結合と 2 つの酸素官能基の一挙導入に成功している。また、脱離基である臭素を銀塩で活性化する反応条件を確立し、穏和なオキセタン環構築法を開発している。これら新たに開発した反応により、最長 47 工程にてパクリタキセルの全合成を達成している。 本論第二章では、ポリケチド合成を指向したアミド基の還元的オレフィン化反応の開発について述べている。ポリケチドは、アルコールや二重結合を含む繰り返し構造から構成されており、合成に多工程を要する点が課題となっている。これに対し著者は、ポリケチドの炭素-炭素結合形成に利用されるアミド基から、還元的オレフィン化を開発している。N-メトキシアミド基に対して、触媒量の Ir 触媒を用いたヒドロシリル化で、アミド基を半還元して N,O-アセタール中間体としている。ワンポット反応にて、塩化テトラブチルアンモニウムを添加して生じたアルデヒドにリンイリドを作用させると、Wittig 反応で二重結合が構築され、わずか 1 工程にて不飽和エステルが合成可能である。さらに、開発した還元的オレフィン化を応用し、抗マラリア活性を有するサムロイヨットマイシン A の 20 員環マクロライド骨格の効率的な合成に成功している。このように開発した還元的オレフィン化は、ポリケチド骨格の効率的な合成に利用できることを明らかにしている。 総括では、本研究の成果がまとめられており、実験編には本論文における実験操作および反応生成物のスペクトルデータの解析等が記述されている。 以上、著者は本研究において、ジエノールシリルエーテルの酸化反応を鍵反応としたパクリタキセルの全合成と、ポリケチド合成を指向したイリジウム触媒を用いた N-メトキシアミド基の還元的オレフィン化反応の開発に成功している。著者のこれらの研究成果は、有機合成化学・創薬化学の進展に貢献し、理学上寄与するところが少なくない。 よって、本論文の著者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第6198号	氏 名	井上 朋也
主論文題名：			
有機基板上に精密担持されたナノクラスターの電子物性と反応性評価			
均一なナノ構造体による表面修飾は、表面・界面における機能高度化において非常に有望な手段として期待されている。この表面修飾担持は、気相法を用いて生成させた数十個程度の金属原子の集合体であるナノクラスター(NC)イオンに対して、原子数単位で構成原子数や元素組成比、電荷を精密に制御してソフトランディングさせることで達成できる。修飾表面の機能化は、光学応答、触媒反応、電磁気応答に関連した機能材料への応用に資すると考えられることから、幾何的にも電子的にも安定な「超原子」と呼ばれる NC の活用が注目されている。しかし、この NC 超原子を用いた均一で安定なナノ構造体の作製では、表面での NC の解離や凝集を制御する方法論の構築を含めて、その精密な物性評価は未だに挑戦的な課題である。 そこで本論文では、気相法にて精密合成された NC 超原子の単一分散で安定的な表面修飾による機能表面の開発と、その反応性の精密評価法の構築を目的とした。NC 超原子の凝集や酸化、電荷を制御した表面担持の実現では、適切な有機分子を予め蒸着し、電子物性を制御した有機基板を担体を用いて達成した。作製した NC 超原子の蒸着膜の反応性評価では、気体分子の曝露量の精密制御と光電子分光測定とを組み合わせた方法論を構築し、担持有機基板の意義を含めて NC 超原子の特徴を構成原子数や元素組成比との相関として明らかにした。 第1章では、研究の背景として、表面修飾・観測技術の発展と有機半導体分子およびクラスター科学の展開について概説し、本論文の各章の内容を記した。 第2章では、有機分子蒸着セルや気相高強度 NC 合成装置、3種類の光源を用いた光電子分光法などの実験装置とその動作原理・測定原理を詳述した。 第3章では、有機半導体分子として半・全フッ素置換ルブレ(C₄₂F₁₄H₁₄, C₄₂F₂₈)を表面修飾させた基板を作製し、1光子-2光子光電子分光を併用することで蒸着薄膜の電子準位の変化について述べた。フッ素置換とともに占有・非占有準位のエネルギーは共に深くなり、有機分子修飾によって基板の電子特性が設計できることを示した。 第4章では、2種類の電荷特性の異なる有機分子で予め表面修飾した基板に、気相合成したアルミニウム(Al)NC を構成原子数を単一にした上で、均一にソフトランディングさせた際の化学状態と反応性について述べた。適切な有機分子を予め基板に修飾することで担持 Al NC の電荷を制御できることを明らかにし、電子供与性の有機表面上では幾何的に充填構造をとることができる 13 量体(Al₁₃超原子)が負電荷を帯びた担持状態で安定化することを見出した。 第5章では、Al と同じ 13 族元素のホウ素(B)で原子置換した Al-B 複合 NC 担持薄膜の、純 Al NC 担持薄膜との反応性の違いについて述べた。Al-B 複合 NC における元素置換効果は B の組成比が大きくなる NC で強く現れることを明らかにするとともに、13 量体の Al₁₂B 超原子において Al₁₃ 超原子と匹敵する高い安定性を見出し、超原子に由来した幾何充填構造の形成が示唆された。 第6章では、14 族 Si で構成されたタンタル原子内包シリコンケージ(Ta@Si₁₆)超原子と Al₁₃ 超原子の異なる超原子間の比較として、気相での生成能と担持薄膜の反応性について述べた。Ta@Si₁₆超原子の方が Al₁₃超原子よりも高い選択的生成と化学的安定性を示すことを明らかにした。 第7章では、各章で得られた結論をまとめ、本研究の成果を要約した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6198 号	氏 名	井上 朋也
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	理学博士 中嶋 敦
	副査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 近藤 寛
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 羽曾部 卓
		慶應義塾大学准教授	博士（理学） 畑中 美穂
学士（理学）、修士（理学） 井上朋也君提出の学位請求論文は「有機基板上に精密担持されたナノクラスターの電子物性と反応性評価」と題し、7章から構成されている。 均一なナノ構造体による表面修飾は、表面・界面における機能高度化において有望な手段として期待されている。この表面修飾担持は、気相法を用いて生成させた数十個程度の金属原子の集合体であるナノクラスター(NC)イオンに対して、原子数単位で構成原子数や元素組成比、電荷を精密に制御してソフトランディングさせることで達成できる。修飾表面の機能化は、光学応答、触媒反応、電磁気応答に関連した機能材料への応用に資すると考えられることから、幾何的にも電子的にも安定な「超原子」と呼ばれる NC の活用が注目されている。しかし、この NC 超原子を用いた均一で安定なナノ構造体の作製では、表面での NC の解離や凝集を制御する方法論の構築を含めて、その精密な物性評価は極めて挑戦的な課題と位置付けられてきている。 そこで本論文では、気相法にて精密合成された NC 超原子による機能表面の構築とその評価として、NC 超原子の単一分散で安定的な表面修飾方法の開発と、その反応性の精密評価法の構築を目的としている。NC 超原子の凝集や酸化、電荷を制御した表面担持の実現では、適切な有機分子を予め基板に蒸着し、電子物性を制御した有機基板を担体に用いて達成している。作製した NC 超原子の蒸着膜の反応性評価では、気体分子の曝露量の精密制御と光電子分光測定とを組み合わせた方法論を構築し、担持有機基板の意義を含めて NC 超原子の特徴を構成原子数や元素組成比との相関として明らかにしている。 第1章では、研究の背景として、表面修飾・観測技術の発展と有機半導体分子およびクラスター科学の展開について概説し、本論文の各章の内容を記している。 第2章では、有機分子蒸着セルや気相高強度 NC 合成装置、3種類の光源を用いた光電子分光法などの実験装置とその動作原理・測定原理を、量子化学計算の手法とともに詳述している。 第3章では、有機半導体分子として半・全フッ素置換ルブレネ($C_{42}F_{14}H_{14}$, $C_{42}F_{28}$)を表面修飾させた基板を作製し、1光子-2光子光電子分光を併用することで蒸着薄膜の電子準位の変化について述べている。フッ素置換とともに占有・非占有準位のエネルギーは共に深くなり、有機分子修飾によって基板の電子特性が設計できることを示している。 第4章では、2種類の電荷特性の異なる有機分子で予め修飾した基板に、気相合成したアルミニウム(Al)NC の構成原子数を単一にして単一分散にソフトランディングさせて、その化学状態と反応性について述べている。電子供与性の有機分子による有機基板上で Al NC の 13 量体(Al_{13}超原子)が負電荷を帯び、幾何的にも充填構造をとり、担持 Al_{13}超原子が安定化することを見出している。 第5章では、Al と同じ 13 族元素のホウ素(B)で原子置換した Al-B 複合 NC 担持薄膜の酸化反応性において、Al-B 複合 NC における元素置換効果は B の組成比が大きくなる NC で強く現れることを見出し、幾何構造を含めた反応障壁の大きさとの相関を明らかにしている。 第6章では、Al_{13}超原子とタンタル内包シリコンケージ超原子($Ta@Si_{16}$)のそれぞれの担持薄膜の反応性の違いについて述べ、$Ta@Si_{16}$超原子の方が優れた酸化耐性をもつことを明らかにしている。 第7章では、各章の結論を述べ本研究の成果をまとめている。 以上要するに、本論文は均一なナノ構造体による表面修飾による機能化を念頭に、NC 超原子の単一分散で安定的な表面修飾方法として有機基板の特性と意義を明らかにするとともに、担持 NC 超原子の反応性の評価から、その特徴を構成原子数や元素組成比、および幾何構造との相関として明らかにしている。これらの知見と方法論は、超原子 NC を最小の構成単位とする次世代機能材料の創出に重要な基礎をなすものであり、物理化学、そしてナノ材料化学の発展への寄与が少なくない。よって、本論文の著者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6199 号	氏 名	杉山 靖和
主論文題名：			
ラクタム戦略を基盤とした多環性アルカロイドの全合成			
多環性の含窒素化合物は、様々な生物活性を示し、医薬品のリード化合物として注目されてきた。しかし、複雑な分子構造を有するため化学合成による供給は困難であり、創薬研究が停滞している化合物群である。以上を背景に、多環性アルカロイドの効率的な合成を目指し、ラクタム戦略を考案した。本戦略では、入手容易なラクタムを出発原料とし、アミドカルボニル基の反応性を利用したアルキル化で、多置換ラクタムへと変換する。続いて、Ir 触媒を用いた還元的な求核付加反応で、多環性アミン骨格を一挙に合成する。本戦略では、合成後半での導入が難しい窒素原子があらかじめ原料に含まれている。また、不安定なアミン等価体として安定なラクタムを用いることができ、アミンの保護・脱保護という余分な工程を必要としない。さらに、Ir 触媒を用いた官能基化により、一挙に多環性アミン骨格が合成できるため、合成経路の短工程化が可能である。本論文では、ラクタム戦略に基づいた、stemocochinin、eburnamonine、および、taberhanine の 3 種類の多環性アルカロイドの全合成について述べた。いずれの合成も、本戦略の効果により、世界初または世界最短工程での全合成となった。 緒論では、ラクタム戦略の概要について述べ、Ir 触媒を用いたアミド基の還元的な求核付加反応の先行研究についてまとめた。さらに、合成標的である 3 種の多環性アルカロイドについて、単離・構造決定、生物活性、全合成例について紹介した。 本論第一章では、stemocochinin 類の不斉全合成について述べた。5 員環ラクタムをシロキシピロールへと変換し、ビニロガス Michael 反応、N-アルキル化による環化反応を経て骨格形成し、四環性中間体を合成した。次に、四環性中間体に対し、Ir 触媒を用いた還元的な求核付加反応を用いると、様々な官能基共存下、ラクタム選択的に反応が進行し、五環性骨格の構築に成功した。こうして、最長 12 工程にて世界で最初の stemocochinin 類の全合成を達成した。 本論第二章では、eburnamonine の全合成について述べた。まず初めに、本全合成における鍵反応として、還元的な(3+2)環化反応を開発した。Ir 触媒を用いたラクタムのヒドロシリル化と、エナミンに対する光酸化還元反応を組み合わせ、ラクタムより環状 N,O-アセタールが一挙に構築可能となった。本反応を基盤としたラクタム短工程化戦略により、わずか 4 工程にて eburnamonine の全合成を達成した。次に、還元的な(3+2)環化反応を発展させ、taberhanine の不斉全合成へと応用した。入手容易なキラルなラクタムから骨格形成し、多置換ラクタムを合成した。得られたラクタムに対し、Ir 触媒を用いたヒドロシリル化、エナミンの 1,4-付加反応を経てアゾメチンイリドを発生させると、[3+2]環化付加反応が進行し、三環性のケトンが合成できた。三環性ケトンから、Fischer インドール合成を経由して、taberhanine の不斉全合成を達成した。こうして、ラクタム短工程化戦略を駆使し、これまでで最も工程数の少ない 14 工程で全合成を実現した。 総括では、本研究の成果を簡潔にまとめた。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6199 号	氏 名	杉山 靖和
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士（理学） 佐藤 隆章
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 垣内 史敏
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 犀川 陽子
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 高橋 大介
学士（工学）、修士（理学）杉山靖和君提出の学位請求論文は、「ラクタム戦略を基盤とした多環性アルカロイドの全合成」と題し、緒論、本論二章、総括および実験編より構成されている。 多環性の含窒素化合物は、様々な生物活性を示し、医薬品のリード化合物として注目されている。しかし、複雑な分子構造を有するため化学合成による供給は困難であり、創薬研究が停滞している化合物群である。著者は本論文において、多環性アルカロイドの効率的な合成を目指し、ラクタム戦略を考案している。本戦略では、入手容易なラクタムを出発原料とし、アミドカルボニル基の反応性を利用したアルキル化で、多置換ラクタムへと変換する。続いて、Ir 触媒を用いた還元的な求核付加反応で、環状アミン骨格を一举に合成する。本戦略では、合成後半での導入が難しい窒素原子があらかじめ原料に含まれている。また、不安定なアミン等価体として安定なラクタムを用いることができ、アミンの保護・脱保護という余分な工程を必要としないという特徴がある。さらに、Ir 触媒を用いた官能基化により、一举に環状アミン骨格が合成できるため、多環性アルカロイド合成の短工程化が可能である。本論文では、ラクタム戦略に基づいた、stemocochinin、および、eburnamonine、taberhanine の 3 種類の多環性アルカロイドの全合成について述べている。 緒論では、ラクタム戦略の概要について述べ、Ir 触媒を用いたアミド基の還元的な求核付加反応の先行研究についてまとめている。さらに、合成標的である 3 種の多環性アルカロイドについて、単離・構造決定、および、生物活性、全合成例について記載している。 本論第一章では、stemocochinin 類の不斉全合成について述べている。5 員環ラクタムをシロキシピロールへと変換し、ビニログス Michael 反応、N-アルキル化により骨格形成し、四環性中間体を合成している。次に、四環性中間体に対し、Ir 触媒を用いた還元的な求核付加反応を用いると、様々な官能基共存下、ラクタム選択的に反応が進行し、五環性骨格の構築に成功している。これらの過程を利用して、最長 12 工程にて世界で最初の stemocochinin 類の全合成を達成している。 本論第二章では、eburnamonine の全合成について述べている。まず初めに、本全合成における鍵反応として、ラクタムの還元的(3+2)環化反応を開発している。Ir 触媒を用いたラクタムのヒドロシリル化と、エナミンに対する光酸化還元反応を組み合わせ、ラクタムより環状 N,O-アセタールが一举に構築可能であると見出している。本反応を基盤としたラクタム戦略により、わずか 4 工程にて eburnamonine の全合成を達成している。次に、還元的(3+2)環化反応を発展させ、taberhanine の不斉全合成へと応用している。入手容易なキラルなラクタムから骨格形成し、多置換ラクタムを合成した。得られたラクタムに対し、Ir 触媒を用いたヒドロシリル化、エナミンの 1,4-付加反応を経てアゾメチンイリドを発生させると、[3+2]環化付加反応が進行し、三環性ケトンを与えている。三環性ケトンから、Fischer インドール合成を用いて、taberhanine の不斉全合成を達成している。開発したラクタム短工程化戦略を駆使し、これまでの合成例と比較して、最も工程数の少ない 14 工程で全合成を実現している。 総括では、本研究の成果がまとめられており、実験編には本論文における実験操作および反応生成物のスペクトルデータ等が記述されている。 以上、著者は本研究において、ラクタム戦略を確立し、3 つの多環性アルカロイドの全合成に成功している。いずれも世界初または世界最短工程での全合成であり、本戦略が、窒素を含む創薬シーズの合成における有用な合成戦略であることを実証している。著者のこれらの研究成果は、有機合成化学・創薬化学の進展に貢献し、理学上寄与するところが少なくない。 よって、本論文の著者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6200 号	氏 名	菊池 脩太
主論文題名：			
イジングマシンのハードウェア制限緩和アルゴリズムの提案			
組合せ最適化問題は、与えられた制約条件を満たし、目的関数を最小または最大化する決定変数の組を求める問題である。量子アニーリングマシンや非量子イジングマシンといったイジングマシンは、組合せ最適化問題を高速・高精度に解くことが期待されている。しかし、イジングマシン実機にはハードウェア上の制限があり、性能を十分に発揮することができないという課題がある。そこで本研究では、ハードウェア上の制限を克服あるいは緩和するアルゴリズムの提案とその性質の理論的な検討を行なった。 本論文は全 5 章から構成される。第 1 章では、本論文の研究の背景と目的について述べる。第 2 章では、イジングマシンで組合せ最適化問題の解を得るための操作手順に沿って、組合せ最適化問題をイジングモデルで表現する方法、ハードウェア上の制約、内部アルゴリズムであるシミュレーテッドアニーリング (Simulated Annealing: SA) と量子アニーリング (Quantum Annealing: QA) について予備知識を述べる。第 3 章では、ハードウェア上の制限の一つであるビット幅制限を緩和する手法について述べる。まず、SA 実行時にビット幅削減前後のイジングモデルの動的プロセスが異なることを示す。この動的プロセスが変化した原因を統計力学的な解析によって特定した後、解析結果を基にビット幅削減後イジングモデルの動的プロセスが元のイジングモデルのものと一致する SA のパラメータを提案する。第 4 章では、量子アニーリングマシンに入力可能な問題サイズ制限を緩和する手法について述べる。入力可能な問題サイズが大きい非量子イジングマシンと、高速に良解を得ることが期待される量子アニーリングマシンを組み合わせ、2 つのイジングマシンの長所を活かしたハイブリッド最適化手法について説明する。ハイブリッド最適化手法の性能を評価するために、非量子イジングマシンとして SA を、量子アニーリングマシンとして D-Wave Advantage を使用したシミュレーションを用いて評価する。シミュレーションでは、量子アニーリングマシンに入力可能または入力不可能な問題サイズのイジングモデルに対する解精度を評価する。同時に、ハイブリッド最適化手法のパラメータ依存性についても検証する。さらに、SA と量子アニーリングマシンによるシミュレーションによって明らかとなった性質やハイブリッド最適化手法の潜在的な能力について評価するために、マスター方程式やシュレディンガー方程式を用いた SA と QA によるシミュレーションを実施する。第 5 章では、本論文の結論と今後の展望について述べる。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6200 号	氏 名	菊池 脩太
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士（理学） 田中 宗
	副査	慶應義塾大学教授	博士（情報理工学） 山本 直樹
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 渡辺 宙志
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 村松 眞由
学士（工学）、修士（工学） 菊池脩太君提出の学位請求論文は、「イジングマシンのハードウェア制限緩和とアルゴリズムの提案」と題し、全5章から構成されている。 組合せ最適化問題は、与えられた制約条件を満たし、目的関数を最小または最大化する決定変数の組を求める問題である。量子アニーリングマシンや非量子イジングマシンといったイジングマシンは、組合せ最適化問題を高速・高精度に解くことが期待されている。しかし、イジングマシン実機にはハードウェア上の制限があり、性能を十分に発揮することができないという課題がある。そこで本研究では、ハードウェア上の制限を緩和するアルゴリズムの提案とその性質の理論的な検討を行なった。 第1章では、本研究の背景および先行研究を紹介し、本研究の目的と意義をまとめている。 第2章では、イジングマシンで組合せ最適化問題の解を得るための操作手順に沿って、組合せ最適化問題をイジングモデルで表現する方法、ハードウェア上の制約、内部アルゴリズムであるシミュレーテッドアニーリングと量子アニーリングについて予備知識を整理している。 第3章では、ハードウェア上の制限の一つであるビット幅制限を緩和する手法について述べている。まず、シミュレーテッドアニーリング実行時にビット幅削減前後のイジングモデルの動的プロセスが異なることを示している。この動的プロセスが変化した原因を統計力学的な解析によって特定した後、解析結果を基にビット幅削減後イジングモデルの動的プロセスが元のイジングモデルのものと一致するシミュレーテッドアニーリングのパラメータを提案している。 第4章では、現存する量子アニーリングマシン実機に入力可能な問題サイズ制限を緩和する手法について述べている。入力可能な問題サイズが大きい非量子イジングマシンと、高速に良解を得ることが期待される量子アニーリングマシンを組み合わせ、2つのイジングマシンの長所を活かしたハイブリッド最適化手法について説明している。ハイブリッド最適化手法の性能を評価するために、非量子イジングマシンとしてシミュレーテッドアニーリングをソフトウェア実装したものを使用し、量子アニーリングマシン実機としてD-Wave Advantageを使用している。実施した実験では、量子アニーリングマシンに入力可能または入力不可能な問題サイズのイジングモデルに対する解精度を評価している。同時に、ハイブリッド最適化手法のパラメータ依存性についても検証している。さらに、シミュレーテッドアニーリングと量子アニーリングマシンによる実験によって明らかとなった性質やハイブリッド最適化手法の潜在的な能力について評価するために、マスター方程式を用いたシミュレーテッドアニーリングやシュレディンガー方程式を用いた量子アニーリングによるシミュレーションを実施している。 第5章では、各章の結果をまとめ、本論文を総括している。 以上まとめると、本論文の著者は、量子アニーリングマシンや非量子イジングマシンにおけるハードウェア上の制限起因の性能悪化を緩和するアルゴリズムを提案し、そのアルゴリズムの性能の評価を行うために数値実験を行った。また、そのアルゴリズムの性能を統計力学的手法などによる解析によって明らかにした。量子アニーリングマシンや非量子イジングマシンのハードウェア自体の発展はこれからも着実に進むことが期待されるものの、ハードウェア上の制限は常に存在するものであり、ハードウェア上の制限を緩和するアルゴリズムは今後も活用されることが期待されるため、本論文の成果はイジングマシン分野のさらなる発展に資することが期待される。 よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6201 号	氏 名	Ye, Hong (叶 洪)
主論文題名： Effects of Pt Loading on Hydrogen-sensitive Luminescence Switching of Porous $\text{Y}_2\text{WO}_6\text{:Eu}^{3+}$ Materials (多孔質 $\text{Y}_2\text{WO}_6\text{:Eu}^{3+}$ 材料の水素感受性発光スイッチングに及ぼす白金担持の効果)			
地球温暖化問題の解決に向け再生可能なエネルギー源としての水素利用に関する研究が数多く報告されている。水素の製造、貯蔵、輸送に関わるすべての過程において水素の漏洩を検知する必要があるため、種々のタイプの水素ガスセンサが開発されている。一方、有機または無機発光物質を用いて、外部環境の変化に応じた発光の変調を利用して化学的あるいは物理的情報を可視化する技術が注目されている。本研究は、無機発光物質と水素との相互作用による発光の変調を水素の検知に利用することを目指して、触媒としてはたらく白金を担持した多孔質な $\text{Y}_2\text{WO}_6\text{:Eu}^{3+}$ 蛍光体材料を作製し、その水素ガス応答性を評価して新規なセンサを開発することを目的とした。 第 1 章では、本研究の背景、既存の水素ガスセンサの動作原理と応用例、蛍光体の種類と発光メカニズムなどを説明した。 第 2 章では、研究で使用した試薬類、試料の作製方法、試料の分析方法と使用した装置についてまとめた。 第 3 章では、白金を担持したメソ多孔質 $\text{Y}_2\text{WO}_6\text{:Eu}^{3+}$ 蛍光体粒子の作製と水素ガス応答性の評価を述べた。界面活性剤を含む K_2PtCl_4 水溶液を用いた自己制御還元法により、蛍光体粒子の表面に白金ナノ粒子を析出させることができた。この試料を $150\text{ }^\circ\text{C}$ の低温で 15 分間、濃度 4% の水素ガス雰囲気中に保持すると、その蛍光積分強度は保持前の 22% にまで低下した。 第 4 章では、Pechini 式ゾルーゲル法によるメソおよびマクロ多孔質 $\text{Y}_2\text{WO}_6\text{:Eu}^{3+}$ 蛍光体薄膜の作製と光学特性について述べた。前駆体溶液のアルコール溶媒の種類と有機添加物の割合を系統的に変化させることにより、種々のサイズの細孔を有する蛍光体薄膜を作製することができた。また、マクロ孔を有する薄膜においては光散乱の効果により薄膜表面から取り出される発光の強度が高くなることを明らかにした。 第 5 章では、まず前章にて発光強度を最適化したマクロ多孔質蛍光体薄膜に白金を担持する手法を考案した。K_2PtCl_4 水溶液中で、第 3 章で用いたものとは異なる界面活性剤で白金を還元析出させる方法により薄膜表面に白金ナノ粒子を担持させることができた。このとき、白金ナノ粒子の数とサイズを K_2PtCl_4 水溶液の濃度、界面活性剤の添加量、薄膜の水溶液への浸漬時間の 3 つのパラメータにより精密に制御した。白金を担持した薄膜では、水素ガスとの反応が促進されてより消光が進み、第 3 章と同じく $150\text{ }^\circ\text{C}$ の低温で蛍光積分強度が十分に低下した。また、水素と反応した薄膜は空气中、$200\text{ }^\circ\text{C}$ で熱処理するだけで発光が回復したことから、本研究で開発した蛍光体薄膜は簡便な水素ガス検出器の主要部品として有望であることが示された。 第 6 章では、各章で得られた内容を要約して、本研究全体の総括を行った。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6201 号	氏 名	Ye, Hong (叶 洪)
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	藤原 忍
副査	慶應義塾大学教授	博士（理学）	近藤 寛
	慶應義塾大学教授	Dr. sc. nat.	チッテリオ, ダニエル
	慶應義塾大学専任講師	博士（工学）	芹澤 信幸
学士（工学）、修士（工学）叶洪君提出の学位請求論文は「Effects of Pt Loading on Hydrogen-sensitive Luminescence Switching of Porous $\text{Y}_2\text{WO}_6:\text{Eu}^{3+}$ Materials」（多孔質 $\text{Y}_2\text{WO}_6:\text{Eu}^{3+}$ 材料の水素感受性発光スイッチングに及ぼす白金担持の効果）と題し、6 章から構成されている。 脱炭素社会への移行に向けた取り組みにおいて、水素を再生可能なエネルギー源とする工業プロセスや輸送機器の開発が求められている。水素は可燃性ガスであるため、製造、貯蔵、輸送、使用に関わるすべての過程において漏洩を検知するセンサが必要となる。既存の電気式・光学式水素ガスセンサは微弱な信号の変化を捉えるための高精度な計測機器が必須である。一方、発光材料を用いて化学物質の存在を発光の変調として簡便に可視化する技術が近年注目されている。本研究は、蛍光体材料と水素との相互作用による発光のスイッチング現象を利用して新規なセンサを開発すること、ならびに白金触媒を用いて水素感受性を大きく向上させることを目的としている。 第 1 章では、研究背景と目的を述べ、水素ガスセンサの動作原理および蛍光体材料の発光メカニズムについて概説している。 第 2 章では、材料の合成と評価に用いた試薬および装置をまとめている。 第 3 章では、メソ多孔質 $\text{Y}_2\text{WO}_6:\text{Eu}^{3+}$ 蛍光体粒子の合成法、白金触媒の担持法および水素ガス応答性の評価について述べている。水溶液中における界面活性剤の加水分解反応と K_2PtCl_4 の還元反応の組み合わせにより、白金ナノ粒子が蛍光体粒子表面に析出した試料が得られている。この試料を濃度 4% の水素ガス雰囲気中 150 °C で 15 分間保持することにより、蛍光強度が保持前の 22% まで低下することを示している。 第 4 章では、化学的手法によるメソおよびマクロ多孔質 $\text{Y}_2\text{WO}_6:\text{Eu}^{3+}$ 蛍光体薄膜の作製と光学特性について述べている。前駆体溶液に添加する有機物質の種類や割合を系統的に変化させて、薄膜の表面および内部に形成される細孔の形状とサイズを制御している。とくに、マクロ孔を有する薄膜において表面から取り出される発光の強度が光散乱の効果により増強されることを見いだしている。 第 5 章では、前章にて発光強度が高められたマクロ多孔質蛍光体薄膜の表面に白金触媒を担持する手法を考案している。このとき、白金ナノ粒子の数とサイズを精密に制御することで、第 3 章の蛍光体粒子と同じく 150 °C で水素ガスに応答して蛍光強度が低下することを確認している。さらに、水素と反応した薄膜を空気中 200 °C で熱処理するだけで発光が回復することも明らかにしている。 第 6 章では、各章で得られた成果をまとめ、本論文全体の総括を述べている。 以上要するに、本論文では水素ガスとの相互作用により発光強度が変化する蛍光体材料を開発するとともに、材料の微細な構造制御と白金触媒の担持により応答性が高められることを明らかにしており、無機材料化学分野において、工学上、工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6202 号	氏 名	長田 惇
主論文題名：			
イベントカメラを用いたオプティカルフロー推定 ～スパース・非同期推定を目指して～			
オプティカルフロー推定は、移動物体の認識において重要な技術である。また、自動運転の衝突回避のような緊急性の高いシステムでは、高レートでの推定が求められる。従来のフレームベースのカメラでは、画像間で輝度一貫性を測ることで推定を行うが、時間分解能の低さから画素同士の対応づけは本質的に困難である。近年では、深層学習など高度なモデルが提案されているが、出力レートを上げようとすると画像の枚数が多くなり、全画素を処理することは計算負荷が大きくなる。 イベントカメラは画素ごとに非同期的に輝度の変化を出力するカメラであり、高い時間分解能を持ち、オプティカルフローの推定に適していると言える。その特性ゆえに、時空間イベントを局所的に平面フィッティングすることで簡単にフローが得られるが、エッジに並行な成分に不定性残り、完全なオプティカルフローではない。また、イベントを密に処理してフローを推定する手法が存在するが、古いイベントに対して再計算を要し、効率的な処理とは言えない。そこで本研究では、スパースかつインクリメンタルな処理によってイベントから完全なオプティカルフローを推定する手法を提案する。 第 1 章に、本研究の背景と目的を述べた。 第 2 章では、従来の画像ベースのオプティカルフロー推定技術について述べ、その原理的課題を述べた。次に、イベントカメラを導入し、既存手法について概説した。 第 3 章では、イベントデータから輝度を復元することで、従来の輝度一貫性の仮定を利用する手法に着目した。高い時間分解能で輝度を復元しフローを推定可能であるが、データがスパースなため平坦な推定になってしまう。そこで、車載シーンの運動モデルを活用した正則化を提案し、精度向上を確認した。 第 4 章では、第 3 章の復元した輝度で一致度を測る仕組みは、差分のみを処理するイベントの特性を活かしきれていないと考え、イベントの時間で直接対応づけを測る損失関数を提案した。これにより、提案のロス関数を滑らかさの正則化とともに最適化することで、輝度復元を介さずにオプティカルフローを推定可能とした。 第 5 章では、非同期イベントデータを画像と同様に扱い、全画素で同期的に最適化を行っていた第 3, 4 章に対して、スパース、非同期的、インクリメンタルにオプティカルフローを推定する手法を提案した。イベントデータから局所的に得られる動きの情報から、オプティカルフローの分布を細長い 2 次元のガウス分布で表現し、滑らかさの事前情報を合わせたファクターグラフを構成した。信念伝搬法によってイベントが来るごとに各画素の分布を非同期的に更新して周辺化することで、局所的な演算のみからオプティカルフローを推定することを可能とした。スパースな手法であるため並列化が可能で、マルチコア CPU でリアルタイム処理を達成した。本手法は計算結果を任意のタイミングで取り出すことができ、出力レートを自由に設定可能である。 第 6 章では、結論として本研究で得られた成果を要約した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6202 号	氏 名	長田 惇
論文審査担当者： 主査 慶應義塾大学教授 博士（工学） 青木 義満			
副査 慶應義塾大学教授 工学博士 池原 雅章			
慶應義塾大学教授 博士（工学） 斎藤 英雄			
慶應義塾大学准教授 博士（工学） 五十川 麻理子			
学士（工学）、修士（工学）長田惇君提出の学位請求論文は、「イベントカメラを用いたオプティカルフロー推定 ～スパース・非同期処理を目指して～」と題し、6章から構成されている。 オプティカルフロー推定は、移動物体の認識において重要な技術である。また、自動運転の衝突回避のような緊急性の高いシステムでは、高レートでの推定が求められる。従来のフレームベースのカメラでは、画像間で輝度一貫性を測ることで推定を行うが、時間分解能の低さから画素同士の対応づけは本質的に困難である。近年では、深層学習など高度なモデルが提案されているが、出力レートを上げようとすると画像の枚数が多くなり、全画素を処理することは計算負荷が大きくなる。イベントカメラは画素ごとに非同期的に輝度の変化を出力するカメラであり、高い時間分解能を持ち、オプティカルフローの推定に適している。その特性ゆえに、時空間イベントを局所的に平面フィッティングすることで簡単にフローが得られるが、エッジに並行な成分に不定性が残るため、完全なオプティカルフローではない。また、イベントを密に処理してフローを推定する手法が存在するが、古いイベントに対して再計算を要し、効率的な処理とは言えない。 本論文では、スパースかつインクリメンタルな処理によってイベントデータから完全なオプティカルフローを推定する手法を提案している。局所的なフローの分布を2次元のガウス分布で表現し、信念伝搬法によって周囲に伝播させることで、イベントデータのスパース性を保ったまま、高精度かつ高速なオプティカルフロー推定を可能としている。 第1章では、研究の背景と目的について述べている。 第2章では、従来の画像ベースのオプティカルフロー推定とその原理的な課題を述べている。 第3章では、イベントデータから輝度を復元することで、従来の輝度一貫性の仮定を利用する手法に着目している。高い時間分解能で輝度を復元しフローを推定可能であるが、データがスパースなため平坦な推定になってしまう。そこで、車載シーンの運動モデルを活用した正則化を提案し、精度向上を確認している。 第4章では、前章の課題を踏まえ、イベントのタイムスタンプで直接対応づけを測る損失関数を提案している。これにより、提案のロス関数を滑らかさの正則化とともに最適化することで、輝度復元を介さずにオプティカルフローを推定する手法を提案している。 第5章では、スパースで非同期的、かつインクリメンタルにオプティカルフローを推定する手法を提案している。イベントデータから局所的に得られる動きの情報から、オプティカルフローの分布を細長い2次元のガウス分布で表現し、滑らかさの事前情報を合わせたファクターグラフを構成している。信念伝搬法によってイベントが来るごとに各画素の分布を非同期的に更新して周辺化することで、局所的な演算のみからオプティカルフローを推定することを可能としている。スパースな手法であるため並列化が可能で、マルチコア CPU でリアルタイム処理を達成している。 第6章では、本研究の成果をまとめ、今後の課題について議論している。 以上要するに、本論文はイベントカメラを対象として、イベントデータに適したスパースかつ非同期な処理によるオプティカルフロー推定を提案し、実応用上の有効性を示したもので、画像工学分野において工業上、工学上寄与するところが少なくない。 よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6203 号	氏 名	酒寄 剛
主論文題名：			
Slip Dynamics and Energy-aware Path Planning for Wheeled Mobile Robots in Sandy Terrain (砂地移動ロボットの動的スリップとエネルギー効率を考慮した経路計画)			
移動ロボットの自律移動システムは、惑星探査や捜索・救助などのミッションにおいて広く使用されており、その有用性が認められている。従来の自律移動システムは、移動ロボットを安全に目的地まで誘導するために必須となる認識、判断、制御技術に基づいて構築されている。しかし、砂地などのより複雑な環境でのロボットの探査効率をさらに向上させるためには複数の課題がある。例えば、砂地のような不均一で滑りやすい、または障害物の多い地形において、スリップやスタックなどの現象が発生しやすく、さらにそれら現象は移動速度に応じて動的に変化することが知られている。またロボットの移動速度とエネルギー消費量は密接な関係にある。太陽電池パネル搭載の屋外移動ロボットを想定すると、高いエネルギー効率を得るためにはロボットは停止して発電・バッテリーへの再充電を行うが、頻繁な停止はロボットの運用効率を低下させてしまう。 そこで、本論文では、車輪と土質の力学的相互作用ならびにエネルギー効率を考慮した移動ロボットの経路・動作計画を構築することを目的とした。本論文において提案する計画アルゴリズムは、砂地環境を走行する車輪型移動ロボットを想定しており、主に 1) 砂地環境におけるスリップダイナミクスを考慮した低計算負荷の経路計画、2) ロボットの運用効率とエネルギー効率を両立する経路を生成する動作計画を有している。さらに、各提案手法が有用である地形に関し、解明した。 第 1 章では、本研究の背景と目的、フレームワークの全体構成と問題解決のためのアプローチ、動作計画の概要について説明した。 第 2 章では、ロボットの砂地走行における過渡状態も考慮することを目的として、スリップレートと呼称する指標を導入し、単車輪実験装置により同指標の特性を解析した。さらにスリップレートを考慮した経路計画方法を提案した。 第 3 章では、車輪と土質の相互作用ならびに機械学習によって得られるロボットの消費電力モデルを構築するとともに、砂地での移動ロボットのエネルギー効率を考慮した軌道計画について述べた。 第 4 章では、第 2 章および第 3 章で提案した計画アルゴリズムについて、動力学シミュレーションの結果を用いてスリップとエネルギーの観点から各経路を評価し、各提案手法が有用となるシナリオに関して述べた。 第 5 章では、本研究を総括し主要な結果と貢献について要約し、今後の展望について言及した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6203 号	氏 名	酒 寄 剛
論文審査担当者： 主査 慶應義塾大学准教授 博士（工学） 石上 玄也			
副査 慶應義塾大学教授 工学博士 杉浦 壽彦			
慶應義塾大学教授 博士（工学） 桂 誠一郎			
慶應義塾大学教授 博士（工学） 高橋 正樹			
学士（工学）、修士（工学）酒寄剛君提出の学位請求論文は、「Slip Dynamics and Energy-aware Path Planning for Wheeled Mobile Robots in Sandy Terrain」（砂地移動ロボットの動的スリップとエネルギー効率を考慮した経路計画）と題し、5 章から構成されている。 惑星をはじめとした砂地地形などの極限環境において、自律移動ロボットによる運用効率を向上させるためには複数の課題がある。例えば、砂地のような不均一で滑りやすい地形では、ロボットのスリップやスタックといった走行リスクが発生しやすく、さらにそれらの現象はロボットの移動速度に応じて動的に変化することが知られている。また、ロボットのエネルギー効率に注目すると、ロボット搭載の太陽電池パネルによる発電量を最大化しつつ、ロボットの移動によるエネルギー消費を最小化しなければならない。太陽電池パネルの発電効率はロボット停止状態において最も高くなるが、ロボットの移動と停止を高頻度で繰り返すことは、運用効率の低下ならびに走行リスクを誘発するという課題がある。 そこで本論文では、車輪と土質の力学的相互作用ならびにエネルギー効率を考慮した移動ロボットの経路計画手法を構築することを目的としている。本論文は、砂地環境を走行する車輪型移動ロボットを想定しており、砂地環境における動的スリップを考慮した低計算負荷の経路計画、ならびにロボットの運用効率とエネルギー効率を両立するロボットの動作計画をそれぞれ提案している。また、これらの提案手法が有用となる地形の特徴に関して、高忠実度なロボット動力学シミュレーションを用いた解析を実施している。 第 1 章では、本研究の背景と目的、経路計画手法のフレームワークの全体構成と問題解決のためのアプローチの概要について述べている。 第 2 章では、移動ロボットの砂地走行における過渡状態に基づいて、スリップレートと呼称する指標を導入し、単車輪走行実験装置により同指標の特性を解析している。さらにスリップレートを考慮した経路計画手法を提案している。 第 3 章では、車輪と土質の相互作用ならびに機械学習によって得られるロボットの消費電力モデルを構築するとともに、砂地での移動ロボットのエネルギー効率を考慮した動作計画について述べている。 第 4 章では、第 2 章および第 3 章での各提案手法について、砂地走行を高い忠実度で再現可能な動力学シミュレータを用いて、ロボットのスリップとエネルギーの観点から、各提案手法が有用となるシナリオについて解析している。 第 5 章では、本研究の主要な成果と貢献について総括し、今後の展望について言及している。 以上要するに、本論文は不整地における自律移動ロボットの動的スリップとエネルギー効率を考慮した経路計画手法を提案するものであり、ロボット工学分野において、工学上、工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6204 号	氏 名	伊藤 皇聖
主論文題名：			
半導体ナノ粒子の最適化による可視光援用水素生成と二酸化炭素還元			
光触媒は太陽光の力のみをエネルギー源として、水素 (H_2) 生成や二酸化炭素 (CO_2) 還元に応用できる優れたワイドギャップ半導体材料である。近年の研究では、太陽光に含まれる紫外光を用いることで 100%に近い量子収率で H_2 生成や CO_2 還元を行えることが報告されている。一方、太陽光に含まれる紫外光はわずか 5%であり、50%以上を占める可視光の有効利用が求められている。可視光を有効利用する方法として、2 つ以上の光触媒を組み合わせることによるダイレクト型 Z スキームの形成が注目を集めているが、試料の合成過程の複雑化と高コスト化が問題視されている。また、光触媒材料の多くは金属酸化物から構成されており、将来的な鉱物資源の枯渇化の影響を受けることが懸念される。その背景の下、近年、窒化炭素などの半永久的な合成かつ可視光応答が可能な金属フリー光触媒材料が新たに注目を集めているが、反応効率と耐久性が低いため実用化には程遠く、それらの改善が強く求められている。 これらの問題解決に向けて、本研究では、半導体ナノ粒子の最適化を中心とした材料開発による、安価なダイレクト型 Z スキームの誘発方法と、高効率な光触媒特性を示す金属フリー光触媒材料の開発を目的とした研究を遂行した。 第 1 章では、環境調和型社会に向けて克服すべき社会的課題、それらの解決において光触媒が果たし得る役割、光触媒に関する最新の研究開発事例と課題点をそれぞれ概説した後、本研究の目的と特徴を記した。 第 2 章では、酸化タングステン (WO_3) の水熱合成途上に構造規定材として知られるシュウ酸を滴下することで、異なるバンドギャップを持つ WO_3 の異種結晶相（六方晶と三斜晶）を単一ナノロッド内に位置選択的に形成した。その後、光析出法による白金 (Pt) 担持 WO_3 を作製し、その試料における光触媒メチレンブルー分解やアンモニアボランを用いた可視光援用 H_2 生成を実証した。それらの結果を基に、WO_3 単一ナノロッド内の光誘起電荷の分離機構として、ダイレクト型 Z スキームの形成について議論した。 第 3 章では、高分子半導体にも分類される窒素リッチな窒化炭素 (C_3N_5) を合成し、既存のグラファイト状窒化炭素 (g-C_3N_4) との表面構造、内部構造、ならびにエネルギーバンドの相違点を実験的に示した。また、g-C_3N_4 と比較して、C_3N_5 において可視光照射下での光触媒 H_2 生成と CO_2 還元がより効率的に進行することを示した。それらの結果を基に、C_3N_5 の特徴を議論するとともに、窒化炭素を中心とした、窒素含有金属フリー光触媒材料の開発指針を提示した。 第 4 章では、結論として、本論文の要約と今後の展望を記した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6204 号	氏 名	伊藤 皇聖
論文審査担当者： 主査 慶應義塾大学教授 博士（工学） 野田 啓			
副査 慶應義塾大学教授 博士（工学） 斎木 敏治			
慶應義塾大学教授 Ph. D. フォンス, ポール			
慶應義塾大学教授 博士（工学） 緒明 佑哉			
学士（工学）、修士（工学）伊藤 皇聖君提出の学位請求論文は「半導体ナノ粒子の最適化による可視光援用水素生成と二酸化炭素還元」と題し、4 章から構成されている。 光触媒は太陽光のみをエネルギー源として、水素（H_2）生成や二酸化炭素（CO_2）還元に応用できる優れたワイドギャップ半導体材料である。近年の研究では、太陽光に含まれる紫外光を用いることで 100%に近い量子収率で H_2 生成や CO_2 還元を行えることが報告されている。一方、太陽光に含まれる紫外光はわずか 5%であり、50%以上を占める可視光の有効利用が求められている。可視光を有効利用する方法として、2 つ以上の光触媒を組み合わせることによるダイレクト型 Z スキームの形成が注目を集めているが、試料の合成過程の複雑化と高コスト化が問題視されている。また、光触媒材料の多くは金属酸化物から構成されており、将来的な鉱物資源の枯渇化の影響を受けることが懸念される。その背景の下、近年、窒化炭素などに代表される、合成が簡便でかつ可視光応答が可能な金属フリー光触媒材料が新たに注目を集めているが、反応効率と耐久性が低いため実用化には程遠く、それらの改善が強く求められている。 これらの問題解決に向けて、本研究では、半導体ナノ粒子の最適化を中心とした材料開発による、安価なダイレクト型 Z スキームの誘発方法と、高効率な光触媒特性を示す金属フリー光触媒材料の開発を目的とした研究を遂行している。 第 1 章では、研究の背景と目的を述べ、従来の研究を概説している。 第 2 章では、酸化タングステン（WO_3）の水熱合成途上に構造規定剤として知られるシュウ酸を滴下することで、異なるバンドギャップを持つ WO_3 の異種結晶相（六方晶と三斜晶）を単一ナノロッド内に位置選択的に形成している。その後、光析出法による白金（Pt）担持 WO_3 を作製し、その試料における光触媒メチレンブルー分解やアンモニアボランを用いた可視光援用 H_2 生成を実証している。それらの結果を基に、WO_3 単一ナノロッド内での光誘起電荷の分離機構として、ダイレクト型 Z スキームの形成について議論している。 第 3 章では、高分子半導体にも分類される窒素リッチな窒化炭素（C_3N_5）を合成し、既存のグラファイト状窒化炭素（g-C_3N_4）との表面構造、内部構造、ならびにエネルギーバンドの相違点を実験的に示している。また、g-C_3N_4 と比較して、C_3N_5 において可視光照射下での光触媒 H_2 生成と CO_2 還元がより効率的に進行することを示している。それらの結果を基に、C_3N_5 の特徴を議論するとともに、窒化炭素を中心とした、窒素含有金属フリー光触媒材料の開発指針を提示している。 第 4 章では、各章で得られた成果をまとめ、本論文全体の結論を述べている。 以上要するに、本論文では半導体ナノ粒子の最適化による可視光援用 H_2 生成と CO_2 還元の性能向上を実験的に示し、その考察を基盤として、半導体光触媒開発への新たなアプローチ方法を提示しており、半導体材料分野において工学上、工業上寄与するところが少なくない。 よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6205 号	氏 名	羽山 元晶
主論文題名：			
表面改質により鋼に生起した圧縮残留応力の 疲労過程における変化とそのメカニズム			
輸送機器や構造物の安全性確保のためには、材料の疲労破壊の防止は極めて重要な課題である。疲労破壊は材料表面からのき裂発生・進展が原因となるため、表面改質による材料表面の強化が有効である。表面改質により生起した圧縮残留応力は、疲労き裂の進展を抑制し材料の疲労特性を向上させるが、疲労過程において解放しその疲労特性改善効果が減少してしまうことがある。しかし疲労過程における圧縮残留応力解放の挙動やメカニズム、影響因子などは明確にはなっていない。そこで本研究では、疲労過程における圧縮残留応力の解放挙動を詳細に調べ、そのメカニズムや影響因子を明らかにし、疲労過程において解放しにくい圧縮残留応力の指針を示すことを目的とした。 第 1 章では、序論として本研究の背景や目的、従来の研究について概説した。 第 2 章では、疲労負荷ひとつのサイクル中における残留応力の変化挙動を調べる方法として、荷重を負荷したままの状態試験片の表面の応力を X 線回折により測定する「X 線応力その場測定」を構築し、その測定の妥当性について示した。 第 3 章では、第 2 章で構築した X 線応力その場測定を用いてピーニングにより生起した圧縮残留応力の解放挙動を調べ、圧縮残留応力の解放が疲労負荷 1 サイクル目の圧縮負荷過程において顕著に発生すること、この解放挙動はひとつのマスター曲線により表現可能であることなどを明らかにした。また負荷応力振幅の大きさが残留応力の解放量に影響を及ぼす重要な因子であることを示した。 第 4 章では、硬さの異なる試験片に対して圧縮残留応力を付与し、その解放挙動を X 線応力その場測定により詳細に調べた。提案したマスター曲線を用いて、圧縮残留応力の解放しやすさを定量的に評価するため「解放閾応力」の考え方を提案し、これを用いて硬さと圧縮残留応力の解放挙動の関係を評価した。その結果、硬さと疲労過程における残留応力の解放しやすさには比例関係があることを明らかとなった。また解放閾応力から負荷応力を引くことにより、解放後の残留応力を推定可能であることを示した。 第 5 章では、ピーニングにより形成された表面改質層の機械的特性が、圧縮残留応力の解放挙動に及ぼす影響について検討し、硬さが上昇した領域が圧縮残留応力を解放しにくくする上で重要であること、解放しにくい圧縮残留応力を生起させるには、硬さが上昇した領域にのみ圧縮残留応力を付与することが重要であることを明らかにした。 第 6 章では、浸炭焼入れにより生じる残留 γ の変態挙動と圧縮残留応力の変化挙動の関係について検討を行った。その結果疲労過程における残留 γ の変態挙動は引張負荷と圧縮負荷によって異なること、引張負荷過程における残留 γ の変態は、変態が開始する応力の閾値があることなどを明らかにした。また疲労過程において残留 γ が変態することにより圧縮残留応力が増加することを明らかにした。 第 7 章で、各章で得られた成果を総括し、本研究の結論および今後の展望を述べた。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6205 号	氏 名	羽山 元晶
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士 小茂鳥 潤
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士 鈴木 哲也
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 閻 紀旺
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 大宮 正毅
		静岡大学大学院准教授	博士（工学） 菊池 将一

学士（工学）、修士（工学）の羽山元晶君提出の学位請求論文は「表面改質により鋼に生起した圧縮残留応力の疲労過程における変化とそのメカニズム」と題し7章から構成されている。輸送機器や構造物の安全性確保には、それらを構成する部材の疲労破壊の防止が極めて重要である。疲労破壊は通常、材料表面から発生したき裂の進展が原因となるため、表面改質による材料強化が有効な防止策となる。表面改質により生起した圧縮残留応力は、疲労き裂の進展を抑制し疲労特性を向上させるが、使用中に解放しその効果が失われることがあり、解決すべき問題点とされている。

本論文では、疲労過程における圧縮残留応力の解放挙動を詳細に調べ、そのメカニズムや影響因子を明らかにし、疲労過程において解放しにくい圧縮残留応力の指針を示すことを目的とした研究を行っている。

第1章では、研究背景とこれまでの関連研究を概説し、目的を明確にしている。

第2章では、疲労負荷のひとつのサイクル中の残留応力の変化挙動を調べる方法として、荷重を負荷したままの状態を試験片表面の応力を X 線回折により測定する「X 線応力その場測定」を構築し、その測定法の妥当性について示している。

第3章では、第2章で構築した手法を用いてピーニングにより生起した圧縮残留応力の解放挙動を調べ、その解放は疲労負荷 1 サイクル目の圧縮負荷過程において顕著であること、解放挙動はひとつのマスター曲線により表現できること、さらに負荷応力の大きさが残留応力の解放量に影響を及ぼす重要な因子であることを示している。

第4章では、硬さの異なる試験片に圧縮残留応力を付与し、その解放挙動を X 線応力その場測定により調べ、圧縮残留応力の安定性を定量的に評価するため「解放閾応力」の考え方を提案している。この指標を用いて硬さと圧縮残留応力の解放挙動の関係を評価した結果、疲労過程における残留応力の解放のしやすさは素材の硬さに大きく関係することを実験結果に基づき明確にしている。

第5章では、ピーニングにより形成された表面改質層の機械的特性が、圧縮残留応力の安定性に及ぼす影響について検討している。その結果、安定な圧縮残留応力を生起させるには、硬さが上昇した領域にのみ圧縮残留応力を付与することが有効であることを明らかにしている。

第6章では、浸炭焼入れ時に発生する残留 γ のマルテンサイト変態挙動と圧縮残留応力の変化挙動の関係について検討を行っている。実験の結果から、疲労負荷により残留 γ が変態すること、それにより圧縮残留応力が増加することを明らかにしている。

第7章では、得られた成果を総括し、本研究の結論および今後の展望を述べている。

以上要するに、本論文は鋼材に生起した残留応力の疲労負荷過程における振る舞いを実験的に明らかにしたものである。新しい表面改質法開発に資する多くの有益な知見を得ており、材料工学分野において、工学上、工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

内容の要旨

報告番号	甲 第 6206 号	氏 名	山室 悠香
主論文題名： Micro/nanostructuring of Yttria-stabilized Zirconia Surface by Femtosecond Pulsed Laser Irradiation (フェムト秒パルスレーザ照射によるイットリア安定化ジルコニア表面の マイクロ・ナノ構造加工)			
イットリア安定化ジルコニアは高強度、高靱性などの材料特性に優れたファインセラミックスで、歯科材料や機械部品など様々な分野で利用されている。表面にマイクロ・ナノスケールの微細構造を付与することで、既存製品の高機能化や新たな機能性の向上が可能となる。しかし、ジルコニアは難加工材であるため従来手法による表面微細加工が困難である。また、加工プロセス中の応力および熱の負荷による相変態の発生が問題となる。そこで本研究では、超短パルスレーザ照射による表面微細加工を行い、マイクロ V 溝の加工特性調査や新たな加工原理に基づくナノ構造の加工手法の検討を行った。さらに、従来の研究では詳細に調査されなかったレーザ誘起相変態現象の定量的評価を行い、表面機能化へ向けた表面加工技術の提案を行った。 第 1 章では、本研究の背景、目的および概要について述べた。 第 2 章では、ジルコニアセラミックスの材料特性およびレーザプロセッシング技術に関する従来研究について概説した。また、微細構造による表面機能化について述べた。 第 3 章では、イットリア安定化ジルコニアに対してフェムト秒パルスレーザ照射によるマイクロ V 溝加工を行った。加工条件が溝形状およびテーパ角の変化に与える影響を調査した。また、加工面の結晶構造を定量的に解析することで、レーザの繰り返し照射によって正方晶から単斜晶への相変態を抑制できることを明らかにした。 第 4 章では、レーザ照射によるジルコニア表面へのナノ構造形成を行った。レーザ光を加工閾値付近の限定的な条件で照射することにより、結晶粒のレンズ効果を利用し、サンプル表面の結晶粒子内部にナノスケールの空孔構造を形成することに成功した。また、空孔形状やジルコニアの表面性状の観察結果をもとに、レーザ光と表層粒子の相互作用からその形成メカニズムを考察した。 第 5 章では、異なるイットリアドーパント濃度を有するジルコニアへレーザ照射を行い、材料特性の変化がジルコニアの微細加工特性に与える影響について調査した。材料内のドーパントの偏析や結晶粒径、結晶構造の違いから、ナノ構造加工結果を比較し、その加工メカニズムの違いを考察した。 第 6 章では表面構造の応用として、レーザ照射による表面ナノ空孔内への金属ナノ粒子の担持を試みた。限定的な範囲でレーザ照射条件を変化させ、空孔内担持量の変化を調査した。また、この手法を用いて銀粒子担持マイクロ・ナノ構造表面を作製し、その抗菌性を評価した。 第 7 章では、本研究の主な結論および今後の課題をまとめた。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6206 号	氏 名	山室 悠香
論文審査担当者： 主査 慶應義塾大学教授 博士（工学） 閻 紀旺			
副査 慶應義塾大学教授 工学博士 小茂島 潤			
慶應義塾大学教授 博士（工学） 大宮 正毅			
慶應義塾大学教授 博士（工学） 柿沼 康弘			
学士（工学）、修士（工学）山室悠香君提出の学位請求論文は「Micro/nanostructuring of Yttria-stabilized Zirconia Surface by Femtosecond Pulsed Laser Irradiation（フェムト秒パルスレーザ照射によるイットリア安定化ジルコニア表面のマイクロ・ナノ構造加工）」と題し、7章から構成されている。 イットリア安定化ジルコニアは強度、靱性などの材料特性に優れたファインセラミックスで、歯科材料や機械部品などとして様々な分野で利用されている。表面にマイクロ・ナノスケールの微細構造を付与することで既存製品の高機能化が期待されているが、機械加工における応力および熱の負荷による材料相変態の発生が問題となっている。そこで本研究では、超短パルスレーザ照射による表面微細加工を行い、非熱加工によるマイクロ溝形成や新たな加工原理に基づくナノ空孔構造の形成、さらにナノ空孔内への金属ナノ粒子の担持などについて検討を行っている。 第1章では、本研究の背景、目的および概要を述べている。 第2章では、ジルコニアセラミックスの材料特性およびレーザプロセッシング技術に関する従来研究について概説し、微細構造による表面機能化について述べている。 第3章では、イットリア安定化ジルコニアに対してフェムト秒パルスレーザ照射を行い、マイクロ溝形成における照射条件が溝形状およびテーパ角の変化に与える影響を調査している。また、加工面の結晶構造変化を定量的に解析することで、レーザの繰り返し照射によって正方晶から単斜晶への相変態を抑制できることを明らかにしている。 第4章では、レーザ照射によるジルコニア表面へのナノ空孔構造の形成を提案している。レーザ光を加工閾値付近の条件で照射することにより、結晶粒のレンズ効果を利用し、表面層の結晶粒子の内部にナノスケールの空孔構造を形成することに成功している。また、空孔形状やジルコニアの表面性状の観察結果をもとに、レーザ光と表面層粒子の相互作用からその形成メカニズムを解明している。 第5章では、異なるイットリアドーパント濃度を有するジルコニアに対してレーザ照射を行い、材料特性の変化がジルコニアの微細加工特性に与える影響について調査している。材料内のドーパントの偏析や結晶粒径、結晶構造の違いからナノ構造加工結果を比較し、その加工メカニズムの違いを見出している。 第6章では、レーザ照射によって形成された表面ナノ空孔内への金属ナノ粒子の担持を試みている。銀イオン含有溶液を試料表面へ塗布し、レーザ照射条件を変化させて照射を行った結果、銀ナノ粒子がナノ空孔内に担持可能であることを確認している。さらに、銀ナノ粒子担持表面の抗菌性についても評価を行っている。 第7章では、本研究の主な結論および今後の課題をまとめている。 以上要するに、本論文はイットリア安定化ジルコニアに対するフェムト秒パルスレーザ照射のメカニズムを解明するとともに、マイクロ・ナノスケールの表面構造加工特性を明らかにしたものであり、加工学および表面工学の分野において工学上、工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6207 号	氏 名	竹田 和行
主論文題名：			
時間的側面と空間的側面からみた現代日本の建築家の設計手法に関する研究 —コモンスペースと住宅のリノベーションを対象として—			
建築には、歴史や記憶、経年変化のような時間の前後関係により認識される通時的な空間と、部屋の大きさや明るさのような、時間の同一点において併存的に認識される共時的な空間がある。本論文では、これを「通時空間」、「共時空間」と定義する。時間的側面には「通時態（時間の前後関係）」と「共時態（時間の同一点）」の二つがあり、それが建築の空間的側面と組み合わせさせた時に、通時空間と共時空間が導出される。建築家の設計論では、どちらか一方を強調する傾向がしばしばみられる。一部のモダニズムでは、通時空間が否定され、共時空間が重視された。一方で、1960年代以降では通時空間を再評価する設計論がみられるようになった。 本論文の目的は、建築の時間的側面と空間的側面から導出される通時空間と共時空間の双方に関する論議を展開し、現代日本の建築家の設計手法の一端を明らかにすることである。建築家の設計論において、共時空間に偏重するモダニズムへの批判がある一方で、地域主義などの通時空間に偏重することが懐古主義として批判されることもある。そこで本論文では、通時空間と共時空間の双方から議論し、双方の見地を持つことに意義があると考え、双方を対時的に捉えるのではなく、相乗効果に着目し、この二項対立を克服することを目指す。 研究対象は、日本の建築専門誌への掲載が2000年代以降に顕著にみられる事例のひとつである「コモンスペース（誰でも気軽に立ち寄れる地域コミュニティの交流空間）」と「住宅のリノベーション」とした。これらは、既存の地域コミュニティや歴史、建築物との長期的な関係を重視する設計手法がみられ、通時空間と共時空間の双方が思考されている。バブル崩壊以降、特に東日本大震災後に事例の増加が顕著にみられ、日本の現代建築思潮のひとつとして注目されているが、建築設計論における体系的な論考が十分ではない。 本論文は、以下の5つの章により構成されている。 第1章の序論では、研究の背景と目的、既往研究と意義、研究方法、研究の構成および概要について述べた。分析方法は、設計に関する解説文を対象とした質的な分析と、写真や図面による実体の分析とした。 第2章のコモンスペースの分析では、「地域への繋がり」に着目した。通時空間と共時空間の双方に共通してみられた特徴として、事後的な変化や出来事に呼応する傾向が挙げられる。利用者の自発的な活動により運営をしながらプログラムが変化すること、庇や縁側、ファサードの開放により、通りすがりの人を招き入れるなど、外部と繋がること、フレキシブルな空間により多様な活動が生まれることなど、竣工後の事後的な変化や出来事を受け入れる設計が多かった。 第3章の住宅のリノベーションの分析では、「素材の表現」に着目した。通時空間と共時空間の双方に共通してみられた特徴として、建築の無形を意識する傾向が挙げられる。経年変化のような素材そのものよりも、歴史・記憶を踏襲すること、透過材や白塗装に			

より、明るさ・広がりを感じを生み出すことなど、素材の表現により、住人が体験する建築の無形に対する設計が多かった。

第4章では、第2章と第3章の結果を統合し、既存との関係を重視する建築家の設計手法として総括した。そのうえで、序論で述べた各時代の代表的な設計論と比較することで、共通性や差異を整理し、通時空間と共時空間の双方から考察した。

第5章では、第2章から第4章までの各章で得られた結果をまとめた。本論文で分析した事例の通時空間と共時空間の双方を統合的に捉え、相乗効果を検討し、それに伴う課題と展望を、本論文の結論として総括した。

審査の要旨

報告番号	甲 第 6207 号	氏 名	竹田 和行
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士（工学） アルマザン カバジエーロ, ホルハ
	副査	慶應義塾大学専任講師	博士（工学） 佐野 哲史
		東京工業大学教授	博士（工学） 奥山 信一
		東京理科大学教授	博士（美術史学） 山名 善之
修士(工学)、竹田和行君提出の学位請求論文は「時間的側面と空間的側面からみた現代日本の建築家の設計手法に関する研究－コモンスペースと住宅のリノベーションを対象として－」と題し、5章からなっている。 建築には、部屋の大きさや明るさのような空間的側面と、歴史や記憶、経年変化のような時間的側面がある。建築家の設計論では、どちらか一方の側面を強調する傾向がしばしばみられる。一部のモダニズムでは、時間的側面が否定され、空間的側面が重視された。一方で、1960年代以降では時間的側面を再評価する設計論がみられるようになった。 本論文は、時間と空間の双方の側面に関する論議を展開し、現代日本の建築家の設計手法の一端を明らかにすることを目的とする。建築家の設計論において、空間的側面に偏重するモダニズムへの批判がある一方で、地域主義などの時間的側面に偏重することが懐古主義として批判されることもある。そこで本論文では、時間と空間の双方の側面から議論し、双方の見地を持つことに意義があると考え、時間的側面と空間的側面を対峙的に捉えるのではなく、双方の相乗効果に着目し、この二項対立を克服することを目指す。 研究対象は、日本の建築専門誌への掲載が近年顕著にみられる事例のひとつである「コモンスペース（誰でも気軽に立ち寄れる地域の交流空間）」と「住宅のリノベーション」とした。これらは、既存の地域コミュニティや歴史、建築物との長期的な関係を重視する設計手法がみられ、時間と空間の双方が思考されている。バブル崩壊以降、特に東日本大震災後に事例の増加が顕著にみられ、日本の現代建築思潮のひとつとして注目されているが、建築設計論における体系的な論考が十分ではない。 第1章の序論では、研究の背景と目的、既往研究と意義、研究方法、研究の構成について述べた。分析方法は、設計に関する解説文を対象とした分析と、写真や図面による実体の分析とした。 第2章のコモンスペースの分析では、「地域への繋がり」に着目した。時間と空間の双方の側面に共通してみられた特徴として、事後的な変化や出来事に呼応する傾向が挙げられる。利用者の自発的な活動により運営をしながらプログラムが変化すること、庇や縁側、ファサードの開放により、通りすがりの人を招き入れるなど、外部と繋がること、フレキシブルな空間により多様な活動が生まれることなど、竣工後の事後的な変化や出来事を受け入れる設計が多かった。 第3章の住宅のリノベーションの分析では、「素材の表現」に着目した。時間と空間の双方の側面に共通してみられた特徴として、建築の無形を意識する傾向が挙げられる。経年変化のような素材そのものよりも、歴史・記憶を踏襲すること、透過材や白塗装により、明るさ・広がり感覚を生み出すことなど、素材の表現により、住人が体験する建築の無形に対する設計が多かった。 第4章では、第2章と第3章の結果を統合し、既存との関係を重視する建築家の設計手法として総括した。そのうえで、序論で述べた各時代の代表的な設計論と比較することで、共通性や差異を整理し、時間と空間の双方の側面から考察した。 第5章では、これまでの各章で得られた結果をまとめた。分析した事例の時間と空間の双方の側面を統合的に捉え、相乗効果を検討し、それに伴う課題と展望を、本論文の結論として総括した。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6208 号	氏 名	石黒 健太
主 論 文 題 名 :			
Enhancing Performance and Security of Virtual CPUs in Cloud Environments (クラウド環境における CPU 仮想化の性能およびセキュリティ向上を実現する研究)			
ハードウェア仮想化はクラウド環境で広く活用されている。ハードウェア仮想化によって可能になるマルチテナントでの利用やハードウェア資源のオーバサブスクライブは多くのパブリッククラウド環境において、データセンタの効率を最大化するために活用されている。ハイパーバイザは単一の物理サーバ上で仮想マシンを多重化することでこれら 2 つの機能を実現する重要なソフトウェアである。今日ハイパーバイザへの研究は広く行われているが、汎用ハイパーバイザは依然として CPU 仮想化において、非効率性とセキュリティの問題に悩まされている。汎用ハイパーバイザそのものの複雑さや大規模なコードベースがそれら問題を解明することや、従来の研究結果を適用することを難しくしている。 本論文では、汎用ハイパーバイザの設計と実装を再検討することで、CPU 仮想化における問題点を明らかにし、わずかな修正で明らかにした問題に対処する。再検討により、以下の 2 つの問題を明らかにする。第一にアドホックな最適化による仮想 CPU スケジューリングでは仮想 CPU の過剰なスピンを緩和するには不十分であることで明らかにする。第二に命令エミュレーションにおいて、コンテキストを考慮しないことが攻撃面の増大に繋がっていることを明らかにする。 本論文の貢献は主に二つからなる。第一に、クラウド環境の性能向上に貢献するために、KVM 上で動作する仮想マシンが依然として仮想 CPU の過剰なスピンによって性能が低下していることを示す。仮想 CPU の過剰なスピンを頻繁に引き起こす三個の問題がセマンティックギャップによるものであることを明らかにし、わずかな修正による緩和策を提案する。第二に、クラウド環境のセキュリティ向上のために、ハイパーバイザの命令エミュレータが大きな攻撃面となっていることを示す。本論文で提案・実装する FWinst はエミュレーションコンテキストを考慮することで命令エミュレーションを最低限に減らし攻撃面を削減する。これら二つの貢献によってクラウド環境の性能・セキュリティ向上を実現する。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6208 号	氏 名	石黒 健太
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 河野 健二
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 近藤 正章
		Hofstra University Assistant Professor Ph.D.	Jianchen Shan
		Université de Neuchâtel, Maître Assistant Ph.D	Baptiste Lepers
学士（工学）、修士（工学）石黒健太君の学位請求論文は、「Enhancing Performance and Security of Virtual CPUs in Cloud Environments (クラウド環境における CPU 仮想化の性能およびセキュリティ向上を実現する研究)」と題し、全 4 章で構成されている。 現在のクラウド環境において重要な役割を果たすハイパーバイザはハードウェア資源の仮想化によって、クラウド環境では欠かせない性質である高い資源利用効率とマルチテナント性を提供している。ハイパーバイザが仮想化するハードウェア資源の中でも、CPU 仮想化は特に性能及びセキュリティ面で大きな影響を与える。その重要性から、過去に様々な研究が行われてきたにもかかわらず、広く普及しているオープンソースの汎用ハイパーバイザである KVM は、依然として CPU 仮想化における資源利用効率の低下とセキュリティ上の懸念に悩まされている。これは、KVM を含む現代の汎用ハイパーバイザが複雑でありかつ、そのメンテナンス性の維持のためにオペレーティングシステムと統合されていることで既存研究の成果を適用することが難しくなっていることによる。本論文では、汎用ハイパーバイザである KVM に実在する性能及びセキュリティに関する課題を明らかにし、最小限の変更で問題点の緩和を行うことを目的としている。実際に、本論文は仮想 CPU のスケジューリングにおける性能劣化の問題や、命令エミュレーションにおけるマルチテナント性を脅かすセキュリティに関する問題点を指摘し、少ない修正でそれらを改善している。本論文が明らかにした問題点とその緩和策は今後の汎用ハイパーバイザの設計や実装において、有用な知見を与える。実際に、本論文で提案している緩和策の一部は、広く利用されている汎用ハイパーバイザにも取り込まれ、活用されている。 第 1 章では、現在のクラウド環境におけるハイパーバイザ及び CPU 仮想化の重要性、そして現状の汎用ハイパーバイザの抱える問題点を論じ、本論文の目的と論文の構成について述べている。 第 2 章では、仮想 CPU の集約を行ったときに必要となる仮想 CPU スケジューリングについて述べている。まず、ハードウェア資源の効率的な利用のために欠かせない仮想 CPU の集約によって生じる問題とその対応策を体系的に分類・整理し、各手法について議論している。体系的な議論を行ったことから、汎用ハイパーバイザにおいて行われてきた対応策がアドホックであり、それが根本的な原因となって期待した性能が到達できていないことを明らかにしている。この体系的な分析から提案された緩和策は、少量のソースコードの変更で汎用ハイパーバイザに適用可能であり（本論文の事例では 89 行）、実験において最大 2.6 倍の性能向上を達成している。提案手法の一部は実用的に広く利用されている汎用ハイパーバイザに組み込まれ、活用されている。 第 3 章では、ハイパーバイザが CPU を仮想化するために必要となる命令エミュレーションにおけるセキュリティの問題を述べている。命令エミュレーションにおいて、ハイパーバイザがコンテキストを考慮せずにエミュレーションを行うことが攻撃面を拡大させていることを指摘し、その緩和策を提案し、提案した緩和策が少量の変更でハイパーバイザに適用可能であることを示している（本論文の事例では 279 行）。さらに、提案手法が無視できる性能オーバーヘッドで過去に報告された命令エミュレーションに対する攻撃を効果的に防ぐことが示されている。 第 4 章では、本論文で得られた成果をまとめている。また、第 2 章と第 3 章で得られた結果を基に、今後の方向性について議論している。 以上、本論文はクラウド環境における仮想 CPU の性能とセキュリティの向上に関する重要な成果であり、その貢献は工学上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6209 号	氏 名	岡田 清志郎
主論文題名：			
分子シミュレーションに特化した効率的な乱数生成手法の提案と 深層学習を用いた乱数生成の有効性の検討			
本研究は分子シミュレーションに利用する効率的な乱数生成手法の開発に焦点を当てたものである。日々洗練されていく数値計算手法と計算機性能の向上の交差点において、分子シミュレーション技術の進化が目覚ましい。乱数を利用した粗視化手法によって、メソスケールにおける現象の取り扱いがより容易になり、また、統計力学に基づく確率分布をサンプリングすることにより、効率的に対象とする系の統計量を得ることが可能となった。乱数は効率的な数値計算手法を確立する上で重要な役割を果たしている。計算機における乱数生成手法は今日まで多くの研究がなされてきたが、乱数の性質と計算コストのバランスを改良する余地は残されており、計算コストの観点から乱数生成手法そのものが問題視されることも少なくない。そこで本研究では、各数値計算手法に特化した乱数生成手法を提案し、従来以上の計算効率を達成する乱数生成手法を提案した。まずメソスケールを取り扱う粗視化手法の代表的な例として、散逸粒子動力学(DPD)法に着目した。DPD 法を用いた大規模並列計算をする際には、暗号学的ハッシュ関数を用いた乱数生成手法が利用されていたが、計算コストが大きいことが課題であった。そこで、乱数シード値に、より複雑な bit 列を持つ数値を利用することで、乱数生成に必要なハッシュ関数の軽量化を達成した。更に、DPD 計算の過程で常に生成される数値の乱雑性を利用することで、従来のハッシュ関数の約 62 倍の速度で乱数を生成することに成功した。生成される乱数が一般的に利用される NIST 乱数検定に合格することを示した後、この手法を利用することによる計算精度の変化を複数の観点から評価し、精度に影響なく計算が実行できることを示した。また、この「数値計算過程で副次的に生成される数値の乱雑性」を利用することによる乱数生成手法をモンテカルロ(MC)法にも適用した。乱数を多用する MC 法において、乱数生成のためだけの計算を都度実行するのではなく、MC 計算そのものの過程で生じる数値の乱雑性を利用し、乱数生成することで、極めて少ない演算で良質な乱数を生成できることを示した。このように計算過程で生じる乱雑性を利用し、各計算手法に特化した乱数生成手法を開発することで、従来以上の計算効率を実現できることを示した。一方で、様々な計算手法に特化した乱数生成手法を開発することは容易ではなく、専門家の高度な知見に基づく開発が必須である。そこで、本研究では深層学習を利用したデータ駆動型の乱数生成手法を実現することで、将来的な新規乱数生成アルゴリズム開発に誰もが取り組み、個別の目的に特化したアルゴリズムを開発できるようになることを目指した。ここでは、特に敵対的生成ネットワークを利用し、乱数性質が低い数値列を、NIST 乱数検定の基準に合格する数値列に変換するモデルの開発に取り組み、深層学習を用いた乱数生成手法の開発に初めて成功した。また同時に、学習において、無限の学習データを取り扱う際における過学習の可能性に言及し、深層学習の利用に貢献する知見を提供した。本研究で示した知見は、計算機シミュレーションにおける効率的な乱数生成手法開発から、将来の深層学習を利用したデータ駆動型の新規乱数生成手法の開発に貢献するものである。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6209 号	氏 名	岡田 清志郎
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 泰岡 顕治
	副査	慶應義塾大学准教授	Ph. D. 安藤 景太
		慶應義塾大学准教授	Ph. D. 彭 林玉
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 荒井 規允
学士（工学）、修士（工学）岡田清志郎 君の学位請求論文は「分子シミュレーションに特化した効率的な乱数生成手法の提案と深層学習を用いた乱数生成の有効性の検討」と題し、10章から構成されている。 近年の計算機性能の向上とそれに合わせた数値計算手法の発展に伴い、分子シミュレーション分野においても粗視化手法を組み合わせた並列化計算が主流となっている。粗視化手法による分子シミュレーションは、粗視化した際に失われる現象を補うために乱数を利用した手法が用いられ、並列化における高速乱数手法が求められている。また、統計力学に基づく確率分布をサンプリングすることにより、効率的に対象とする系の統計量を得る分子シミュレーションが行われており、効率的な乱数発生手法の確立が重要となる。さらに、乱数の性質と計算コストのバランスを改良することは重要であり、計算コストの観点から乱数生成手法そのものの開発も求められている。本論文では、分子シミュレーションに着目し、各数値計算手法に特化した乱数生成手法を提案し、従来以上の計算効率を達成する乱数生成手法の提案を行っている。 第1章では本論文の背景および目的、構成を、第2章では分子シミュレーションにおける乱数生成について、第3章では分子シミュレーションと乱数生成法に関する理論について説明している。第4章から第9章に結果を示している。 第4章では、散逸粒子動力学法(DPD 法)へ与える暗号学的ハッシュ関数型乱数生成手法による影響の調査と改善を行っている。DPD 法を用いた大規模並列計算をする際には、暗号学的ハッシュ関数を用いた乱数生成手法が近年利用されてきたが、計算コストが大きいことが課題であった。本章では、乱数シード値により複雑な bit 列を持つ数値を利用することで、乱数生成に必要なハッシュ関数の軽量化を達成した。第5章では、DPD 法のための新規乱数生成手法の開発を行っている。DPD 計算の過程で常に生成される数値の乱雑性を利用することで、従来のハッシュ関数の約 62 倍の速度で乱数を生成することに成功している。生成された乱数は乱数検定に一般的に用いられる NIST 乱数検定に合格することを示した後、この手法を利用することによる計算精度の変化を複数の観点から評価し、精度に影響なく計算が実行できることを示している。第6章では、モンテカルロ(MC)分子シミュレーションのための新規乱数生成手法の開発を行っている。第5章で開発した数値計算過程で副次的に生成される数値の乱雑性を利用することによる乱数生成手法を、MC 法にも適用している。乱数を多用する MC 法において、MC 計算そのものの過程で生じる数値の乱雑性を利用し、乱数生成することで、極めて少ない演算で良質な乱数を生成できることを示した。 第7章では、深層モデルを活用した乱数生成手法について、第8章では深層学習に関する理論について説明している。第9章では、深層生成モデルを利用した乱数生成手法の開発を行っている。様々な計算手法に特化した乱数生成手法を開発することは容易ではなく、専門家の高度な知見に基づく開発が必須である。そこで、本章では深層学習を利用したデータ駆動型の乱数生成手法を実現することで、将来的な新規乱数生成アルゴリズム開発の可能性を示している。 最後に第10章で研究全体に関する結論を述べている。 以上要するに、本論文の著者は、分子シミュレーションに特化した効率的な乱数生成手法と深層学習を用いた乱数生成の有効性に関して研究を行った。その成果は、分子シミュレーションにおける乱数生成手法を提案するだけでなく、乱数を用いたシミュレーション研究に寄与するものである。また、深層学習を用いた乱数生成については、深層学習を利用したデータ駆動型の新規乱数生成手法の開発に貢献するものであり、工学分野への応用が期待できる。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6210 号	氏 名	亀井 愛佳
主論文題名： Study on Energy Minimization of Intermittent Operation Applications using Non-Volatile Power Gating (不揮発性パワーゲーティングによる間欠動作アプリケーションの エネルギー最小化に関する研究)			
コンピューティングの高速化に伴い、エッジコンピューティング向けの低消費電力 LSI の進化が求められている。バッテリー駆動のエッジデバイスでは、消費電力が充電頻度やデバイス寿命、メンテナンスコストに直結することから、低消費電力 LSI が極めて重要である。エネルギー効率の高いチップを設計するためには、対象となるアプリケーションの特性に最適な技術を選択することが不可欠であり、そのためには設計段階においてエネルギー消費量を見積もる必要がある。エッジコンピューティングによく見られる、アクティブ状態とアイドル状態を周期的に繰り返す間欠動作アプリケーションでは、非アクティブ時のリーク電力を削減するためにパワーゲーティング (power gating: PG) が効果的で、さらに、データ保持が必要な場合には、不揮発性 (nonvolatile: NV) メモリを使用した不揮発性パワーゲーティング (NVPG) が有効である。 本研究は、NVPG シナリオにおける間欠動作アプリケーションのエネルギー消費を推定するために、40nm MTJ/CMOS ハイブリッドプロセスで製造されたチップに実装された、新しい不揮発性メモリ技術の中で最も有望なスピン注入トルク磁気トンネル接合 (STT-MTJ) を用いた不揮発性フリップフロップ (NVFF) について、実測データに基づくエネルギーモデルを構築することを目的としている。STT-MTJ は、MTJ のスイッチング特性のばらつきにより MTJ の状態を切り替えるためエネルギー (ストアエネルギー) が増大するという課題を抱えている。 提案するエネルギーモデルは、実装チップの観測結果に基づき、MTJ のばらつき特性を正規分布で仮定することにより、エネルギー推定において十分に実用的な精度を実現する。さらに、このエネルギーモデルは、従来の揮発性 FF、高 V_{th} MOS トランジスタを用いたリテンション FF、その他の NVFF などの代替技術のエネルギーモデルを構築に応用し、これらの様々な FF 技術の定量的な比較を可能にする。 さらに本研究では、定義したエネルギーモデルを用い、各種 FF のエネルギー削減効果やオーバーヘッドを考慮した損益分岐解析を行い、エネルギー最小化に最適な技術を選択するワークフローを提案する。これにより、対象とする間欠動作アプリケーションに応じて、最適な NVFF とその最適な制御方法を選択する際の意思決定に定量的な根拠を提供する。本研究は、設計者が NVPG によるエネルギー削減をより積極的に選択することを促進するものである。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6210 号	氏 名	亀井 愛佳
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士 天野 英晴
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 山崎 信行
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 中野 誠彦
		芝浦工業大学教授	博士（工学） 宇佐美 公良
修士（工学）、亀井愛佳君の学位請求論文は、「Study on Energy Minimization of Intermittent Operation Applications using Non-Volatile Power Gating（不揮発性パワーゲーティングによる間欠動作アプリケーションのエネルギー最小化に関する研究）」と題し7章から成る。 センサーやGPSを装備するIoT(Internet of Things)機器は、一定の休止時間をはさんで間欠的に動作するものが多い。このようなシステムは休止時間中に漏れ電流によりバッテリーを消費することが問題になる。休止中の漏れ電流を防ぐためには、不揮発性メモリに消失してはならないデータを記憶してからパワーゲーティングを行い、電源を内部的に遮断する手法NVPG（Non-Volatile Power Gating）が有効である。本論文では、磁気トンネル接合（magnetic tunnel junction: MTJ）を用いて不揮発化したフリップフロップ（NVFF）を用いてNVPGの実現を目指す。まず、実チップに基づき各種NVFFの電力モデルを構築し、これらをどのように用いれば省電力化を達成できるかを明らかにする。 本論文の構成は以下の通りである。まず、1章で間欠動作するIoT機器におけるNVPGの重要性を述べ、2章では不揮発性の記憶素子を概観し、各種NVFFの構造とその特徴を紹介する。本論文で扱うNVFFは検証機能を持っており、短い時間で書き込みを行い、書き込みが失敗したものについてのみ長い時間で書き込みを行うTSS（Two-Step-Store）により書き込み電力を削減できる。3章では、省電力化のためには、検証機能付きNVFFを含む各種NVFFをどのように用いればよいか明らかでない点を指摘し、本研究の動機と目的を示している。 4章以降が本論文の主題である。4章では、実際に検証機能付NVFFを利用して構築したチップNVCMA（Non Volatile Cool Mega Array）を用いてNVFFの電力モデルを構築する。 NVCMAは組み込み用の粗粒度再構成可能なアクセラレータで、大規模なPE（Processing Element）アレイによる並列処理を利用し、低電力で高い性能を実現する。NVCMAは、PEアレイの構成情報メモリとデータメモリをNVFF化し、NVPGによりリーク電力を低減する機能を持っている。また、PEアレイとデータメモリのデータ流を制御するコントローラのプログラムにより、NVFFを制御することができる。電源電圧、書き込み時間、ビット変化率などを変更して、消費電力と書き込み成功率について広範囲に評価を行っている。5章は、この評価結果に基づき、単純なNVFFへの書き込みとTSSを用いた書き込みについて詳細な電力モデルを構築している。さらに、通常の揮発性FF、小規模な付加的ラッチを用いたリテンションFFについても同様のモデルを構築し、比較を可能としている。 6章では、このモデルを用いて、どのような条件で用いる場合、NVFFのTSS、NVFFへの単純な書き込み、通常の揮発性FF、リテンションFFが有利になるか、損益分析点の解析を行っている。7章はまとめと今後の課題である。 以上、本研究は、NVFFについて、実チップ測定に基づいた詳細な電力モデルを構築し、システム設計における損益分岐点を明らかにすることにより、NVPG技術を用いた設計に指針を与えており、その貢献は工学上少なくない。 よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6211 号	氏 名	佐久間 結子
主論文題名：			
住まいや住まう人の差異に着目したエコサービス			
持続可能社会の実現のためエネルギー消費量削減が急務である一方, quality of life (QoL)向上を求める傾向が高まっている. 本研究では, 様々なエコサービスが導入, 運用されている状況下で, 各サービスによって蓄積されるデータを効率的かつ効果的に利活用するための新しい複合型エコサービスを提案する. 提案するアーキテクチャではコミュニティ全体でサービスを連携させるが, サービス間は干渉せず同時運用される. 特に, コミュニティに多数の住人が住まう場合, 住宅の温熱環境には設計や家具の配置, リフォーム履歴などの住まいと, 生活習慣や家族構成などの住まう人の差異が影響する. そのため, これらの差異に着目して提案するアーキテクチャを構成する 3 種類のエコサービスを提案した. 一つ目の住宅性能評価では, 住まいや住まい方の差異を含んだ温熱性能を評価する手法を提案する. 環境投資事業であるグリーンニューディール(GND)の住宅改修向けにエアコンと簡便なセンサのみを用いた低コストな手法を提案した. 提案手法は測定データから住宅性能値として熱貫流率を同定する. GND 向けに正確, 低コストで簡便, 住民への負担少といった条件を満たすために, まずエアコンと室温の測定のみでパラメータ同定が可能な住宅温熱モデルを設計した. 次に, 住民の生活下での評価を可能とするためのデータ選択と前処理手法を提案した. 提案手法はさいたま市で実施された実証実験データとシミュレーションデータの両方を用いて評価し, 住宅性能値の同定値と設計値との相対誤差が平均 8%程度と正確性が認められた. 二つ目の空調制御では, 各住宅の設計や住まい方の差異を捉えて風向を最適化する手法を提案する. 室内の温熱環境の詳細を効率的に把握するために, 赤外線アレイセンサを用いて室内の温度マップを作成する. 温度マップを入力, エアコンの風向を行動, 室内の温度むら状況をペナルティとして深層強化学習を用いたコントローラを学習し, 室内の快適性を均一化するように風向制御を最適化した. 提案手法は computer fluid dynamics (CFD)で 2 種類の形状の部屋のシミュレーションを実施し評価した. 結果, 風向を均等に割り当てる手法と機械学習の予測に基づく手法と比較してエネルギー消費量は 0.6%減少と 8.0%増加し, 温度むらを示す MAE を平均 0.45℃ と 0.20℃ 削減できた. 三つ目の多目的階層型の電力需要予測では, 異なる住宅向けにモデルを最適化させながら連携させることでサービス全体として効率化する手法を提案した. 住宅側のエンコーダ出力の潜在変数のみを送信し, コミュニティ側の予測モデルの入力とすることで, 直接住宅のデータを共有せずに意味のある情報として活用することができる. さらに, コミュニティ側のデータ収集を省くとともにエンコーダも必要としない. このように, 提案手法はプライバシー保持, 低通信コスト, 階層的で多目的, モデルサイズ削減といったメリットがある. 提案手法は公開電力データを用いて評価し, 個別アプローチと比較してコミュニティ側のモデルサイズを 53%削減し, 住宅側とコミュニティ側でそれぞれ MAPE の増大を 2.7%と 3.6%程度に抑えられた. 以上のように, 本手法では住まいや住まう人の差異に着目したエコサービスの提供における三つの異なる観点について述べた. それぞれのサービスが実用的かつ各サービス間で干渉せずに同時に運用できることから, スマートコミュニティ階層を捉えた新しい複合型サービスの構築論を示した点で工学領域に新しい観点を寄与したと言える.			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6211 号	氏 名	佐久間 結子
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 西 宏章
	副査	慶應義塾大学教授	博士（情報学） 杉浦 孔明
		慶應義塾大学准教授	博士（情報理工学） 金子 晋丈
		東京電機大学准教授	博士（メディアデザイン学） 松井 加奈絵
修士（工学）、佐久間結子君の学位請求論文は、「住まいや住まう人の差異に着目したエコサービス」と題し6章で構成されている。 持続可能社会の実現にはエネルギー消費量削減が急務であるが、同時に quality of life (QoL) 向上を求める傾向も高まっている。住宅の温熱環境には、設計だけでなく家具の配置、リフォーム履歴、生活習慣、家族構成など、住まいや住まう人による差異の影響が大きい。これらの差異に着目して省エネと快適性の両立を目指す必要がある。また、住まう人に着目するためプライバシーの配慮も重要となる。これらの観点で3種類のエコサービスを提案し、評価している。 本論文の構成は以下の通りである。まず、1章で、地域を対象としたエコサービスについてまとめ、2章でグリーンニューディールなど政策の観点を含む各種事例や、本論文で利用する住宅温熱性能評価手法、HVAC 手法、電力需要予測手法、深層強化学習応用、連合学習応用などについて先行研究を示しながらまとめている。以降、具体的なサービス事例を3つ提案し評価している。 3章に1つめの事例として、グリーンニューディール向け住宅性能評価手法を提案している。改修効果の高い住宅を選定し、実際に改修工事を施して住環境の改善と光熱費削減を行うとともに、この削減分を改修工事に対する投資として費用回収する取り組みであり、その運用には性能の低い住宅を正確かつ低コストに選定する必要がある。そこで、エアコン電力と温度センサのみでパラメータ同定が可能なグレイボックスモデルを構築、リビングと隣接する1室以上を考慮することで、住宅性能指標値を、実家屋の設計値との平均誤差8%未満で推定できる仕組みを提案している。 4章に2つめの事例として、住宅の材質やレイアウトなどといった住まいの特徴や換気や在室パターンなど、住まい方の違いを勘案した空調制御によって温度差低減とエネルギー効率向上の両立を図る手法を提案している。室内の温熱環境を赤外線温度マップにより捉え、行動や室内の温度むらをペナルティとして、風向制御スロットのスケジュール最適化手法を用い、L字型室内の空調について、DQN に基づく深層強化学習を用いて評価している。実際の環境値を用いた CFD 評価により、風向を均等に移動させる空調運転と、学習で獲得した温度分布予測に基づく空調運転では、エネルギー消費量0.6%削減時に温度差の MAE で平均0.45度、8.0%増加時に平均0.20度、最大で誤差3度の達成を確認している。 5章に3つめの事例としてスマートコミュニティにおける各住宅や住戸、地域など異なる階層でサービスを提供する際の、全体の提供コストを削減する手法を提案している。例えば電力需要予測は階層ごと予測を行うことが必要である。このような状況では、各階層のモデルを相互に連携させることで、全体の効率化や高機能化が期待できる。具体的には、各階層で最適化させた予測モデル間でデータや計算の一部を共有することによる効率化や、無加工の計測情報ではなく、潜在変数のみを交換することによるプライバシー配慮といった高機能化が達成できる。そこで、複数階層を対象とし、プライバシーを保ちながら効率よく電力需要予測を行う階層多目的分散深層学習モデルを提案している。実環境で取得された公開電力利用データを用い、Seq2Seq (LSTM)、MLP、CNN モデルにより24時間先と1時間先を予測するタスクにおいて、提案手法は個別アプローチと比較してコミュニティ側のモデルサイズを53%削減しつつ、住宅側とコミュニティ側で MAPE の増大をそれぞれ2.7%と3.6%程度に抑制できることを確認している。 最後に、6章にまとめと今後の課題を示している。 以上、本研究は、住まいや住まう人の差異に着目したエコサービスの提供における3つの異なる観点について述べている点でユニークであり、それぞれが実用的かつ各サービス間で干渉せずに同時に達成できることから、スマートコミュニティ階層を捉えた新しい複合型エコサービスの構築論を示している点で、その貢献は工学上少なくない。 よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6212 号	氏 名	須賀 聖
主論文題名：			
環境の動的変化に適応可能な交通情報補間に関する研究			
自律分散型信号機制御を社会実現するには、センサーを用いて車両台数情報を取得し、交通信号制御パラメータを計算する。しかし、全道路にセンサーを設置することはコストや周辺環境の観点から難しい場合がある。従って、自律分散型信号機制御の社会実装には、センサー未設置の道路における交通情報を補間する必要がある。また交通流は周期的な変化や突発的な変化を伴う。そのため、交通状況の変化に対してリアルタイムに適応可能な補間が求められる。 本研究は、環境変化に対して適応性の高い、既存の群知能アルゴリズムを、動的変化を伴う情報補間問題に対して適用した応用研究である。具体的には、センサーを設置した道路から得られる交通情報を用いて、センサー未設置道路の交通情報をリアルタイムに補間する手法を考案し、交通情報補間に群知能アルゴリズムを適用した。一般的な交通動態では、交通量の多い道路をつなぐことで、一連の交通流を形成している。本提案手法では、主要な交通流経路を検知し、検知された交通流経路に基づいて交通情報が取得できない道路における交通情報を補間するアルゴリズムを提案した。シミュレーション実験の結果、提案手法によって主要交通流経路の検知を適切に行うことができ、センサー未設置の道路に対して優れた補間性能を示した。また、交通流が急変するような状況下に対して、変化に適応した主要交通流の検知を行うことができ、交通流変化後においても適切な交通情報を補間できることが示された。 さらに、提案手法がより多くの交通流パターンに適応できるよう、主要な交通流が合流する交通パターンに対して適応可能な交通情報補間アルゴリズムへと拡張した。シミュレーション実験を行った結果、改良手法は合流前の交通流と合流後の交通流を一連の主要交通流として検知することができ、交通流の合流に対しても優れた補間結果を示し、群知能型交通情報補間の適応可能な交通パターンの拡張に貢献することができた。 また、開発した群知能型交通情報補間システムは、社会実装可能な補間システムを目的としている。本論文では、実環境に設置されたセンサーから得られた、実世界の交通量データに対して、提案手法を適用し有効性の検証を行った。実世界の交通量データは、時間帯による周期的な変化が見られたが、実世界の交通量データに対しても提案手法は、周期的な変化に適応した交通量補間が可能であることが示された。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6212 号	氏 名	須賀 聖
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 栗原 聡
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 大門 樹
		慶應義塾大学教授	博士（理学） 成島 康史
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 今井 倫太
学士（学芸）、修士（工学）、須賀聖君の学位請求論文は、「環境の動的変化に適応可能な交通情報補間に関する研究」と題しており、全8章からなる。 人工知能技術を用いた交通信号機制御システムの社会実装では、信号機交差点にセンサーを設置することができない場合、交通量情報を補間することで、適切な信号機制御パラメータを迅速に算出する必要がある。本論文では、動的な変化を伴う交通状況に対して適応可能な交通量情報補間手法として、群知能アルゴリズムを取り入れた手法に関する研究を展開している。 第1章の序論では、高度道路交通システム(ITS)に関する背景に関して述べるとともに、信号機制御研究に関するさまざまな研究をレビューしたうえで、本研究の目的である交通量情報補間の重要性について説いている。また、交通量情報補間に関する研究の現状についてレビューし、概要を述べた上で、本研究は社会実装可能なリアルタイム交通量情報補間手法として、新規性・有用性があることを明確化している。 第2章では、交通量情報補間技術の関連研究を具体的に紹介し、従来の提案手法では、リアルタイムな交通量情報補間が困難である点や、現状においてプローブデータの普及率が低いといった課題を明確にした上で、本論文の目的である、社会実装可能なリアルタイム交通量情報補間手法の重要性を示している。 第3章では、群知能アルゴリズムに関する技術概要を説明し、群知能分野から見た本研究の位置付けを明確にしている。また、本論文で適用されている手法である群知能アルゴリズムの一手法であるAnt Colony Optimization アルゴリズムに関する原理を解説し、群知能アルゴリズムの特徴である環境の変化に対する適応性について説明している。また、Ant Colony Optimization アルゴリズムの工学的な応用事例に関して紹介している。 第4章では、環境の動的変化に対して適応可能な交通量情報補間手法として、Ant Colony Optimization アルゴリズムを取り入れた補間手法を提案している。Ant Colony Optimization アルゴリズムに基づき主要交通流経路を動的検知する手法および、交通流検知に基づく補間方法に関して詳述している。 第5章では、第4章の提案手法に関して交通シミュレーション実験による評価を実施している。提案手法は、突発的な交通流の変化に対して、動的に適応可能な交通量情報補間を実現することに成功している。 第6章では、第5章の提案モデルを更に拡張し、主要交通流が合流する交通流パターンにおける交通流検知および補間について対応可能な補間手法を提案し、交通シミュレーション実験を通してその有効性を示している。 第7章では、第4章の提案手法に関して、実際にセンサーによって取得された実交通量データを用いた補間実験を実施し、実社会データに対する提案手法の有効性と課題を示している。 第8章において、本論文に関する結論をまとめ、今後の展望を述べている。 以上の通り、本論文は動的な変化を伴う交通状況に対して適応可能な交通量情報補間手法を提案し、その有効性を明らかにし、交通信号機制御システムの社会実装への展開に向けた可能性を示したものであり、工学上寄与するところが少なくない。 よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6213 号	氏 名	Yuan, Liang (原 亮)
主論文題名： Deep Learning-Based Material Estimation and Synthesis Under Arbitrary Illumination (深層学習に基づく任意照明下での CG マテリアルの推定と合成)			
3次元(3D)コンテンツの創作において、写実的なマテリアルの生成は、視覚的な現実感と没入感を大幅に向上させる点で必要不可欠である。この作業は従来、多大な手作業を必要としていたが、写真からマテリアルを再構成する近年の研究は有力な代替手段を提供した。これらの方法はデータ駆動型であり、深層ニューラルネットワークを利用した自動化により、処理は革命的に簡単化された。しかしその進歩にもかかわらず、殆どの関連技法は制御された照明条件を必要とし、さまざまな実世界環境で撮影された写真から直接的にマテリアルを作成することは未だ難しい。この課題を解決することは、3次元デジタルマテリアルの生成にとってきわめて重要である。 本研究では、写実的レンダリングのさまざまな分野に対応するマテリアルの推定および合成のための新しい方法を導入する。まず、実世界の対象からデジタルアセットを派生するために、2段階の推定方法 UniMat 提案する。UniMat は、照明と形状を推定する微分可能レンダリングのネットワークと、空間的に変化する双方向反射分布関数(SVBRDF)を推定する2ストリーム階層型 U-Net を使用している。このネットワークを訓練するために、さまざまな合成オブジェクトのマルチビュー画像に加え、SVBRDF、合成形状の見えから構成される大規模なデータセットを用意した。次に、純粋に仮想的なデジタルアセットのマテリアルを生成する目的で、生成的な方法 DiffMat を導入する。DiffMat は、Contrastive Language-Image Pre-training (CLIP) 画像エンコーダに、さまざまな照明下の画像から潜在空間におけるマテリアルを生成する多層クロス・アテンションのノイズ除去ネットワークを組み合わせている。UniMat と DiffMat は、幅広い物理ベースのレンダリングパイプラインに統合するように設計され、最新のアプローチと比較しても、双方の方法はより高品質なマテリアルを生成し、参照画像に関係する制約も少ない。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6213 号	氏 名	Yuan, Liang (原 亮)
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	理学博士 藤代 一成
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 斎藤 英雄
		慶應義塾大学教授	博士（情報学） 杉浦 孔明
		東京工業大学准教授	博士（工学） 斎藤 豪
工学学士（中国・北京工業大学）ならびに Master of Science（米国・南カリフォルニア大学）の Yuan Liang 君が提出した学位請求論文は、「Deep Learning-Based Material Estimation and Synthesis Under Arbitrary Illumination（深層学習に基づく任意照明下での CG マテリアルの推定と合成）」と題し、全 8 章から構成されている。 三次元コンテンツの創作において、写実的なマテリアルの生成は、視覚的な現実感や没入感を大幅に向上させる点で必要不可欠な技術である。この作業は従来、多大な手作業を必要としていたが、近年、深層ニューラルネットワークを利用して写真からマテリアルを自動的に再構成する技術が登場し、その処理は大幅に簡略化された。しかし、殆どの関連技法は、制御された照明条件が必要であり、様々な実世界環境で撮影された写真から直接的にマテリアルを生成することは未だ難しい。この課題の解決は、三次元デジタルマテリアルの生成にとってきわめて重要である。そこで本論文では、写実的レンダリングの様々な応用に対応するマテリアルの推定および合成の新しい方法を提案している。 第 1 章では、三次元コンピュータグラフィックスにおける写実的マテリアルの推定と合成の必要性に言及し、本論文の目的と貢献を明らかにしている。 第 2 章では、マテリアルの推定および合成に関連する既存研究を、生成 AI との関連性に焦点を当てて俯瞰している。 第 3 章では、斯界の第一原理を与えるレンダリング方程式を参照することにより、マテリアルの推定と合成の問題を定式化し、本論文で提案するマテリアル推定器 UniMat とマテリアル合成器 DiffMat の位置づけを明確にしている。 第 4 章では、実世界の対象からデジタルアセットを派生する UniMat を提案している。UniMat は、照明と形状を推定する微分可能レンダリングのネットワークと、空間的に変化する双方向反射分布関数（SVBRDF）を推定する 2 ストリーム階層型 U-Net を使用している。このネットワークを訓練するために、さまざまな合成オブジェクトのマルチビュー画像に加え、SVBRDF や合成形状の見えから構成される大規模なデータセットを用意している。 第 5 章では、仮想的なデジタルアセットのマテリアルを合成する生成的な方法 DiffMat を提案している。DiffMat は、Contrastive Language-Image Pre-training（CLIP）の画像エンコーダに、さまざまな照明下の画像から潜在空間におけるマテリアルを生成する多層クロスアテンションのノイズ除去ネットワークを組み合わせている。 第 6 章では、アブレーションスタディを中心に、UniMat と DiffMat 双方のアーキテクチャを組織的に評価する実験結果を示し、詳細に分析している。さらに、両手法の具体的な応用シナリオも提示している。 第 7 章では、両手法に考察を加えている。UniMat については、安定性や基礎となる反射モデル、取り扱い可能なマテリアルの多様性、一方 DiffMat については、品質限界や可制御性の観点から各々分析を展開している。さらに、両者に共通する訓練用データセットの強化法等にも言及している。 第 8 章では、本研究の成果を要約し、結論を述べている。 以上要するに、本研究で提案された UniMat と DiffMat は、幅広い物理ベースのレンダリングパイプラインに統合するように設計され、同目的の最新の方式と比較しても、より高品質なマテリアルが生成でき、また参照画像に関係する制約も少なくなっている点で、工学的に寄与するところが少なくない。 よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6214 号	氏 名	臼田 隆之
主論文題名：			
電気鉄道における集電系の接触性能に関する研究			
本論文では、集電系の信頼性向上と鉄道的高速化による競争力強化を実現するため、パンタグラフの接触性能を地上設備で監視する技術と、優れた空力音特性を有する平滑化断面の舟体を搭載した新幹線用パンタグラフに接触性能を付与可能な技術を提案する。 従来、地上設備での離線アーク測定は可視光線を検出対象としていたため測定が夜間に限定される問題があり、接触力測定は離散的な支持構造を持つ柔軟な連続体へ作用する移動荷重の推定が困難という問題や、既提案手法にも特殊なレンズが必要で、天候や照度の影響を受けるため、常設監視には不向きという問題があった。揚力測定は接触力測定と類似の問題だけでなく、パンタグラフ側でもパンタグラフの主要部材の揚力が不可観測となる問題もあった。これらの問題に対し、本論文では離線アークのうち特定波長の紫外線のみを検出対象とすることで、日中でも離線アークを測定可能な手法とアーク発生位置を特定する手法を提案する。また、電車線の下部線条の波動方程式を測定区間で空間積分することで接触力測定を実現する手法を提案し、高相関の加速度測定点の選定問題にスパースモデリングによる正則化法と次元縮約法を適用することで、測定周波数に応じて効率的に測定点を選定する手法も確立する。更に、電車線の各線条の波動方程式に着目することで、複数の揚力測定手法を提案する。 接触性能付与技術としては、平滑化断面の舟体にすり板を上下動させる追従機構を組み合わせると揚力を不安定化させる問題と、前記揚力の不可観測の問題に対し、本論文では、舟体を左右方向に分割し、ばねにより弾性支持する新たな追従機構と、スパースモデリングにより選定した舟体表面の数点の圧力とパンタグラフ高さから、パンタグラフの揚力を推定する手法と、推定結果に基づいて平均揚力の変化を補償する機構を提案する。 第1章では、本論文の背景、既往研究および課題を概説し、目的と課題解決の方針を述べた。 第2～3章では、離線アークと接触力を測定する提案手法について詳述し、提案手法を新幹線営業線に適用し、実設備における有効性を示した。 第4章では、接触力測定における加速度測定点の選定問題に、LASSO等を適用する手法について詳述し、他の正則化法や従来測定条件との比較等から提案手法の高いスパース性を示した。 第5章では、複数の揚力測定手法について詳述し、課電部での測定条件ごとに手法を選定した。 第6章では、2～3章の新幹線での測定データ等からパンタグラフに求められる接触性能を整理し、それらを実現する提案機構について詳述し、300 km/h までの定置試験、400 km/h までの風洞試験等により、高速域まで高い接触性能を有していることを示した。 第7章では、各章の結果を受け、本論文の結論を述べた。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6214 号	氏 名	臼田 隆之
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 高橋 正樹
	副査	明治大学教授	博士（工学） 椎葉 太一
		慶應義塾大学教授	博士（情報学） 小檜山 雅之
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 石上 玄也
学士（工学）、修士（工学）臼田 隆之君提出の学位論文は「電気鉄道における集電系の接触性能に関する研究」と題し、全7章から構成されている。 本論文では、集電系の信頼性向上と鉄道の高速度による競争力強化を実現するため、パンタグラフの接触性能を地上設備で監視する技術と、優れた空力音特性を有する平滑化断面の舟体を搭載した新幹線用パンタグラフに接触性能を付与可能な技術を提案している。 接触性能監視技術に関して、地上設備での離線アーク測定は可視光線を検出対象としていたため測定が夜間に限定されるという問題、接触力測定は離散的な支持構造を持つ柔軟な連続体へ作用する移動荷重の推定が困難という問題、従来の接触力測定は特殊なレンズが必要で天候や照度の影響を受けるため、常設監視には不向きという問題がある。さらに、揚力測定はパンタグラフ側でもパンタグラフの主要部材の揚力が不可観測となる問題もある。これらの問題に対して、本論文では離線アークのうち特定波長の紫外線のみを検出対象とすることで、日中でも離線アークを測定可能な手法とアーク発生位置を特定する手法を提案している。また、電車線の下部線条の波動方程式を測定区間で空間積分することで接触力測定を実現する手法を提案し、高相関の加速度測定点の選定問題にスパースモデリングによる正則化法と次元縮約法を適用することで、測定周波数に応じて効率的に測定点を選定する、実用に資する手法も確立している。更に、電車線の各線条の波動方程式に着目することで、複数の揚力測定手法を提案している。 接触性能付与技術に関して、平滑化断面の舟体にすり板を上下動させる追従機構を組み合わせると揚力を不安定化させる問題と、揚力の不可観測という両方の問題に対して、本論文では舟体を左右方向に分割し、ばねにより弾性支持する新たな追従機構と、スパースモデリングにより選定した舟体表面の数点の圧力とパンタグラフ高さから、パンタグラフの揚力を推定する手法と、推定結果に基づいて平均揚力の変化を補償する機構を提案している。 第1章では、本論文の背景、既往研究および課題を概説し、目的と課題解決の方針を述べている。 第2章ならびに第3章では、離線アークと接触力を測定する提案手法について詳述し、提案手法を新幹線営業線に適用し、実設備における有効性を示している。 第4章では、接触力測定における加速度測定点の選定問題に、LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) 回帰等を適用する手法について詳述し、他の正則化法や従来測定条件との比較等から提案手法の高いスパース性を示している。 第5章では、複数の揚力測定手法について詳述し、課電部での測定条件ごとに手法を選定し、数値計算により有効性を検証している。 第6章では、2～3章の新幹線での測定データ等からパンタグラフに求められる接触性能を整理し、それらを実現する提案機構について詳述し、300 km/h までの定置試験、400 km/h までの風洞試験等により、高速域まで高い接触性能を有していることを示している。 第7章では、各章の結果を受け、本論文の結論を述べている。 以上のように、本論文は、電気鉄道の集電系において、車載ではなく地上設備によって接触性能を監視する技術を提案し、開発した低騒音かつ接触性能が高い新幹線用パンタグラフの性能を、提案した監視技術を用いて数値解析と実験の両面から検証している。その成果は電気鉄道工学分野において工学上・工業上、寄与するところが少なくない。 よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6215 号	氏 名	中別府 将太
主 論 文 題 名 :			
Control schemes for MTJ-based non-volatile devices (MTJ ベースの不揮発性デバイスの制御手法)			
自動車、ロボット、家電、宇宙機、センサーネットワーク等の組込みシステムは、コスト、サイズ、重量に制約があるだけでなく、リアルタイム性や耐障害性も要求される。このようなシステムでは、振動や衝撃等によるコネクタの接触不良が引き起こす瞬電や、太陽光発電等の不安定な電源を用いた場合の電圧降下による電源障害が発生する可能性がある。電源障害への対策として、不揮発性デバイス上にチェックポイントを周期的に作成し、電源障害後に復旧した場合、そのチェックポイントを復元して動作を再開する不揮発性チェックポインティング手法が有効である。さらに、電源障害が発生する最小間隔時間と電源障害が発生してから復旧するまでの最悪時間がわかっているならば、リアルタイムスケジューリングアルゴリズムに基づいて電源障害が発生しても時間制約を満たすようタスクをスケジュールすることができる。本論文は、いつ電源障害が発生しても時間制約を満たして正常な動作を継続するような組込みシステムを実現することを目的とする。そのために、磁気トンネル接合 (MTJ: Magnetic Tunnel Junction) を用いて不揮発化したフリップフロップである NVFF (Non-Volatile Flip Flop) を用いた MTJ ベースの不揮発性デバイスの制御手法を提案する。第一に、いつ電源が遮断されても正常なチェックポイント保持し、チェックポイント作成中も動作を継続するように二バンク構成で設計された NVFF module を提案する。第二に、いつ電源が遮断されても idempotency violation が発生しないように設計された consistency-aware data cache を提案する。第三に、チップ、及びチップ内の不揮発性デバイスごとに適したパラメタを自動で探索及び制御する学習ベース制御手法を提案する。本研究の貢献は、いつ電源障害が発生しても時間制約を満たして正常な動作を継続するような組込みシステムの基盤技術として、MTJ ベースの不揮発性デバイスの手法を提案したことである。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6215 号	氏 名	中別府 将太
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 山崎 信行
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士 天野 英晴
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 松谷 宏紀
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 中野 誠彦
修士（工学）、中別府将太君の学位請求論文は、「Control schemes for MTJ-based non-volatile devices（MTJ ベースの不揮発性デバイスの制御手法）」と題し 5 章から成る。 ロボット、宇宙機、自動車、センサネットワーク等の組み込みシステムは、コスト、サイズ、重量に制約があるだけでなく、リアルタイム性や耐障害性も要求される。このようなシステムでは、振動や衝撃等によるコネクタの接触不良が引き起こす瞬停や、太陽光発電等の不安定な電源を用いた場合の電圧降下による電源障害が発生する可能性がある。電源障害への対策として、不揮発性デバイス上に周期的にチェックポイントを作成し、電源障害後に復旧した場合、そのチェックポイントを復元して動作を再開する不揮発性チェックポイントニングが有効である。本論文では、いつ電源障害が発生した場合でも時間制約を満たして正常な動作を継続するような組み込みシステムの実現を目指している。そのために、磁気トンネル接合(MTJ: Magnetic Tunnel Junction)を用いて不揮発化したフリップフロップである NVFF (Non-Volatile Flip Flop)を用いた MTJ ベースの不揮発性デバイスの制御手法を提案する。 本論文の構成は以下の通りである。まず、1 章で組み込みシステムの概観、不揮発性チェックポイントニングによる電源障害の対策、電源障害を考慮したリアルタイムスケジューリング、本研究の目的と動機を述べ、2 章では MTJ の構造と特徴、不揮発性フリップフロップの概観及び検証機能付き NVFF である VR-NVFF (Verify-and-Retryable NVFF)の特徴、不揮発性メモリの概観について述べている。VR-NVFF は、スレーブラッチの値を MTJ に書き込むストア動作、MTJ の値をスレーブラッチに復元するリストア動作に加え、スレーブラッチの値と MTJ の値を比較する検証動作をサポートしている。 3 章以降が本論文の主題である。3 章では、状態遷移ベースの不揮発性デバイス制御手法として NVFF module と consistency-aware data cache を提案している。まず、チェックポイント作成の成功率を向上するように NVFF の検証及びエラー訂正機構を設計している。いつ電源が遮断されても正常なチェックポイントの存在を保証するように、つまりはチェックポイント作成中に電源が遮断されても動作を継続できるように 2 バンク構成で設計した NVFF module について述べている。次に、いつ電源が遮断されても idempotency violation が発生しないように設計した consistency-aware data cache について述べている。さらに、これらの手法を搭載した NVIOC SoC/SiP (Non-Volatile IO Core System-on-Chip/System-in-Package)の設計及び実装について述べ、NVIOC SoC/SiP の実機を用いて提案手法の有用性を示す評価を行っている。膨大な数の NVFF の制御パラメタを個々に設定するのは困難であるため、4 章では実チップ上で自動的にパラメタを探索及び制御するような学習ベースの制御手法を提案し、その有用性を示す評価を行っている。本手法では、ストア動作時間、電圧、温度が与えられた場合におけるストア動作成功率を学習する。これによる予測値に基づき、ストア動作成功率が十分高く、かつチェックポイント作成の消費エネルギーをなるべく小さくするパラメタ値を探索し、その値に基づいてパラメタ制御を行うようにしている。5 章では、まとめと今後の課題を述べている。 以上、本研究は、いつ電源障害が発生した場合でも正常な動作を継続できる組み込みシステムを実現するための基盤技術として、MTJ ベースの不揮発性デバイスの制御手法を提案しており、その貢献は工学上少なくない。 よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6216 号	氏 名	鈴木 雄大
主論文題名：			
Applicability of Quantum-Enhanced Machine Learning (量子による性能強化機械学習の応用性に関する研究)			
次世代の計算機として注目を集める量子計算機は、機械学習の性能を向上させる潜在能力がある。量子計算機の活用により性能改善が見込まれることの一つは分類などのパターン認識タスクである。これは、量子ビット数に対して指数的に大きくなるヒルベルト空間を機械学習のための特徴空間として活用することで、従来手法では発見できなかった法則性を見出すことができるようになることと期待されているためである。このように量子特徴空間を活用した機械学習のことを“量子による性能強化機械学習”と呼ぶ。これまでには、古典手法では効率よく解けない特定の分類タスクを量子による性能強化機械学習モデルは解くことができると理論的に示されている。そのため、より現実世界の問題に対する実用的な優位性の探索に関心が寄せられる。一方で、量子による性能強化機械学習の実応用については、高性能な学習モデルの構築に関する指針が明らかではないという課題がある。 本研究では、量子による性能強化機械学習の性能を解析し、実応用に向けた学習モデル設計の指針を示すことを目的とする。具体的には、量子カーネル法と量子リザーバー計算に着目し、実問題を扱う場合におけるモデル設計に対する見通しを提示する。 量子カーネル法における実応用の課題は二つ挙げられる。一つは、実問題適用の際に量子特徴写像の構築方法が非自明であるという点である。そこで本研究では、量子特徴写像の解析手法の提案と合成手法による性能改善を精査し、有用な量子特徴写像を選定および構築する手法を示した。もう一つの課題は、量子ビット数の増加に伴い実装性と訓練可能性が劣化してしまう点である。本研究では新たな量子カーネルとして量子フィッシャーカーネルを提案し、解析的および数値計算的に本提案が上記問題を回避しうることを示した。 量子リザーバー計算での課題は、効率よく実装可能であり、かつ性能が良い量子リザーバー系の設計方法が自明でない点である。そのため本研究では、量子デバイスで避けることのできない量子ノイズをむしろ積極的に利用する量子リザーバー計算フレームワークを提案した。本提案を超電導量子デバイス実機で実証し、量子ノイズにより時系列データ処理能力が向上することを示した。また時間情報処理容量という指標をもとに量子ノイズが実際に時系列データ処理能力を誘起することを確認した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6216 号	氏 名	鈴木 雄大
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 泰岡 顕治
	副査	慶應義塾大学准教授	Ph. D. 彭 林玉
		慶應義塾大学教授	博士（情報理工学） 山本 直樹
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 武岡 正裕
学士(工学), 修士(工学) 鈴木君の学位請求論文は「Applicability of Quantum-Enhanced Machine Learning（量子による性能強化機械学習の応用性に関する研究）」と題し、6章から構成されている。 次世代の計算機として注目を集める量子コンピュータは、機械学習の性能を向上させる潜在能力があると考えられている。量子コンピュータの活用により性能改善が見込まれることの一つは、分類などのパターン認識タスクである。これは、量子ビット数に対して指数的に大きくなるヒルベルト空間を機械学習のための特徴空間として活用することで、従来手法では発見できなかった法則性を見出すことができるようになることが期待されているためである。このような量子特徴空間を活用した機械学習のことを“量子による性能強化機械学習”と呼んでいる。これまでに、古典手法では効率良く解けない特定の分類タスクを量子による性能強化機械学習モデルでは効率良く解くことができると理論的に示されている。そのため、より現実世界の問題に対する実用的な優位性の探索に関心が寄せられる。一方で、量子による性能強化機械学習の実応用については、高性能な学習モデルの構築に関する指針が明らかではないという課題がある。 本論文では、量子による性能強化機械学習の性能を解析し、実応用に向けた学習モデル設計の指針を示すことを目的とし、量子カーネル法と量子リザーバー計算に着目して、実問題を扱う場合におけるモデル設計に対する見通しを提示している。 第1章では本論文の背景および目的、構成を、第2章では量子コンピュータに関する理論とその応用について説明している。第3章から第5章に結果を示している。 第3章では、量子カーネル法における実応用の課題の1つである実問題適用の際に量子特徴写像の構築方法が非自明であるという点について研究を行っている。量子特徴写像の解析手法を提案し、合成手法による性能改善を精査している。また、有用な量子特徴写像を選定および構築する手法を示している。 第4章では、量子カーネル法における実応用のもう1つの課題である量子ビット数の増加に伴い実装性と訓練可能性が劣化してしまう点について研究を行っている。新たな量子カーネルとして量子フィッシャーカーネルを提案し、解析的および数値計算的に本提案が本課題を回避しうることを示している。 第5章では、量子リザーバー計算での課題である効率よく実装可能でありかつ性能が良い量子リザーバー系の設計方法が自明でない点について研究を行っている。量子デバイスで避けることのできない量子ノイズをむしろ積極的に利用する量子リザーバー計算フレームワークを提案している。本提案を超電導量子デバイス実機で実証し、量子ノイズにより時系列データ処理能力が向上することを示している。また時間情報処理容量という指標をもとに量子ノイズが実際に時系列データ処理能力を誘起することを確認している。 最後に第6章で研究全体に関する結論を述べている。 以上要するに、本論文の著者は、量子による性能強化機械学習の応用性に関する研究に関して研究を行った。その成果は、量子による性能強化機械学習の実応用についての高性能な学習モデルの構築に関する指針を示しただけでなく、将来のさらなる量子コンピュータの活用に寄与するものであり、様々な分野における量子コンピュータを用いた機械学習の適用を通じて工学分野への応用が期待できる。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第6217号	氏 名	大河原 将
主論文題名： Relightable and Interactive Portraits: Toward Communication Systems for Coexistence in Remote Society (再照明可能な対話的ポートレート：遠隔社会における共在感を創出する コミュニケーションシステムを目指して)			
COVID-19 のパンデミックは、テレワークやオンライン教育など、さまざまな場面における遠隔技術の利用を一気に拡大させた。特に、ビデオ会議システムは、遠隔会議・遠隔授業・遠隔医療といった用途で広範囲にわたって活用され、パンデミックの影響が薄れたなかでも、その活用は継続している。ビデオ会議システムは、パンデミックという社会的な転換とともに、人々の生産・消費活動における距離や身体の制約を解放する役割の一端を担った。一方で、ビデオ会議システムを用いた遠隔コミュニケーションは、対面コミュニケーションと比較して違和感が生じやすく、遠隔協調による諸活動の生産性や品質の維持が難しいという課題が存在する。 遠隔協調を困難にする要因は様々であるが、共在感の欠如はその主因の一つである。共在感とは、誰かと共に存在していると感じる感覚のことをさす。共在感がある状態では、相手との相互作用が生まれ、お互いを理解したり、信頼したり、尊重したりすることに繋がり、効果的な協調を見込むことができる。しかし、共在感とは、対面コミュニケーションでは自然に生じるものの、遠隔コミュニケーションでは、物理的に同じ場所にいないため、希薄になりがちである。本研究は、この共在感をビデオ会議システム内で再現し、遠隔協調における視覚体験を向上させることを目的としている。 研究は三つの段階に分けて遂行した。第一段階では、遠隔コミュニケーションにおける環境の共有に着目し、ポートレートと周辺環境の間の照明の相互作用を考慮したコンポジット技術を提案した。第二段階では、遠隔コミュニケーションにおける実時間性に着目し、対話的グラフィックス処理系を開発した。そして、その対話的グラフィックス処理系に基づいて設計した教材を遠隔授業という状況下で活用することにより、その有効性を検証した。第三段階では、対話的グラフィックス処理系を基盤として、遠隔コミュニケーションシステムのプロトタイプを構築した。試作システムは、再照明可能なポートレートを対話的速度でレンダリングし、仮想背景によるポートレートの再照明と対話的描画によって生まれる運動視差によって共在感の再現を試みる。 試作システムは、手軽なデバイスでの実装が可能であるため、特別な設備がなくても多くの人が利用できる可能性を有している。将来、視覚処理技術の発展・モバイルシフト・ソーシャルメディアの拡大がますます進行し、共在感がより身近で直観的なものになることが求められる。本研究が、その新しいパラダイムの礎を築く一歩となることを願う。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6217 号	氏 名	大河原 将
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	理学博士 藤代 一成
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 今井 倫太
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 斎藤 英雄
		筑波大学准教授	博士（情報理工学） 金森 由博
学士（工学）、修士（工学）の大河原 将君が提出した学位請求論文は、「Relightable and Interactive Portraits: Toward Communication Systems for Coexistence in Remote Society（再照明可能な対話的ポートレート：遠隔社会における共在感を創出するコミュニケーションシステムを目指して）」と題し、全7章から構成されている。 COVID-19 のパンデミックは、テレワークやオンライン教育など、我々の社会生活の様々な場面における遠隔技術の利用を一気に拡大させた。特に、ビデオ会議システムは、多くの用途で広範囲に活用され、パンデミック終息後もその利活用は継続している。ビデオ会議システムは、その利便性の半面、対面コミュニケーションと比較して違和感が生じやすく、遠隔協調による諸活動の生産性に制限をもたらし、品質の維持を困難にするといった課題を有している。そこで本論文は、誰かと共に存在していると感じる感覚—共在感—に注目し、それをビデオ会議システム内で再現することにより、遠隔協調における視覚体験の品質を向上させることを目的としている。 第1章では、情報工学の観点から見た遠隔社会の光と影に言及し、共在感を維持することの必要性から提案システムの目的と貢献を明らかにしている。 第2章では、関連する既存の研究開発を俯瞰し、提案システムの位置づけを明確にするとともに、段階的に提案システムを実現する研究開発ロードマップを明示している。後続の第3章から第5章は、その3ステップの成果に各々対応している。 第3章では、遠隔コミュニケーションにおける環境の共有に着目し、ポートレートと周辺環境の間の照明の相互作用を考慮した画像合成技術を提案している。特に、個々の照明環境で撮影された複数の個人ポートレートから、同一照明環境下で初めから撮影されたかのような共在感を伴うグループポートレートを生成する利用シナリオは、現行のビデオ会議システムでも未だ実現されていない新規性を示している。 続く第4章では、遠隔コミュニケーションにおける実時間性に着目して開発してきた、対話的グラフィックス処理系のアーキテクチャについて詳述している。さらに、その処理系に基づいて開発した、複雑な大局照明計算を含むコンピュータグラフィックス専門科目の実習教材を、多年度に渡り実際の遠隔授業という状況下で活用・発展させることにより、その処理系の実効性を検証している。 さらに第5章では、第3章の画像合成技術を、前章の対話的グラフィックス処理系を基盤として発展させた、遠隔コミュニケーションシステムのプロトタイプを提案している。このシステムは、再照明可能なポートレートを対話的速度でレンダリングし、仮想背景によるポートレートの再照明と対話的描画によって生まれる運動視差によって共在感の再現を試みるものである。試作システムは、手軽なデバイスでの実装が可能であるため、特別な設備がなくても多くの人が利用できる可能性を秘めている。 第6章では、自由視点映像処理技術や、人間の判断や制御を介する協調的情報処理ループ（human-in-the-loop）の観点から、提案システムの今後の発展性に考察を加えている。 第7章では、本論文を要約し、結論を述べている。 以上要するに、本論文で提案された、共在感の維持を目指した遠隔コミュニケーションシステムは、将来の視覚処理技術の発展やモバイルシフト、ソーシャルメディアの拡大を背景として、その更なる必要性の高まりと改良・普及が見込まれる点で、工学・産業の発展に寄与するところが少なくない。 よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			