2023（令和5）年度 春学期

博士（工学） 学位論文
博士（理学）

論文の内容の要旨および論文審査の結果の要旨

目 次

椎木 陽介	Circuits and Systems for Integrated Metal-Oxide Sensors Towards Artificial Olfaction (人工嗅覚実現に向けた集積化金属酸化物センサ用の回路とシステム)	1
藤原 洋介	Application of Deep Residual Convolutional Neural Network to Brain-Computer Interfaces and Analysis of Neural Activity in Higher-Order Motor Cortex (深層残差畳み込みニューラルネットワークのブレイン・コンピュータ・インターフェイスへの応用と高次運動野の神経活動解析)	3
川井 秀介	Load-Adaptive Active Gate Driver Integrated Circuit for Power Device (パワーデバイス用負荷適応型アクティブゲートドライブ集積回路に関する研究)	6
冲永 佳史	医療用呼吸温湿度交換器の動的特性に関する研究	8
芝 慎太郎	Estimating Motion with an Event Camera (イベントカメラによる動き推定)	10
林 秀一郎	Laser-induced carbonization and graphitization of a transparent elastomer (透明エラストマーのレーザ炭化と黒鉛化)	12
三田 夏大	銅合金条材の疲労強度および疲労き裂進展特性に関する研究	14
妹尾 卓磨	A Study on Designing a Deep Reinforcement Learning Library towards Practical Applications (応用を見据えた深層強化学習ライブラリ設計の研究)	16
福岡 正彬	A Study on Sensory Attenuation with Virtual Supernumerary Robotic Limbs Controlled by Facial Movements (顔の動きによるバーチャル拡張身体の操作における感覚減衰の研究)	18
田中 克弘	変数選択制約と楕円形判別面を考慮した信用リスク判別モデルの効率的解法と評価	20
石飛 晶啓	Quasi-reversible Weathering of Rust Preventive Coating Films (防錆塗膜の準可逆的ウェザリング)	22
岩井 孝法	高信頼な無線ネットワーク化制御を可能とする通信制御技術に関する研究	24
Peng, Zhen (彭 真)	Surface Design on Boron-doped Diamond for Electrochemical Sensor System and CO ₂ Reduction (電気化学センサおよびCO ₂ 還元のためのホウ素ドーパダイヤモンドの表面デザイン)	26
寫本 慶太	Hybrid Position/Force Control and State Estimation for Position-and-Force-Sensorless Robots (位置・力センサレスロボットのためのハイブリッド制御および状態推定)	28
竹村 玲哉	Comprehensive Framework for RRT-based Motion Planning of Autonomous Robotic Systems in Extreme Environments (極限環境における自律移動ロボットシステムのRRTに基づく動作計画のための包括的なフレームワークの構築)	30
仲村 孝行	鉄道車載蓄電用直流一直流変換システムの小型軽量・低損失化に向けた一手法	32
中野 匠	手組作業における画像解析を用いた作業管理と工程管理者の支援に関する研究	34
澁谷 健一	A Study on Corporate Social Responsibility Impact Analysis and Design for Environment (企業の社会的責任の影響分析と環境配慮設計に関する研究)	36

論文の要旨および審査結果の要旨

本報は、学位規則(昭和28年4月1日文部省令第9号)第8条による公表を目的として、本大学において2023(令和5)年度春学期に博士の学位を授与した者の論文内容の要旨および論文審査の結果の要旨である。収録したものは次のとおり。

慶應義塾大学理工学部

学位の種類	学位記号・番号	授与年月日	氏名
博士(工学)	甲第6055号	令和5年9月5日	椎木 陽介
博士(工学)	甲第6058号	令和5年7月5日	藤原 洋介
博士(工学)	甲第6059号	令和5年9月5日	川井 秀介
博士(工学)	甲第6060号	令和5年7月5日	冲永 佳史
博士(工学)	甲第6069号	令和5年9月5日	芝 慎太郎
博士(工学)	甲第6070号	令和5年9月5日	林 秀一郎
博士(工学)	甲第6071号	令和5年9月5日	三田 夏大
博士(工学)	甲第6072号	令和5年7月31日	妹尾 卓磨
博士(工学)	甲第6073号	令和5年7月31日	福岡 正彬
博士(工学)	甲第6074号	令和5年9月5日	田中 克弘
博士(工学)	甲第6075号	令和5年9月5日	石飛 晶啓
博士(工学)	甲第6091号	令和5年9月5日	岩井 孝法
博士(理学)	甲第6092号	令和5年9月5日	Peng, Zhen (彭 真)
博士(工学)	甲第6093号	令和5年9月5日	鷗本 慶太
博士(工学)	甲第6094号	令和5年9月5日	竹村 玲哉
博士(工学)	甲第6095号	令和5年9月5日	仲村 孝行
博士(工学)	甲第6096号	令和5年9月5日	中野 匠
博士(工学)	甲第6097号	令和5年9月5日	澁谷 健一

内容の要旨

報告番号	甲 第6055号	氏名	椎木 陽介
主論文題名： Circuits and Systems for Integrated Metal-Oxide Sensors Towards Artificial Olfaction (人工嗅覚実現に向けた集積化金属酸化物センサ用の回路とシステム)			
<p>多くの哺乳類は嗅覚を利用して餌や仲間や危険を感知している。そのような生物の嗅覚を再現する人工嗅覚を実現することは、多くの種類のガスセンサを見かけるが今でも非常に困難な課題である。嗅覚デバイスの性能はリアルタイム性、コスト、精度、電力消費、サイズ、センサ数の間のトレードオフの関係で決まってしまう。このトレードオフの関係を越えた嗅覚デバイスを実現するために、センサマテリアル研究機関と共同研究しながら、新規の嗅覚システムをこれまで研究開発してきた。本研究では大量の分子情報を取得するためのハードウェアプラットフォームを実現するための回路とシステムを中心に述べる。人工嗅覚実現にとって大切な要素技術の、嗅覚センサのコンパクトモデル、集積センサ用の読取り回路、複数のセンサのエミュレーション技術に関する研究成果をまとめた。</p> <p>第1章では人工嗅覚に関する研究背景、研究の最終的な目標、本論文の構成について述べる。</p> <p>第2章では回路とシステムを設計するにあたり直面する現実的な課題について述べる。嗅覚センサとしては、集積の容易さ、低コスト、リアルタイム性の観点から金属酸化物材料を選択し、その材料を使った最終的な嗅覚センサの図を共有する。執筆段階ではそのセンサは開発中であるため、中間成果物の2種類のセンサを紹介する。それらはそれぞれ、“クロスポイント構造センサアレイ”と“自己加熱分子センサアレイ”と呼ばれている。</p> <p>第3章では金属酸化物センサのコンパクトモデル実装について紹介する。E. Llobet et al.の過去の研究成果を発展させ、自己加熱効果の影響を考慮したフィードバックループ内蔵のモデルを提案した。モデルパラメータは測定によって同定した。最終的に実験結果とシミュレーション結果の比較を行なった。</p> <p>第4章ではクロスポイント構造センサアレイの読取り回路について述べる。従来の回路ではセンサ同士の回り込み電流を抑制するためにオペアンプが利用される。シミュレーションによって読取り誤差の原因を特定した。精度を向上させるために、オペアンプによって引き起こされる誤差を補正する処理方法を提案し解析した。加えて、オペアンプを取り除いた、“回込み電流制御方式読取り手法”が提案された。</p> <p>第5章では、複数のセンサエミュレーション技術に関して、“定電力・パルス加熱測定法”の提案を行なった。この測定手法では一つのセンサが、異なる温度条件をつくり出すことによって複数のセンサのように振る舞う。その測定手法内での回路は、アレイセンサに対しても多くの電力が消費されないように設計された。ダミー抵抗を使った回路の測定結果から温度制御及び読取り精度が評価された。評価の後に自己加熱センサを測定した。その結果から、パルス加熱測定法が正しくセンサに適用されたと結論づけた。</p> <p>第6章では各章で述べた研究成果をまとめ、将来の研究の展望を示している。</p>			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6055 号	氏 名	椎木 陽介
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） 柳田 剛
<p>学士（工学）、修士（工学）椎木陽介君提出の学位請求論文は「Circuits and Systems for Integrated Metal-Oxide Sensors Towards Artificial Olfaction（人工嗅覚実現に向けた集積化金属酸化物センサ用の回路とシステム）」と題し、6章から構成されている。</p> <p>生物の五感のうち嗅覚に相当する気相分子センサは、幅広い応用が期待されているが、その研究開発が遅れている。気相分子を検出するガスセンサは多数実用化されているが、感度向上のために加熱が必要となり消費電力が大きく価格も高い、単一のデバイスで複数の分子を高精度に識別することが難しいといった課題があり、多種多様な気相分子の識別が可能な生物の嗅覚を模擬できるレベルの人工嗅覚センサは実用化されていない。本研究は、多種類の気相分子を識別できる分子センサデバイスの実現に向けて、大規模集積化された分子センサの信号を高精度に検出し制御するための回路とシステムを確立することを目的としている。</p> <p>第1章は序論であり、人工嗅覚に関する研究背景を概説し、研究の最終的な目標、主論文の構成を述べている。</p> <p>第2章では、分子センサの回路とシステムを設計するにあたり直面する現実的な課題について述べている。本研究では嗅覚センサとして、集積の容易さ、低コスト、リアルタイム性の観点から金属酸化物材料を選択し、その材料を使った最終的な人工嗅覚センサの概念を提示している。</p> <p>第3章では、金属酸化物センサのコンパクトモデルに関して、自己加熱効果の影響を考慮したフィードバックループ内蔵のモデルを提案している。実センサデバイスからパラメータ抽出された提案モデルを用いてシミュレーションしたセンサ応答が、実測結果を再現できることを確認している。</p> <p>第4章では、クロスポイント型大規模センサアレイの高精度信号検出回路について提案している。高精度な信号検出手法として、クロスポイント型センサアレイの迷走電流を抑制するために利用するオペアンプの非理想性に起因した誤差を補正する手法、およびアンプを使わずに各センサの信号を検出する手法を提案し、検出誤差が大幅に低減できることをシミュレーションで確認している。</p> <p>第5章では、センサの消費電力削減および自己加熱による温度変調を用いた分子識別能の実現の手段として、パルス加熱測定法を提案している。パルスバイアスによりセンサの自己加熱を高速高精度に制御することでセンサの温度を変調し、単一のセンサで異種分子に対する感度を制御する手法であり、構築したプロトタイプシステムにより消費電力削減と分子の識別能が実現できることを実証している。</p> <p>第6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。</p> <p>以上要するに、本研究は人工嗅覚システムを実現するための気相分子センサの高精度な信号検出および制御手法を提案し、その有効性を実証したものであり、センサ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。</p>			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6058 号	氏 名	藤原 洋介
主論文題名：			
Application of Deep Residual Convolutional Neural Network to Brain-Computer Interfaces and Analysis of Neural Activity in Higher-Order Motor Cortex (深層残差畳み込みニューラルネットワークのブレイン・コンピュータ・インターフェイスへの応用と高次運動野の神経活動解析)			
<p>深層学習の発展により、脳波をデコーディングし、外部機器を操作する Brain-Computer Interface (BCI) の技術が急速に発展している。BCI のプロトタイピングでは、被験者の脳活動状態の推定精度を向上させるために、頭皮に生じる脳波の時間や空間情報などを畳み込む Convolutional Neural Network (CNN) が導入されつつある。特に、身体運動中の脳活動状態を識別する BCI は脳卒中片麻痺の機能回復を誘導する技術として医療分野への応用が期待されているが、汎化モデルの構築によって精度や治療効果が未知の被験者に対しても向上できるかが問題となっている。</p> <p>一方、基礎神経科学では身体運動中の脳活動特性について古くから研究されており、体性感覚運動野 (SM1) を中心に、補足運動野 (SMA) または運動前野 (PMc) といわれる高次運動野 (非一次運動野) が運動に関与していると考えられている。脳内における随意運動の生成過程で、非一次運動野は感覚入力などの修飾も受けながら、視床や大脳基底核と関連して、一次運動野での最終的な出力の前段階で賦活し、重要な役割を担っている。しかし、非一次運動野における神経活動は自発脳波を用いて計測を行うことが困難で、BCI の汎化モデル構築に貢献できるかも定かではない。そのため、現状の BCI は最下流の一次運動野の神経活動によって制御される設計で、その上流過程の神経活動信号を活用できていないものが一般的である。非一次運動野由来の信号を利用した BCI を構築することができれば、上記の BCI の問題の解決につながる可能性がある。そこで本論文では、将来的な治療効果向上への貢献のために、運動中の非一次運動野の活動が自発脳波に反映されているかを検証すること、および非一次運動野の脳波を活用することで精度の点で汎化性のある BCI を開発することを目的とした。</p> <p>第 1 章では、ヒトの運動中の脳活動について、SM1 近傍の頭皮上に出現する ERD と呼ばれる脳波の振幅変化や体性感覚誘発電位 (SEP) が運動中に減衰する現象であるゲーティング効果について概説した。また、CNN や BCI に用いられる深層学習の関連技術を概説した。</p>			

第2章では、ERDと関連があるSEPs成分を同定した。運動実行および運動イメージ中のERDとSEPsのN30成分のゲーティングが被験者間の比較において有意な相関があることを認めた。これにより、N30成分の起源である非一次運動野がSM1のERDに関与していることを明らかにした。

また、第2章では追加研究として、低頻度刺激の反復経頭蓋磁気刺激法(rTMS)を用いて大脳皮質の興奮性を一時的に抑制したときの、運動に関連した脳活動の指標の変化を調べた。刺激部位は第2章より運動タスク中にERDとSEPsのゲーティングとの相関に関連が深いと考えられた非一次運動野のPMcに行った。その結果、ERDだけでなく、SEPsのN30のゲーティング、およびSMAからPMcやSM1への時系列的な因果関係を示すGranger因果により評価した大脳皮質間の自発脳波の因果変化が、rTMSの直後に有意に低下することを明らかにした。

第3章では、非一次運動野の脳波も入力とし、汎化性のあるBCIモデルを開発した。健常者109名のデータセットを用い、被験者間でモデルを学習させ、交差検証を行った。モデルはCNNをベースとしたEEGNetに残差ネットワークを挿入して多層化した。検証の結果、従来モデルよりも高い汎化性能を得たことを確認した。また、Grad-CAMを用いたモデルの可視化により、汎化性能向上には非一次運動野が大きく貢献していることを確認した。

また、第3章では追加研究として、運動実行の場合より多層化したモデルを用いて運動イメージにおいても、未知の被験者に対して高い汎化性能が獲得できていることを確認した。さらに運動イメージでは一般的に運動実行の識別より精度が低くなるため、学習を2段階構成で行うものとした。その中で、第1段階の学習で汎化性能の高いモデルを構築した後、第2段階で追加の学習を行い、精度を高める手法を考案した。ここでは、医療応用などを想定して、安静時の脳波のみで被験者ごとのキャリブレーションを行うことが推奨される場合を想定し、誤差関数にバイナリクロスエントロピー関数を用いて学習を行った。第2段階の学習でも運動イメージの識別に性能向上がみられることを確認した。なお、2段階構成の学習を用いた最終的なモデルを可視化した結果も、非一次運動野が大きく貢献していることが確認できた。

第4章では結論として、本研究の成果を総括し、研究の意義と重要性を述べた。

審査の要旨

報告番号	甲 第 6058 号	氏 名	藤原 洋介
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士 田中 敏幸
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 牛場 潤一
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 渡辺 宙志
		慶應義塾大学名誉教授	工学博士 本多 敏

学士（工学）、修士（理学）藤原洋介君提出の学位請求論文は、「Application of Deep Residual Convolutional Neural Network to Brain-Computer Interfaces and Analysis of Neural Activity in Higher-Order Motor Cortex（深層残差畳み込みニューラルネットワークのブレイン・コンピュータ・インターフェイスへの応用と高次運動野の神経活動解析）」と題し、4章より成る。

脳波をデコーディングし、外部機器を操作する Brain-Computer Interface (BCI) において、脳活動状態の推定精度を向上させるために、Convolutional Neural Network (CNN) の導入が進んでいる。特に、身体運動中の脳活動状態を識別する BCI は脳卒中片麻痺の機能回復を誘導する技術として医療分野への応用が期待されている。一方、基礎神経科学では身体運動中の脳活動特性について、体性感覚運動野を中心に、補足運動野または運動前野といわれる高次運動野（非一次運動野）が運動に関与していると考えられている。脳内における随意運動の生成過程で、非一次運動野は感覚入力などの修飾も受けながら、視床や大脳基底核と関連して、一次運動野での最終的な出力の前段階で賦活し、重要な役割を担っている。しかし、非一次運動野における神経活動は自発脳波を用いて評価を行うことが困難で、BCI の汎化モデル構築に貢献できるかも定かではない。そのため、現状の BCI は最下流の一次運動野の神経活動によって制御される設計になっていることが一般的で、その上流過程の神経活動信号を活用できていないのが現状である。非一次運動野由来の信号を利用した BCI を構築することができれば、BCI の汎化性向上や運動生成に関する脳内機構の理解につながる可能性がある。本論文では、運動中の非一次運動野の活動が自発脳波に反映されることを明らかにし、これを活用することで汎化性のある BCI を開発することを目的としている。

第1章では、ヒトの運動中の脳活動について、体性感覚運動野近傍の頭皮上に出現する事象関連脱同期と呼ばれる脳波の振幅変化や体性感覚誘発電位が運動中に減衰する現象であるゲーティング効果について概説している。また、CNN や BCI に用いられる深層学習の関連技術についても概説している。

第2章では、事象関連脱同期と関連がある体性感覚誘発電位成分を同定している。運動実行および運動イメージ中の事象関連脱同期と体性感覚誘発電位の N30 成分のゲーティングが被験者間の比較において有意な相関があることを示し、N30 成分の起源である非一次運動野が体性感覚運動野の事象関連脱同期に関与していることを明らかにしている。

第2章では、低頻度刺激の反復経頭蓋磁気刺激法を用いて大脳皮質の興奮性を一時的に抑制したときの運動に関連した脳活動の指標の変化を調べている。その結果、事象関連脱同期だけでなく、体性感覚誘発電位の N30 のゲーティング、および補足運動野から運動前野や体性感覚運動野への時系列的な因果関係を示す Granger 因果により評価した大脳皮質間の自発脳波の因果変化が、反復経頭蓋磁気刺激法の直後に有意に低下することを示している。

第3章では、非一次運動野の脳波を入力することにより、汎化性のある BCI モデルを開発している。健常者 109 名のデータセットを用いて交差検証を行っている。モデルは CNN をベースとした EEGNet に残差ネットワークを挿入して多層化している。検証の結果として、従来モデルよりも高い汎化性能を得ている。またモデルの可視化により、汎化性能向上には非一次運動野が大きく貢献していることを示している。

第4章では結論として、本研究の成果を総括し、研究の意義と重要性を述べている。以上要するに、本論文は、運動中の非一次運動野の活動が自発脳波に反映されることを示し、非一次運動野の脳波を活用した汎化性のある BCI を CNN と深層学習を用いて開発しており、生体医工学の分野において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 6059 号	氏 名	川井 秀介
主論文題名：			
Load-Adaptive Active Gate Driver Integrated Circuit for Power Device (パワーデバイス用負荷適応型アクティブゲートドライバ集積回路に関する研究)			
<p>来るカーボンニュートラル社会の実現に向け、様々な機器の電動化、自動化が進んでいく。カーボンニュートラルを実現するための電動、電力機器の中には、モータを駆動し、直流と交流の電力変換をつかさどる、電力変換器が存在する。電力変換器はパワー半導体と、制御回路で構成されている。パワー半導体の高性能化に伴い、変換器は高効率化になるがノイズが発生しやすくなり、ノイズに対処するために損失が大きくなるという問題がある。アクティブゲート技術は、パワーデバイスの損失とノイズのトレードオフを解決する技術である。パワー半導体の状態にあった波形で駆動することで、トレードオフを解決する。しかしながら、チップ内に集積された負荷適応機能を持つアクティブゲートドライバ技術の研究は存在しない。</p> <p>本論文は、チップ集積した負荷適応型アクティブゲートドライバの研究に関するものである。アナログフィードバック技術、デジタルフィードフォワード技術の両方に関して、負荷適応機能をチップ集積したアクティブゲートドライバを研究開発した。</p> <p>1章は本論文の背景を示す。パワーエレクトロニクスの概要を示し、電力変換器の重要性を産業面での利用状況や電力の観点から示した。</p> <p>2章で、各パワーデバイスの特徴、スイッチング波形とノイズの関係、負荷適応の概要など、アクティブゲート技術の基礎となる内容を示した。アクティブゲート技術をアナログ技術とデジタル技術に分類し、既存研究の利点と欠点を述べ課題を整理した。</p> <p>3章にて、提案した離散時間フィードバック技術を用いたアナログアクティブゲートドライバ IC について述べた。2つの抵抗をフィードバック技術により制御し、スーパージャンクション MOSFET のターンオンドレイン電圧遷移速度 (dV_a/dt) を制御する。提案した技術はフィードバック結果を次のスイッチングにフィードバックするので、スーパージャンクション MOSFET 特有のリバーススリカバリ電流に依存する dV_a/dt を制御することができる。試作した IC を用いてターンオン遅延を 74%、スイッチング損失を 25%削減した結果について述べた。</p> <p>4章では、提案したデジタルフィードフォワード技術を用いたアクティブゲートドライバ IC について述べた。SiC-MOSFET の容量の非線形性を考慮したターンオフのシミュレーション解析結果を示した。解析を基にサージ電圧を低減する波形を提案した。ドライバ IC のメモリ量と時間分解能を低減するために、時間分解能拡張回路を提案した。ドライバ IC に集積した ADC を用いて、SiC-MOSFET の負荷を検知し、負荷に応じたアクティブゲート波形を出力することに成功し、ターンオフ電圧サージを、損失を増加させることなく 51%削減した。</p> <p>5章では、各章で得られた内容をまとめ、本研究の成果を要約した。</p>			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6059 号	氏 名	川井 秀介
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

学士（工学）、修士（工学）川井秀介君提出の学位請求論文は「Load-Adaptive Active Gate Driver Integrated Circuit for Power Device（パワーデバイス用負荷適応型アクティブゲートドライバ集積回路に関する研究）」と題し、5章から構成されている。

カーボンニュートラル社会の実現に向けて、電力機器の高効率化の重要性が高まっている。パワー半導体の低損失化および高速化に伴い、電力変換器の高効率化とスイッチング雑音の間に発生するトレードオフが問題となっている。パワー半導体を駆動するゲートドライバ回路において、アクティブゲートドライブ技術はパワー半導体の状態にあった波形で駆動することで、効率と雑音のトレードオフを解決する技術として注目を集めている。本研究は、負荷適応型アクティブゲートドライバの高性能化に関して、集積化により実現可能な技術と課題を模索し、テストチップにより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。パワーエレクトロニクスの概要を述べ、電力変換器の重要性を産業面での利用状況や電力の観点から説明している。

第2章では、各種パワーデバイスの特徴、スイッチング波形と雑音の関係、負荷適応の概要など、アクティブゲート技術の基礎となる項目を説明している。アクティブゲート技術をアナログ技術とデジタル技術に分類し、既存研究の長所と短所を述べ課題を整理している。

第3章では、離散時間フィードバック技術を用いたアナログアクティブゲートドライバ回路を提案している。2種類の駆動力をフィードバック技術により切替え、スーパージャンクション MOS(SJMOS)のターンオンドレイン電圧遷移速度を制御する。提案手法では、フィードバック結果を次のスイッチングに反映することで、SJMOS特有のリバースリカバリ電流に依存する電圧遷移速度の制御を可能としている。試作したテストチップを用いてターンオン遅延を74%、スイッチング損失を25%削減できることを実証している。

第4章では、デジタルフィードフォワード技術を用いたアクティブゲートドライバ回路について説明している。SiC-MOSFETの容量の非線形性を考慮したターンオフのシミュレーション解析結果をもとに、サージ電圧を低減する波形を提案し、さらに、ドライバ回路に要求されるメモリ容量と時間分解能の緩和のために、時間分解能拡張回路を提案している。提案手法を導入した試作チップにおいて、SiC-MOSFETの負荷を検知し、負荷に応じたアクティブゲート波形を出力することで、損失を増加させることなく、ターンオフ電圧サージを51%削減でき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、本研究は電力変換器の効率とスイッチング雑音のトレードオフを解決するアクティブゲートドライバに関する手法を提案し、その有効性を実証したものであり、パワーエレクトロニクス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 6060 号	氏 名	冲永 佳史
主論文題名：			
医療用呼吸温湿度交換器の動的特性に関する研究			
<p>近年、患者の呼吸を適切に確保するために、医療用呼吸温湿度交換器（Heat and Moisture Exchanger with Filter : HMEF）が、病院内だけでなく、救急医療の現場においても利用されるようになってきている。このHMEFに関しては、時間平均的な挙動などについてはいくつかの研究がみられるものの、その動的特性について系統的に解析した研究はみられない。そこで本研究では、呼気を想定した温度37°Cの飽和空気（呼気と呼ぶ）と吸気を想定した温度26°Cの乾燥空気（吸気と呼ぶ）をHMEFに交互に供給し、呼気側、吸気側の湿度、温度の時間変化を実験的に測定し、その内部現象を検討するために一次元数値解析を行った。その際、HMEF内部が空の場合、スポンジを設置した場合、塩化カルシウムを含浸させたスポンジを設置した場合の3パターンについて検討を行った。</p> <p>第1章は序論であり、HMEFについて概説し、従来の研究、目的を述べている。</p> <p>第2章は研究手法であり、実験装置および実験方法、ならびに一次元数値解析の支配方程式、境界条件および計算手法について述べている。</p> <p>第3章では、呼気を180秒、吸気を180秒、ステップ的に転換して供給した場合の過渡応答特性について実験、数値解析により検討を加え、塩化カルシウムによる水の凝縮、蒸発に伴って、湿度、温度が顕著に変化することを明らかにした。</p> <p>第4章では、呼気吸気の周期を256秒から、ヒトの呼吸の周期に対応する4秒まで変化させ、その周期応答特性について実験、数値解析により検討を加えた。その結果、呼吸の周期を短くすると非定常性が顕著になり、塩化カルシウムの温度、湿度の変化が人の利用に適した範囲になることを明らかにした。</p> <p>第5章では、HMEFの基本特性として、塩化カルシウムを含浸させたスポンジ部の厚さおよびHMEFの全長の影響について、数値解析結果をもとに検討を加えた。その結果、単位スポンジ厚さあたりの水の保持量はスポンジ厚さが厚くなるほど少なくなること、また全長を長くするとスポンジ部に到達せずに戻ってくる空気の影響により、湿度、温度の変動の振幅が小さくなることが示された。</p> <p>第6章では、塩化カルシウムの初期状態およびHMEFの空洞部、接続部などの未利用領域の影響について数値解析により検討を加えた。その結果、両者を適切に設定することにより実験結果に定量的にも対応する結果が得られ、これらの要因がHMEFの特性に重要な役割を演じていることを明らかにした。</p> <p>第7章では、本論文の結論および今後の課題をまとめた。</p>			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6060 号	氏 名	冲永 佳史
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 横森 剛
	副査	慶應義塾大学教授	Ph.D. 堀田 篤
		慶應義塾大学教授	博士（農学） 奥田 知明
		慶應義塾大学教授	Dr.-Ing. 小尾 晋之介

学士（工学）、修士（工学）を有する冲永佳史君の学位請求論文は「医療用呼吸温湿度交換器の動的特性に関する研究」と題し、7章から構成されている。手術時はもとより、緊急医療現場など様々な場面において患者に対する人工的な呼吸管理が行われ、その際の呼吸気の温度・湿度制御は一つの重要な技術である。近年、呼吸気の温度・湿度制御のために、その簡便性や小型軽量の観点から温湿度交換器（Heat and Moisture Exchanger with Filter : HMEF）が利用されているが、その開発や改善は医療側からの経験的な方法で行われてきたのが一般であり、最適な機器構造にまで至っているか否かは定かではない。特に HMEF では呼気と吸気が交互に流れる状態を利用しているため、その内部における熱および水蒸気の動的な挙動が加湿・除湿性能を左右する支配的な現象であると考えられ、その動的挙動を明らかにすることは極めて重要である。本論文は、HMEF 内部の温度・湿度の時間変化といった動的特性を実験的に明らかにするとともに、数値シミュレーションによってその温湿度交換現象における動的挙動の詳細と物理的メカニズムを明らかにした内容となっている。

第 1 章は序論であり、HMEF に関する従来の研究、および本研究の目的が述べられている。第 2 章では、本研究で使用した実験装置および計測方法、および数値シミュレーションのために構築した一次元解析モデルとその数値計算手法について、それらの詳細が述べられている。第 3 章では、HMEF において呼気から吸気へとステップ的に供給変化させた場合の過渡応答特性について検討を行っている。結果として、HMEF では呼気中において水分がスポンジと吸湿剤の CaCl_2 に凝縮し、その水分が乾燥した吸気中に蒸発するという水分の吸収・放出現象を確認すると共に、 CaCl_2 の潮解がその水分の吸収に特に大きく寄与していることを明らかにしている。第 4 章では、呼気吸気の繰り返し周期を変化させ、その周期応答特性について検討を行っている。結果として、周期が長い場合には CaCl_2 における活発な水の凝縮・蒸発により気体の湿度および温度に顕著な変化が現れるが、周期が短い場合には非定常性の影響が強くなることで湿度および温度の変化が小さくなることを明らかにしている。第 5 章では、塩化カルシウムを含浸させたスポンジ部の厚さおよび HMEF の全長の影響について、数値解析結果をもとに検討を加えている。その結果、単位重量当たりの CaCl_2 に保持される水分量はスポンジ厚さが薄いほど大きくなり、また HMEF の全長が長くなるほど気体の湿度および温度の変動振幅が小さくなることを明かにしている。第 6 章では、塩化カルシウムの初期状態、および HMEF の空洞部および接続部の影響について数値解析により検討を加えている。結果として、空洞部および接続部に適切なモデルを設定することで実験と数値解析の間に定量的一致が見られたこと等から、それらの影響が HMEF の応答特性に重要な役割を演じていることを明らかにしている。最後に第 7 章では、本論文の結論および今後の課題について述べている。

以上要するに、本論文の成果は HMEF における呼吸気の温度、湿度の動的特性を詳細に明らかにするとともに、その動的特性の物理的メカニズムについても解明しており、HMEF の設計開発や最適化を行う際に有用となる多くの知見を与えるなど、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 6069 号	氏 名	芝 慎太郎
主論文題名：			
Estimating Motion with an Event Camera (イベントカメラによる動き推定)			
<p>カメラを用いた動きの推定は、コンピュータビジョンやロボティクスにおける基本的な問題の一つである。生物に着想を得た新しいセンサであるイベントカメラは、画像平面上のエッジの動きなどによって引き起こされる画素の輝度の変化に反応するため、動きの推定に適したデータを得ることができる。非同期的で時空間的なデータ取得原理によって、低遅延、高ダイナミックレンジ、データ効率性などの利点をもつため、イベントカメラは従来のフレームカメラでは困難だった環境での活躍が期待されている。しかしながら、イベントベースで動き推定をおこなう最先端の手法には、いくつかの課題がある：(i) 典型的な目的関数は、複雑な自己動き（エゴモーション）やオプティカルフロー推定において、望ましくない最適解を持ち、推定が不安定である。(ii) イベントベースのオプティカルフロー推定は、イベントの時空間的な性質を考慮してきていない。(iii) 既存のオプティカルフロー手法の多くは、生物学的に妥当であるとは言い難い。本研究では、イベントデータの性質を再考することで、自己動きやオプティカルフローといった様々な動き推定問題における不良な設定を改善し、新しいフロー推定手法を提案する。さらに、イベントベースの動き推定の応用として、新たなイメージング技術を開発する。</p> <p>第1章では、イベントカメラを用いた動き推定問題の概要を提示し、本研究の貢献についてまとめる。</p> <p>第2章では、イベントカメラの原理と、イベントカメラを用いた様々な自由度の動き推定に関する既存の手法を概観する。</p> <p>第3章では、低自由度の自己動き推定問題に注目し、イベントのみから動きを推定するコントラスト最大化法の改良を提案する。この章の目標は、速度を犠牲にすることなくイベント崩壊（縮退）を緩和することで、より高度で複雑な自己動き推定問題を安定的に解くことである。</p> <p>第4章は、高自由度のオプティカルフロー推定問題に焦点を当て、コントラスト最大化法を拡張することでオプティカルフローを推定する原理的な方法を提案する。さらに、オプティカルフローの定義をフレームベースからイベントベースの時空間オプティカルフローに拡張し、遮蔽をよりよく処理できることを示す。</p> <p>第5章では、神経科学の知見に基づいた、生物学的により妥当なオプティカルフロー推定手法を新たに提案し、第4章の手法とも比較しながら、実行速度と推定精度のトレードオフについて議論する。</p> <p>第6章では、動き推定の応用として、イベントカメラを使用したシュリーレンイメージング技術を開発し、空気の熱対流を推定する手法を提案する。ここでは、第4章で提案したフロー推定手法とも比較しながら、線形化イベント生成モデルを拡張し、イベントとフレームを用いてシュリーレンのような複雑な運動を推定する新しい手法を提案する。</p> <p>第7章では、本研究の成果をまとめ、今後の課題について議論する。</p>			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6069 号	氏 名	芝 慎太郎
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
	ベルリン工科大学教授	Ph.D.	Guillermo Gallego
	ペンシルバニア大学教授	Ph.D.	Kostas Daniilidis

学士（教養）、修士（学術）芝慎太郎君提出の学位請求論文は、「Estimating Motion with an Event Camera」（イベントカメラによる動き推定）と題し、7章から構成されている。

カメラを用いた動きの推定は、コンピュータビジョンやロボティクスにおける基本的な問題の一つである。生物に着想を得た新しいセンサであるイベントカメラは、画像平面上のエッジの動きなどによって引き起こされる画素の輝度の変化に反応するため、動きの推定に適したデータを得ることができる。非同期的で時空間的なデータ取得原理によって、低遅延、高ダイナミックレンジ、データ効率性などの利点をもつため、イベントカメラは従来のフレームカメラでは困難だった環境での活躍が期待されている。しかしながら、イベントベースで動き推定をおこなう最先端の手法には、いくつかの課題がある。例えば、これらの手法で用いられている典型的な目的関数は、複雑な自己動きやオプティカルフローの推定が不安定である。また、イベントベースのオプティカルフロー推定は、イベントの時空間的な性質を考慮していない。

本研究では、イベントデータの性質を再考することで、自己動きやオプティカルフローといった様々な動き推定問題における不良な設定を改善し、新しいフロー推定手法を提案している。さらに、イベントベースの動き推定の応用として、新たなイメージング技術を開発している。

第1章では、イベントカメラを用いた動き推定問題の概要を提示し、本研究の貢献について述べている。

第2章では、イベントカメラの原理と、イベントカメラを用いた様々な自由度の動き推定に関する既存の手法を概観している。

第3章では、低自由度の自己動き推定問題に注目し、イベントのみから動きを推定するコントラスト最大化法の改良を提案している。速度を犠牲にすることなくイベント崩壊（縮退）を緩和することで、より高度で複雑な自己動き推定問題を安定的に解く手法について述べている。

第4章は、高自由度のオプティカルフロー推定問題に焦点を当て、コントラスト最大化法を拡張することでオプティカルフローを推定する原理的な方法を提案している。さらに、オプティカルフローの定義をフレームベースからイベントベースの時空間オプティカルフローに拡張し、遮蔽をよりよく処理できることを示している。

第5章では、神経科学の知見に基づいた、生物学的により妥当なオプティカルフロー推定手法を新たに提案し、第4章の手法とも比較しながら、実行速度と推定精度のトレードオフについて議論している。

第6章では、動き推定の応用として、イベントカメラを使用したシュリーレンイメージング技術を開発し、空気の熱対流を推定する手法を提案している。第4章で提案したフロー推定手法とも比較しながら、線形化イベント生成モデルを拡張し、イベントとフレームを用いてシュリーレンのような複雑な運動を推定する新しい手法を提案している。

第7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自己動きやオプティカルフローといった動き推定の諸問題を改善する新たな手法を提案し、実用上の有効性を示したもので、画像情報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6070号	氏名	林 秀一郎
主論文題名： Laser-induced carbonization and graphitization of a transparent elastomer (透明エラストマーのレーザ炭化と黒鉛化)			
<p>カーボンブラック、グラファイト、ダイヤモンド、カーバイド等の炭素材料はそれぞれ固有の材料特性を有しており、幅広く応用されてきた。また、これらの炭素材料を基板となる別の材料上にパターンニング可能な技術の発展により炭素材料の特性を活用した新規デバイスの作製が可能となる。レーザ炭化と黒鉛化は、基板となる高分子材料にレーザ光を照射し走査することのみで炭素材料から構成される炭素構造を任意の形状で作製可能である。本論文では、透明エラストマーであるポリジメチルシロキサン (PDMS) とレーザ光の相互作用について議論し、レーザ炭化と黒鉛化により炭素構造が生成する過程および炭素構造の電気伝導性における炭素材料の寄与を明らかにし、炭素構造を用いた応用実証を目的とした。本論文は次の7章で構成されている。</p> <p>第1章は序論である。我々の身の回りに存在する炭素材料ならびに炭素材料を生成または炭素構造をパターンニング可能な技術について述べた。続いて、レーザ炭化と黒鉛化について概説し、これまでの研究動向を提示した後、本研究の目的と意義を述べた。</p> <p>第2章では、炭化および黒鉛化における過程、また光と物質との相互作用についてそれぞれ述べた。更に、レーザ炭化と黒鉛化において高分子材料にレーザ光を照射した際に誘起される化学および物理現象について議論した。</p> <p>第3章では、PDMS へのレーザ光照射による炭素構造作製に関する研究について述べた。PDMS へ連続光やパルス光を照射し炭素構造作製を行い、レーザ炭化と黒鉛化により炭素構造が生成する過程について議論した。</p> <p>第4章では、レーザ炭化と黒鉛化により作製した炭素構造の電気伝導性に関する研究について述べた。レーザ炭化と黒鉛化による導体炭素構造および半導体炭素構造の作製を実証し、炭素材料の寸法や生成量が炭素構造の電気特性にもたらす影響について議論した。</p> <p>第5章では、炭素構造の電気特性を活用した応用研究について述べた。炭素構造を圧縮または屈曲させることで炭素構造の圧抵抗特性を評価した。更に、圧抵抗特性を活用した微小圧力センサおよび異方性ひずみセンサの作製を実証した。</p> <p>第6章では、光学応用への展開を目的とした PDMS のレーザ炭化と黒鉛化に関する研究を述べた。レーザ光を PDMS 表面に集光照射することで蛍光特性を有した炭素構造が作製可能であることを明らかにし、蛍光特性を活用した偽造防止タグの作製を実証した。更に、多光子相互作用を利用することで、PDMS 表面のみならず PDMS 内部においても蛍光特性を有した炭素構造が三次元的に作製可能であることを示した。</p> <p>第7章は、本論文の結論であり、本研究の成果を総括し、今後の展望を述べた。</p>			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6070 号	氏 名	林 秀一郎
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 寺川 光洋
	副査	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） 柿沼 康弘
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 野田 啓

学士（工学）、修士（工学）林秀一郎君提出の学位請求論文は「Laser-induced carbonization and graphitization of a transparent elastomer」（透明エラストマーのレーザ炭化と黒鉛化）と題し、7章から構成されている。

炭素材料は化学構造により異なる材料特性を示し、任意の形状にパターンニングすることでその特性を活用した新規デバイスの作製が可能となる。レーザ炭化と黒鉛化は、前駆体となる高分子材料にレーザ光を照射し走査することで任意の形状の炭素構造を作製可能であり、高分子材料の特長を活用した軽量かつ変形可能なデバイスが創出できると期待されている。本論文では、透明エラストマーであるポリジメチルシロキサン（PDMS）とレーザ光の相互作用について議論し、レーザ炭化により炭素材料が生成する過程および生成材料と電気特性の関係を明らかにするとともに、実験研究による応用実証を目的としている。

第1章では、関連学術分野における研究事例を概説し、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、炭化および黒鉛化を中心に、次章以降で述べる実験研究の基盤となる物理現象および化学反応を論じて体系化している。

第3章では、PDMSへのレーザ光照射による炭素構造作製に関する実験研究について述べている。PDMSへ連続波もしくはレーザパルス照射を照射し走査することで炭素構造が作製可能であることを実証している。また、レーザ炭化と黒鉛化により炭素材料が生成する過程について議論している。

第4章では、PDMSのレーザ炭化と黒鉛化により作製した炭素構造が示す電気特性について述べている。PDMSのレーザ炭化と黒鉛化により作製可能な炭素構造は導体特性もしくは半導体特性を示し、生成した炭素材料の寸法ならびに生成量と電気特性の関係について議論している。

第5章では、PDMSの伸縮特性と炭素構造の電気特性を活用した応用研究について述べている。炭素構造を圧縮または屈曲させることで炭素構造の圧抵抗特性を評価している。更に、圧抵抗特性を活用した微小圧力センサおよび異方性ひずみセンサが作製できることを実証している。

第6章では、光学応用への展開を目的とした研究を述べている。レーザ光をPDMS表面に集光照射することで蛍光を示す炭素構造が作製可能であることを明らかにしている。またPDMSの光学的透明性および炭素構造の蛍光特性を活用した偽造防止タグの作製が可能であることを実証している。更に、PDMS表面のみならずPDMS内部においても蛍光特性を示す炭素構造が作製できることを示している。

第7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、本論文はレーザを用いた炭素構造の作製技術を発展させ、透明エラストマーを活用したデバイスの実現に資するものであり、レーザ工学分野において、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 6071 号	氏 名	三田 夏大
主論文題名：			
銅合金条材の疲労強度および疲労き裂進展特性に関する研究			
<p>銅合金条材は自動車の急速な電動化、機電一体化、電装系の小型化、更に自動運転の開発進展に伴い、今まで以上に電子機器、電子部品に多く用いられるようになりつつある。それらに用いられる銅合金条材は走行時の振動や衝撃にさらされるため、銅合金条材の高サイクル疲労特性および平均応力、応力振幅の疲労特性への影響が求められるが、完全には明らかになっていない。また、銅合金条材の振動、衝撃下での疲労き裂進展予測は重要であるがほとんど明らかにされていない。そこで本研究では銅合金条材の高サイクル疲労特性、平均応力、応力振幅の影響による疲労特性、疲労き裂進展特性を明らかにすることを目的とした。</p> <p>第1章は序論であり、本研究の背景および目的、従来の研究を概説した。</p> <p>第2章では、銅合金条材の圧延方向、板厚の違いが及ぼす疲労強度への影響について検討した。日本伸銅協会技術基準にある条材疲労試験機において、高サイクル疲労試験の試験時間短縮、安定かつ高精度に測定するための試験方法を提案した。そして、提案する手法を用いて、銅合金条材の疲労試験を行い、圧延直交方向に負荷される場合の方が、疲労寿命が長くなることを明らかにし、破面分析からその原因について考察を加えた。</p> <p>第3章では、銅合金条材の疲労特性への平均応力と応力振幅の影響を把握する為、銅合金条材における疲労限度線の検討を行った。平均応力や応力振幅を種々変えた試験を行う必要があるため、新たな試験片形状および試験方法を構築し、それを用いて疲労限度線検討の為の疲労試験を実施した。さらに、表面電解メッキ処理が及ぼす疲労特性への影響も検討した。その結果、Cu-Si-Ni 銅合金条材において、疲労限度線は Elliptic 線で近似できることを明らかにした。さらに、表面電解メッキ処理の疲労特性への影響は、メッキの機械的特性よりも表面粗度の影響のほうが強く、表面粗度の管理が重要であることを指摘した。</p> <p>第4章では、銅合金条材における疲労き裂進展試験に及ぼす圧延方向の影響について検討した。薄板銅合金条材における疲労き裂長さ測定手法を目視、画像解析、直流電位差法にて比較評価した。その後、最適な疲労き裂長さ測定手法を適宜用いて、疲労き裂進展試験を行った。そして、き裂進展開始の初期段階では、き裂進展方向が圧延方向と圧延直交方向の場合で、同程度の疲労き裂進展特性を有しているが、安定き裂成長段階および最終破壊段階では、き裂進展方向が圧延方向のほうが、圧延直交方向よりもき裂進展抵抗が低く、き裂進展速度が速くなることを明らかにした。</p> <p>第5章では、第4章で得られた疲労き裂進展特性の圧延方向依存性について、破面解析から破面形状を明らかにし、それをもとにした3次元有限要素解析から、疲労き裂進展駆動力である J 積分値を求めた。そして、破面形状の違いから、き裂進展方向が圧延方向では局所的に J 積分値が圧延直交方向より高くなり、き裂進展速度が速くなりやすいことを明らかにした。</p> <p>第6章に、各章で得られた成果を要約し、本研究の結論および今後の展望についてまとめた。</p>			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6071 号	氏 名	三田 夏大
論文審査担当者：	主査 慶應義塾大学教授	博士（工学）	大宮 正毅
	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	工学博士	小茂鳥 潤
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	閻 紀旺
<p>学士（工学）、修士（工学）三田夏大君提出の学位請求論文は「銅合金条材の疲労強度および疲労き裂進展特性に関する研究」と題し、6章から構成されている。</p> <p>自動車の急速な電動化、自動運転の開発進展に伴い、車載電子機器に使われる銅合金条材は、信頼性保証の観点から、その疲労特性の把握が重要となってきている。本研究では、銅合金条材の高サイクル疲労特性および疲労き裂進展特性を明らかにし、銅合金条材部品開発における疲労強度設計指針を確立することを目的としている。</p> <p>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。</p> <p>第2章では、銅合金条材の圧延方向、板厚の違いが及ぼす疲労強度への影響について検討している。まず、日本伸銅協会技術基準に準拠した条材疲労試験機において、高サイクル疲労試験結果の安定化、高精度化、試験時間の短縮化に取り組み、そのための試験方法を提案している。さらに、提案する手法を用いて、銅合金条材の疲労試験を行い、圧延直交方向に負荷される場合の方が、疲労寿命が長くなることを明らかにし、破面分析からその原因について考察を加えている。</p> <p>第3章では、銅合金条材の疲労強度に及ぼす平均応力の影響について検討している。U字型条材試験片を一行に並べた試験ユニットを新たに開発し、多数の疲労試験を同時に行うことを可能にしている。そして、銅合金条材において疲労限度線はElliptic線で近似できることを明らかにしている。</p> <p>第4章では、疲労き裂進展特性に及ぼす圧延方向の影響について検討している。はじめに、薄板材における疲労き裂長さ測定手法について、種々の方法を比較検討している。次に、疲労き裂進展試験を行い、き裂進展開始初期段階では、圧延方向の影響はないが、安定き裂成長および最終破壊段階では、き裂進展方向と圧延方向が一致する場合に、き裂進展速度が速くなることを見出している。</p> <p>第5章では、第4章で得られた疲労き裂進展特性の圧延方向依存性について、破面形状を再現した3次元有限要素解析から考察し、き裂進展方向と圧延方向が一致する場合、局所的にき裂進展駆動力であるJ積分値が高くなり、その結果、き裂進展速度が速くなると結論付けている。</p> <p>第6章では、各章で得られた成果をまとめ、本論文全体の結論として銅合金条材部品における疲労強度設計指針を提示し、今後の展望について述べている。</p> <p>以上要するに、本論文では銅合金条材における疲労強度特性を明らかにするとともに、それをもとにした銅合金条材部品における疲労強度設計指針を提示しており、材料力学および材料強度学分野において、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。</p>			

内容の要旨

報告番号	甲 第6072号	氏名	妹尾 卓磨
主論文題名： A Study on Designing a Deep Reinforcement Learning Library towards Practical Applications (応用を見据えた深層強化学習ライブラリ設計の研究)			
<p>深層強化学習はさまざまなドメインで研究されている。再利用可能なライブラリを開発することは、深層強化学習の研究開発を加速するのに重要である。これまで多くの深層強化学習ライブラリが強化学習アルゴリズムの研究用途として提案されてきた。しかし、既存のライブラリは他ドメインへの応用の容易さや既存の強化学習アルゴリズムを上回る性能の提供といった点において、深層強化学習アルゴリズムの応用を十分にサポートできていない。</p> <p>本論文では、強化学習アルゴリズム研究用途での要件を満たしつつ、深層強化学習アルゴリズムの応用に向けて設計された初めての深層強化学習ライブラリ Data-Driven Deep Reinforcement Learning Library (d3rlpy) を提案する。d3rlpy はオフライン強化学習のサポートと汎用分散 Q 関数のサポートという 2 つの大きな特徴がある。オフライン強化学習をサポートすることによって、従来のライブラリでは扱うことができなかったドメインへの深層強化学習の応用を可能にする。また、汎用分散 Q 関数のサポートによって、ユーザが学習アルゴリズムを修正することなく方策の性能を改善できる。</p> <p>最初に、オフライン強化学習は事前に集められた静的経験データセットに対して方策関数を最適化する強化学習のパラダイムである。d3rlpy ではオフライン強化学習をサポートすることでロボティクスや医療治験のようなオンラインでの試行錯誤が困難なドメインを扱うことができる。また、d3rlpy を利用してオフライン強化学習の大規模なベンチマークを行うことで実装の品質の保証を行う。さらに、得られた学習結果を利用し、オフライン強化学習のベンチマーク方法の妥当性を検証することで d3rlpy が深層強化学習の新しい知見を与えられることも示す。</p> <p>次に、分布型強化学習は Q 関数の学習において環境からの収益を期待値のスカラー値として学習するのではなく、収益を確率分布としてとらえて学習する手法であり、分布型強化学習アルゴリズムを利用することで大きく性能が改善できることが知られている。分布型強化学習の仕組みを任意の強化学習アルゴリズムと組み合わせることで、もとのアルゴリズムよりも高い性能の方策関数を得られることが期待できる。分布型強化学習はおもに離散行動向けのアーキテクチャで研究されており、連続行動タスクのための Actor-Critic のアーキテクチャにおいても汎用的に性能が改善できるかを検証する必要がある。そこで、事前実験としてメモリモジュールを Q 関数に組み合わせた深層強化学習手法 Policy Gradients with Memory-Augmented Critic (PGMAC) を提案する。PGMAC では Q 関数の近似方法のみを変更し、メモリモジュールによるバイアスと分散の制御を行うことで、Q 関数の性能変化が方策関数の性能に与える影響を検証する。Q 関数の改善を行うことで、アーキテクチャによらずに方策関数の性能を向上できるという実験結果にもとづいて、d3rlpy では汎用分布型 Q 関数のサポートを行う。汎用分布型 Q 関数のサポートによって、ユーザは内部の深層強化学習アルゴリズムを自分で改良することなく、もとのアルゴリズムよりも高い性能の方策関数を学習できる。実験では、連続行動タスクにおいて汎用分布型 Q 関数を利用することで性能が向上することを示す。</p> <p>最後に、ユーザ分析を行い、d3rlpy が多様なドメインで利用されていることを示すことで、本研究が強化学習の研究開発を支援可能な深層強化学習ライブラリ設計であることを示す。また、より多様なユーザが深層強化学習アルゴリズムを利用できるようにするための将来研究についても議論する。</p>			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6072 号	氏 名	妹尾 卓磨
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 天野 英晴
		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） 川島 英之

学士（工学）、修士（工学）妹尾卓磨君提出の学位請求論文は、「A Study on Designing a Deep Reinforcement Learning Library towards Practical Applications」（応用を見据えた深層強化学習ライブラリ設計の研究）と題し、全 8 章で構成される。

本論文は、深層強化学習アルゴリズムの実用を見据えたソフトウェアライブラリ設計について論じている。深層強化学習の分野におけるライブラリとは、さまざまなアルゴリズムを統一されたインターフェースで提供する再利用可能なソフトウェアのことを指す。一つのライブラリで、多様な課題設定への適用を可能にし、強力なアルゴリズムを手軽に学習できるようにすることは、深層強化学習アルゴリズムの応用を推し進めるために重要である。本論文は、深層強化学習アルゴリズムの応用を支援するライブラリとして `d3rlpy` を提案しており、オフライン強化学習のサポートと汎用分布型 Q 関数モジュールの 2 つの機能を実装している。また、大規模なベンチマークテストとユーザ分析によって提案しているソフトウェアを検証している。

第 1 章では、従来の深層強化学習ライブラリの特定のユースケースのみへの対応や性能の再現性のみを追求した設計という点を問題として挙げ、応用用途に向けた機能要件を論じている。

第 2 章では、本論文の前提となる知見を説明した上で、従来の深層強化学習ライブラリの紹介をしている。また、基礎研究用途の機能と応用用途の機能の二つの観点でそれぞれのソフトウェアを整理し、本研究の位置づけを明確化している。

第 3 章では、提案するソフトウェアライブラリの全体のアーキテクチャの説明とコンポーネントを紹介している。

第 4 章では、オフライン強化学習のサポートを提案している。これは、事前に集められた行動データセットのみを用いて方策関数を最適化するパラダイムであり、従来のソフトウェアではサポートされていない。本章ではオフライン強化学習をサポートするためのライブラリ設計を提案し、大規模なベンチマークテストを行うことで妥当性を検証している。また、大量の実験結果を利用することで、オフライン強化学習における新たな科学的な知見を提供することにも成功している。

第 5 章では、汎用的にアルゴリズムの性能を改善する枠組みの事前実験として、方策勾配法アルゴリズム `PGMAC` を提案している。`PGMAC` の Q 値推定のバイアスと分散を制御できる機構によって、 Q 関数の性能を改善することで方策関数の性能を改善できることを実験で検証している。

第 6 章では、アルゴリズムの実装を変更せずに幅広い用途で性能を改善できる機能として、汎用分布型 Q 関数モジュールの定式化と設計を提案し、ベンチマークテストで妥当性を検証している。

第 7 章では、提案しているソフトウェアのユーザ分析を行い、実際に多くのユーザが多様なドメインに対して `d3rlpy` を利用していることを示している。

最後に第 8 章では、本論文で得られた成果と結論についてまとめて、将来の展望を述べている。

以上、本論文は、深層強化学習アルゴリズムの応用を見据えたソフトウェアライブラリを提案・設計・実装し、大規模なベンチマークテストとユーザ分析によって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 6073 号	氏 名	福岡 正彬
主 論 文 題 名 :			
A Study on Sensory Attenuation with Virtual Supernumerary Robotic Limbs Controlled by Facial Movements (顔の動きによるバーチャル拡張身体の操作における感覚減衰の研究)			
<p>ウェアラブルロボットアームに代表される拡張身体の開発において、より直感的でユーザーフレンドリーな操作手法が求められている。本論文では、顔の動きを利用して拡張身体を操作する手法を開発した。この手法を用いて操作者の生得的な手足が他のタスクを行っている際に、手足の動きを阻害せずに拡張身体が操作可能であることを明らかにした。顔の動きを拡張身体の操作手法として使用することで、顔の持つ高い自由度を活用した直感的な操作コマンドを生成することが期待できる。</p> <p>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、顔の動きを利用した拡張身体の手法を構成する要件について検討する。</p> <p>次に、研究の第一部では、顔の動きで拡張身体を操作する手法を提案する。バーチャルリアリティ (VR) と機械学習を組み合わせたシステムを開発し、拡張身体の基本動作と顔の動きの対応関係を探索した。タスクパフォーマンスと主観評価によってシステムの機能性を評価した結果、実験参加者は任意の顔の動きを使って拡張身体を操作し、物体把持や移動のタスクを実行できることが示された。分析の結果、意味論に基づく操作コマンドと顔の動きの割り当ての重要性が明らかとなり、拡張身体操作の文脈における身体認知に関するさらなる研究の必要性が示唆された。</p> <p>研究の第二部では、顔の動きで拡張身体を操作する際の感覚減衰を測定するために、モバイル機器上で動作する VR システムを開発した。本システムは顔における特定部位の形状変化を検出し VR 上でロボットアームの動作に紐づけた。このシステムによって、COVID-19 の影響下における非接触環境での拡張身体における感覚減衰の計測実験を行った。実験においては、拡張身体の手動操作に伴う音刺激の感覚減衰を計測した。実験参加者は顔の動きで拡張身体を操作し、VR 上のボタンを押して標準音を再生した。標準音の再生に伴い受動的に比較音が再生された。標準音と比較音の大きさを比較し主観的等価点を算出した。これに伴い、条件間において主観的等価点を比較することで感覚減衰を評価した。感覚減衰と行為主体感及び身体所有感の相関を分析した。その結果、拡張身体において感覚減衰が発生することが明らかとなった。また、行為主体感において拡張身体と生得的な身体との間に有意差が見られた。拡張身体の手動操作による感覚減衰は身体所有感との間に相関が見られた。これらの結果は、感覚減衰が拡張身体の手動操作指標として用いることができることを示唆しており、拡張身体に関する認知メカニズムの理解に貢献する。</p> <p>結論として、本論文は、生得的な手足の自由度を阻害することのない顔の動きを用いた拡張身体の手動操作手法を確立し、拡張身体における感覚減衰の理解を深めることで、拡張身体の手動操作および評価指標の開発に貢献するものである。</p>			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6073 号	氏 名	福岡 正彬
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
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	今井 倫太
	豊橋技術科学大学教授	博士（学術）	北崎 充晃

学士（デザイン学）、修士（メディアデザイン学）福岡 正彬君提出の学位請求論文は、「A Study on Sensory Attenuation with Virtual Supernumerary Robotic Limbs Controlled by Facial Movements（顔の動きによるバーチャル拡張身体の操作における感覚減衰の研究）」と題し、6章で構成されている。

人間拡張（Human Augmentation）の研究分野では、ウェアラブルロボティクス技術や、バーチャルリアリティ（Virtual Reality: VR）環境における身体を用いることによって、物理的な人間の身体の制約を超えた新しい人間の能力拡張の可能性が探求されている。本論文では、身体拡張によって獲得することができる新しい身体の自由度を操作者の表情の機械学習を通じて操作する手法の提案、VR環境を用いた操作性の検証と身体認知への影響を聴覚刺激に対する感覚減衰を通じて示した研究成果についてまとめたものである。

第1章では、拡張身体のコセプトと、身体認知における主観評価として身体所有感及び行為主体感について概観し、身体認知の暗黙的な指標として順モデルの形成に基づく感覚減衰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、四肢の動きに依存しない拡張身体の手法を構築し、その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、表情認識、感覚減衰について関連研究をまとめている。また、これらの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環境を用いた拡張身体の手法の検証について概説している。併せて、拡張身体の手法、身体動作と拡張身体のマッピング関係の検証、及び身体認知の検証について触れ、検証に用いるシステム的设计要件として述べている。

第4章では、顔の動きを使用した拡張身体の手法を開発し、評価している。頭部装着型ディスプレイ組込型光計測システムを用いた顔表面形状の計測と機械学習を用いた操作コマンドの生成手法を示した後、物体保持・配置課題によって、拡張身体の基本4動作（握る・離す・伸ばす・縮める）に紐づきやすい顔の部位及び顔の変形を評価している。実験の結果、参加者が任意の顔の動きを用いて基本的な拡張身体の動きを操作できた。また、拡張身体の手法と意味空間において近い顔の部位と顔の変形が操作コマンドに紐づきやすい傾向があることを示唆している。

第5章では、顔の動きを使用した拡張身体操作において、能動的操作に関連する音声刺激の感覚減衰を検証している。実験の結果、参加者が顔の動きで拡張身体を操作すると、身体運動によって生じられる聴覚刺激と無作為に与えられる標準聴覚刺激の比較において感覚的等価点に変化し、拡張身体においても順モデルに基づく感覚減衰が引き起こされる可能性を示した。また、拡張身体において身体所有感と感覚減衰との間に相関が見られ、感覚減衰が拡張身体の身体化指標として扱える可能性があることを示唆している。

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、本論文で提案した顔の動きに基づく拡張身体操作の実現可能性と、身体拡張に伴う感覚減衰の理解に貢献した。将来的な指針として、長期的な拡張身体の手法による身体認知の変化と、身体化を向上する指標として感覚減衰の役割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ウェアラブルロボティクス技術によって実現される身体拡張をVR環境においてシミュレーションするシステムを構築し、装着型のロボットアームによって獲得できる新たな自由度を操作者の生得的な身体の自由度のマッピングを通じて操作した条件において身体認知に与える影響を感覚減衰の解析を通じて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6074号	氏名	田中 克弘
主論文題名：			
変数選択制約と楕円形判別面を考慮した 信用リスク判別モデルの効率的解法と評価			
<p>本論文は、個別企業の格付の分類に注目する。この分類をモデルにより実施した初期の研究に、1968年に Altman が提案した財務データを用いた存続企業と倒産企業を分類するための線形回帰式がある。ここから今日までに様々な分類モデルが提示されてきた。</p> <p>その分類モデルの中で、2005年に提示された Conditional value-at-risk 最小化モデルおよび 2019年に提示された buffered area under the curve (bAUC) 最大化モデルを取り上げる。その共通の理由は、ハイパーパラメータが僅か一つであり、また誤判別を示す分布のある指標が、統計学で使われているため、水準を設定しやすくなっていることである。</p> <p>その分類モデルの性能をより向上する二つのアイデアを取り上げる。一つは、半正定値制約を用いて判別面を線形から楕円形に拡張することである。これにより、説明変数の線形性だけでなく、二次の効果並びに変数間の相互関係が表現できる。もう一つは 0 か 1 に解を限定した離散変数の導入により、50 個の候補から 10 個程度までに変数選択を実行することである。この二つのアイデアを同時に適用した例は見られないため、それらを組み入れた統計型信用リスクモデルを提案する。</p> <p>これらの改良を行う際の一番の課題は、パラメータの推計問題が混合整数半正定値計画問題 (MISDP) となり、短時間の計算終了が難しい点である。これは、MISDP の解を得るためには、専用のアルゴリズムを用いるためである。</p> <p>MISDP を求解するための既存アルゴリズムには、2002年に提案された切除平面アルゴリズム、および、より高速化した 2020年に提案された分枝切除アルゴリズムがある。先行研究から、データサンプルが 50 個程度であれば、数時間で解を得られるが、今回対象とするデータサイズは数百個程度とより大きいので、数時間で解を得られることは期待できない。そこで、MISDP を直接一回で計算せず、三段階に問題を分割することで、計算時間を削減し、良質な解を得るためのヒューリスティックアルゴリズムを提案した。</p> <p>提示した二つの分類モデルを対象に、比較実験したところ、ヒューリスティックアルゴリズムはより短い計算で、大きな精度劣化がない解を得られた。特に、問題の規模が大きい bAUC 最大化モデルに適用する際は、事前に離散変数を減少して問題削減する改良を行い、より高速化できた。</p> <p>併せて、楕円形は線形より分類の性能が高いことも確認した。更に bAUC 最大化モデルは、標準的な 4 つの機械学習モデルと比較することで、その優位性を示した。またそれはそのモデルの持つ極端に誤った判別を行う可能性 (テイルリスク) を抑え込む特徴のためである。</p> <p>今後の課題では、説明変数の候補の個数が 50 個以上となった場合の変数選択を短時間で実行できる手法の開発および複数の格付分類のように多値問題への拡張があげられる。どちらも適用することで、MISDP による分類問題が実務上の課題が解決できるよう活用したい。</p>			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6074 号	氏 名	田中 克弘
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 山本 零
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 枇々木 規雄
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 今井 潤一
		一橋大学大学院教授	博士（数理科学） 中川 秀敏
<p>学士（工学）、修士（工学）の田中克弘君提出の学位請求論文は「変数選択制約と楕円形判別面を考慮した信用リスク判別モデルの効率的解法と評価」と題し、全6章より構成されている。</p> <p>金融分野において信用リスク評価は、金融機関の与信管理、運用機関のリスク管理など様々な金融実務で使用されている重要なテーマである。信用リスクを推計するモデル、推計精度を向上させる手法はこれまで数多く提案されており、本論文は統計型モデルの推計精度を向上させるための研究に位置づけられる。本論文では統計型モデルの中でも問題の構造が単純で取り扱いやすいサポートベクターマシン（SVM）と近年提案され問題の構造が複雑な AUC 最大化モデルを取り上げ、その推計精度を向上させる手法として、変数選択制約の付加と判別面の楕円形への拡張を行った。提案したモデルのパラメータ推計には混合整数半正定値計画問題という非常に複雑な最適化問題を求解する必要があるが、標準的なパッケージソフトウェアでは実用規模の問題を解くことができない。そこで本論文では混合整数半正定値計画問題を効率的に求解するヒューリスティックアルゴリズムを提案し、SVM、AUC 最大化モデルそれぞれについて変数選択制約の追加と楕円形判別面への拡張を実現した。特に AUC 最大化モデルは最適化問題の規模が非常に大きくなるため、アルゴリズムの効率性を高める提案も行っている。さらに実際の国内の企業データを用いてパラメータを推計し、アウトオブサンプルでの効果検証を行っており、提案したアルゴリズムは計算効率が高いこと、さらに提案モデルは従来モデルに比べ信用リスクの推計精度を向上させることを実証している。変数選択制約、楕円形判別面の拡張は推計精度の向上や実務での利便性向上に大きく寄与することが分かっているが、問題の構造が難しくなるため、これまでの研究で SVM や AUC 最大化に取り入れることは行われてこなかった。本論文により、これらの拡張を行うことができ、その有効性が検証できたことは高い貢献であると考える。</p> <p>第1章では、本論文の背景と目的・貢献、論文構成とその関係を述べている。</p> <p>第2章では、本論文で取り扱った統計型信用リスクモデルについて、先行研究も含めて概観を説明している。</p> <p>第3章では、変数選択制約の追加と楕円形判別面の拡張を行った際に求解する混合整数半正定値計画問題を解くためのアルゴリズムについて、従来のアルゴリズムと提案したヒューリスティックアルゴリズムを説明している。</p> <p>第4章では、サポートベクターマシンにこれらの拡張を行った問題の詳細について説明している。</p> <p>第5章では、AUC 最大化モデルにこれらの拡張を行った問題の詳細、実際の国内企業のデータを用いた実証分析の結果について説明し、提案した手法の有効性を示している。</p> <p>最後に第6章では、本論文のまとめと今後の課題を述べている。</p> <p>以上要するに、本論文においては、SVM と AUC 最大化モデルに変数選択制約の追加と判別面の楕円形への拡張を行った問題に対し、効率的な解法を示し、その有効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。</p> <p>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。</p>			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6075 号	氏 名	石飛 晶啓
主論文題名： Quasi-reversible Weathering of Rust Preventive Coating Films (防錆塗膜の準可逆的ウェザリング)			
<p>現実世界において経年劣化は普遍的な現象であり、それに伴って殆どの物体は外観も変化していく。さらに、物体を見る人にとって、経年劣化に伴う外観の変化は、長期的な時間経過を印象付けるものであり、たとえ初めて見る対象であっても、その劣化の度合いは物体の“年齢”として認識される重大な要素である。一方で、コンピュータグラフィックス (CG) で描画される仮想世界には、一般に経年劣化の影響を受けないという現実世界との本質的な差異がある。そのため、CG のオブジェクトに“年齢”を付与し、現実世界との乖離を緩和させるためには、作品に対して積極的に劣化を施す技法である、ウェザリングを施す必要がある。</p> <p>特に金属の腐食は現実世界において最も身近な経年劣化の代表例であり、ウェザリング手法も多く提案されている。ところが、劣化しやすい金属には防腐剤が塗布されることが殆どであり、金属のウェザリングのみを使用して効果的に経年劣化を表現できるシーンは限定されてしまう。既存のウェザリング手法の多くは物体の質感の変化を重視しており、変形を扱っているものは少ない。また、ウェザリング手法の多くが、物理シミュレーションを利用している。物理シミュレーションは、設定した数理モデルに基づいてある物象の状態を時間発展させていくことで、複雑な現象を再現しやすいという利点がある。しかし、CG コンテンツの生成においては時間の一方性が大きな障壁であり、パラメトリックに制御可能なモデルの方が広く用いられているのが現状である。</p> <p>そこで本研究では、塗膜における亀裂の生成と湾曲を伴う経年劣化を表現するウェザリング手法を提案する。提案手法では、塗膜を三次元空間上の三角ポリゴンメッシュでモデル化し、静力学的な力のつり合いに基づいて位相を操作することで破壊を表現するとともに、位置ベースシミュレーションに基づく頂点移動操作によって湾曲を表現する。さらに、外的作用による塗膜の劣化として、塗膜が変質するチョーキング現象、剥離箇所からの流れ錆、塵による黒ずみに注目し、ポリゴンメッシュの頂点カラーを利用してこれを表現する。以上の全ての処理について逆方向の時間発展を定義してシミュレーションの疑似的な逆行を可能にするとともに、パラメタを外部入力によって制御することで対話的に操作可能なウェザリングを実現する。</p> <p>本手法により、現実世界に見られるような亀裂や剥離箇所のパターンが表現できることを確認した。また、外部のポリゴンメッシュモデルを入力として、劣化の進行と逆行をどちらも対話的に操作できることを確認した。</p>			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6075 号	氏 名	石飛 晶啓
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（工学） 杉本 麻樹
		東京電機大学教授	博士（工学） 高橋 時市郎
<p>学士（工学）、修士（工学）の石飛 晶啓君が提出した学位請求論文は、「Quasi-reversible Weathering of Rust Preventive Coating Films（防錆塗膜の準可逆的ウェザリング）」と題し、全 10 章から構成されている。</p> <p>近年、コンピュータグラフィックス（CG）は急速にその適用範囲を拡大しており、特にメタバースのようなバーチャルワールドを構築するための要素技術としての需要がさらに高まっている。しかし、CGで描画されるバーチャルワールドには、経年劣化の影響を受けないという現実世界との本質的な差異があるため、これを緩和させるためには、傷や汚れを表現する技法であるウェザリングが必要となる。本研究では、我々の身の回りに偏在する経年劣化の例として、防錆塗膜の剥離に焦点をあて、これを表現する対話的なウェザリングシミュレーション手法を提案している。</p> <p>第 1 章では、視覚的な尤もらしさを重視するビジュアルシミュレーションとその一種であるウェザリング、それらに対話的に制御可能である必要性を述べ、提案手法の目的と貢献を要約している。</p> <p>第 2 章では、ウェザリング、変形シミュレーション、対話的シミュレーションに関連する各種の先行研究を広く概観し、本研究の立ち位置を明確にしている。</p> <p>第 3 章では、現実世界の防錆塗膜における経年劣化の基本要素を説明するとともに、それらをシミュレーションによって表現する提案手法の処理の流れを俯瞰している。</p> <p>第 4 章では、提案シミュレーションを実行するための三次元モデルのデータ構造と制御パラメタ、およびそれを構築するためのアルゴリズムを詳細に示している。</p> <p>第 5 章では、塗膜の湾曲を表現する方法を説明している。ここではまず、既存の変形シミュレーション手法である Position Based Dynamics の概要と、薄膜の湾曲に適用する際の問題点と解決策を提示し、適用の基本方針に言及している。</p> <p>第 6 章では、力の釣り合いを考慮した破壊条件に基づいてモデルの位相を操作することで塗膜の亀裂を表現するとともに、前章で述べた湾曲の表現を破壊の進行度に応じて段階的に適用することで、亀裂から剥離していくような変形を実現する手法を述べている。</p> <p>第 7 章では、塗膜の経年劣化における変形以外の要素として、汚れによる表面の質感変化に注目し、モデルの形状を考慮しながらこれを再現する方法を提案している。</p> <p>第 8 章では、シミュレーションの対話的操作を実現するための処理について説明している。具体的には、シミュレーションの監督可能性を向上させるために、第 5~7 章で述べた劣化処理の逆行を可能にし、GPU 並列計算によって対話的操作が可能な実行速度を実現したうえで、外部入力を受け付けてパラメタを操作可能にすることで、シミュレーションの直感的制御を実現している。</p> <p>第 9 章では、提案手法によって得られたシミュレーション結果を提示してその有用性を示すとともに、本研究の応用可能性や今後の展望についていくつかの実験例を示しながら詳述している。</p> <p>第 10 章では、本研究を要約し、結論を述べている。</p> <p>以上要するに、本研究で提案された防錆塗膜の対話的なウェザリング手法は、エンタテインメント向けの CG コンテンツをより写実的に表現できるという点に加え、現実世界の未来の姿としてバーチャルワールドを描く際に、経年劣化の影響を人々に強く印象付けられるという点で、工学的に寄与するところが少なくない。</p> <p>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。</p>			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6091 号	氏 名	岩井 孝法
主論文題名：			
高信頼な無線ネットワーク化制御を可能とする通信制御技術に関する研究			
<p>IoT (Internet of Things) の普及に伴い、様々な分野で無線ネットワークを介したシステム制御技術である無線ネットワーク化制御の実現が望まれている。しかしながら、従来の無線ネットワークでは、スループット等の通信サービス品質 (QoS : Quality of Service) に加えて、通信サービスの満足度に関わるアプリケーション品質であるユーザ体感品質 (QoE: Quality of Experience) や制御性能品質 (QoP: Quality of Performance) を同時に担保することが難しい。そこで本研究では、IoT アプリケーション品質の向上を目指し、高信頼な無線ネットワーク化制御を可能とする通信制御技術の提案と実証を目的とした。</p> <p>第1章に、本研究の背景と関連する研究を概説した。</p> <p>第2章では、アプリケーションを考慮したネットワーク制御技術である「アプリケーションウェアネットワーク制御」の概念およびその実現アーキテクチャを提案した。</p> <p>第3章では、アプリケーションウェアネットワーク制御の概念に基づき、IoT アプリケーションの一例である遠隔モータ制御を対象とした、共有型無線チャネルにおける帯域確保送信レート制御手法を提案した。提案手法では、無線チャネルを共有する複数のモータの必要帯域幅やネットワークの残余帯域幅を考慮しつつ、QoP であるモータ応答の収束時間要件を満たすようにデータ送信レートを決定した。従来手法である比例配分送信レート制御では達成困難であったネットワーク負荷条件における QoP の担保が、提案手法を用いることで達成可能であることをシミュレーションおよび実機評価により明らかにした。</p> <p>第4章では、IoT アプリケーションにおける無線ネットワーク化制御のユースケースとして自動運転車両の安全運転支援を想定し、第2章で提案したアプリケーションウェアネットワーク制御の概念実証について述べた。概念実証では、見通し外の交差点において車両間で位置情報をリアルタイムに共有し、車両同士の衝突を回避するシステムを構築した。MEC (Multi-access Edge Computing) サーバにおけるアプリケーションウェアネットワーク制御と、基地局における無線アクセス制御である STABLE (Simultaneous Transmission Access Boosting Low-latency) を連携させた無線ネットワーク・アクセス制御システムを開発した。また、開発した無線ネットワーク・アクセス制御システムを実装した MEC サーバおよび基地局と複数の車両を用いたフィールド実証実験を行った。フィールド実証実験では、車両があらかじめ指定された交差点危険エリアに入ると、アプリケーションからの要求である 100 ms の許容通信遅延要件が MEC サーバから基地局に対して通知され、許容通信遅延要件が満たされることを確認した。提案したアプリケーションウェアネットワーク制御と無線アクセス制御を連携させることで、見通し外の交差点において車両同士の衝突を回避できる高信頼な無線ネットワーク化制御が実現できることをフィールド実証により明らかにした。</p> <p>第5章に、結論として各章で得られた内容をまとめ、本研究の成果を要約した。</p>			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6091 号	氏 名	岩井 孝法
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士（工学） 久保 亮吾
	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） 青木 義満
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 松谷 宏紀
<p>学士（工学），修士（工学）岩井孝法君提出の学位請求論文は「高信頼な無線ネットワーク化制御を可能とする通信制御技術に関する研究」と題し，5章から構成されている。</p> <p>IoT（Internet of Things）の普及に伴い，無線ネットワークを介したシステム制御技術である無線ネットワーク化制御が注目されている．しかしながら，従来のモバイルネットワークでは，IoTアプリケーションの評価指標の1つである制御性能品質（QoP：Quality of Performance）をネットワーク装置へフィードバックすることが困難であり，QoPを担保するためのネットワークへの要求条件および通信環境の変化に応じた高信頼な無線ネットワーク化制御を実現できない．そこで本研究では，高信頼な無線ネットワーク化制御を可能とする通信制御技術の提案と実証を目的としている．</p> <p>第1章では，研究の背景と目的を概説している．</p> <p>第2章では，アプリケーションを考慮したネットワーク制御技術であるアプリケーションウェアネットワーク制御の概念およびそのアーキテクチャを提案している．</p> <p>第3章では，アプリケーションウェアネットワーク制御の概念に基づき，遠隔モータ制御の共有型無線チャンネルにおける帯域確保型送信レート制御手法を提案している．提案手法では，無線チャンネルを共有する複数のモータの必要帯域幅やネットワークの残余帯域幅を考慮しつつ，QoPであるモータ応答の収束時間要件を満たすようにデータ送信レートを決定している．従来手法である比例配分型送信レート制御では達成困難であったネットワーク負荷条件においても，提案手法を用いることでQoPの担保が可能であることをシミュレーションおよび実機評価により明らかにしている．</p> <p>第4章では，IoTアプリケーションにおける無線ネットワーク化制御のユースケースとして自動運転車両の安全運転支援を想定し，第2章で提案したアプリケーションウェアネットワーク制御の概念実証について述べている．概念実証では，見通し外の交差点において車両間で位置情報をリアルタイムに共有し，車両同士の衝突を回避するシステムを構築している．MEC（Multi-access Edge Computing）サーバにおけるアプリケーションウェアネットワーク制御と，基地局における無線アクセス制御を連携させた無線ネットワーク・アクセス制御システムにより，見通し外の交差点において車両同士の衝突を回避できる高信頼な無線ネットワーク化制御が実現できることをフィールド実証により明らかにしている．</p> <p>第5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．</p> <p>以上要するに，本論文では高信頼な無線ネットワーク化制御を実現するためのアプリケーション品質を考慮した通信制御技術を提案し，シミュレーションおよび実験によりその有効性を確認しており，通信・ネットワーク工学分野において，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．</p>			

Thesis Abstract

Registration Number	"KOU" No.6092	Name	PENG Zhen
Thesis Title			
Surface Design on Boron-doped Diamond for Electrochemical Sensor System and CO ₂ Reduction			
<p>This thesis discusses surface design to tailor the properties of boron-doped diamond (BDD) electrodes for specific fields, focusing on sensor systems and CO₂ reduction.</p> <p>O₃ and free chlorine (FC) are vital disinfectants but their interactions remain unclear. Thus, I utilize surface termination optimization to develop BDD as a working electrode for simultaneous detection, shedding light on their interaction mechanism. With the same strategy, BDD is developed as a quasi-reference electrode (QRE) to replace commercial RE difficult to miniaturize, enabling this system's portability. Furthermore, electrochemical CO₂ reduction reaction (eCO₂RR) is an effective method for converting CO₂ greenhouse gas into valuable chemicals. To enhance this process, I employ surface topography modulation to develop structured BDD as catalysts for eCO₂RR.</p> <p>Chapter 1 introduces the impact of surface design on BDD and outlines the background and purpose of this study.</p> <p>Chapter 2 describes surface terminations optimization on BDD to achieve the simultaneous detection of O₃ and FC. Only hydrogen-terminated (H-T) BDD can exhibit typical peaks for both species. With it, interactions between O₃ and FC are disclosed. At pH below 5, the detection or degradation rate of O₃ is not impacted by FC, while FC can be precisely monitored until O₃ depletes. At pH above 6, the O₃ peak rapidly vanishes in 5 min due to reactions with OH⁻ and FC.</p> <p>Chapter 3 describes the development of BDD to a QRE using the same strategy. The H-T BDD achieves enhanced stability than oxygen-terminated BDD. It shows minimal potential drift during open circuit potential tests in KCl, probably attributed to its higher capacitance due to the electrostatic adsorption of electrolyte ions on the positively charged surface. The optimized BDD as a QRE is validated, exhibiting linear responses ($R^2 > 0.99$) in detecting concentrations of FC and dopamine.</p> <p>Chapter 4 describes the effect of size modulation on eCO₂RR activity. Reducing the grain size to the submicron scale results in similar eCO₂RR activity for all BDD electrodes, irrespective of boron doping levels (B%). The highest selectivity for HCOOH falls within the 70-80% range. This B%-independent activity can be attributed to the similarly incorporated sp²-bonded carbon (around 50%) in all films due to the reduced size, which functions as active sites.</p> <p>Chapter 5 describes the effect of shape modification on eCO₂RR activity. Compared to flat BDD, rough-surfaced BDD enables around 1.7-fold increases in current and yield rate for CO production, attributed to its larger electroactive area while maintaining comparable kinetic performance. Conversely, porous BDD has the largest real area but exhibits the lowest eCO₂RR activity for CO production, possibly due to hindered diffusion of CO₂ inside the pores.</p> <p>Chapter 6 summarizes the results of this study and provides the future perspective.</p>			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6092 号	氏 名	PENG, Zhen (彭 真)
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学教授	博士 (工学)	栄長 泰明
副査	慶應義塾大学教授	博士 (工学)	緒明 佑哉
	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
<p>学士 (理学), 修士 (理学) PENG, Zhen (彭真 ホウ, シン) 君提出の博士学位請求論文は, 「Surface Design on Boron-doped Diamond for Electrochemical Sensor System and CO₂ Reduction」 (電気化学センサおよび CO₂ 還元のためのホウ素ドープダイヤモンドの表面デザイン) と題し, 6 章から構成されている.</p> <p>次世代の電極材料として, ホウ素をドープした導電性のダイヤモンド電極が注目されている. ダイヤモンド電極の電気化学特性はさまざまな因子で決定されるが, それら因子についてはまだ不明な点が多い. 本研究では, ダイヤモンド電極の終端元素の制御, ならびに多結晶ダイヤモンドの形状制御等を行い, それら因子の電気化学センサおよび CO₂ 還元による有価物生成への応用性能に及ぼす影響について詳細に調べている. さらに, 特定の終端元素をもつダイヤモンド電極は, 安定的な疑似参照電極として利用できる可能性も見出している.</p> <p>第 1 章では, 序論として, ダイヤモンド電極およびその表面修飾について概観し, 本論文の目的および概要について述べている.</p> <p>第 2 章では, ダイヤモンド電極にてオゾン水濃度および有効塩素濃度を同時に計測するための手法について述べている. 特に, ダイヤモンド電極の表面終端の最適化について検討し, 水素終端をもつダイヤモンド電極が適していることを示すとともに, 酸性溶液, 塩基性溶液, それぞれにおける挙動を詳細に調べている. 例えば, 酸性溶液においては, オゾン水濃度は有効塩素濃度に全く影響を受けないことなどを示している.</p> <p>第 3 章では, ダイヤモンド電極が疑似参照電極として利用できる可能性について述べている. 水素終端ダイヤモンド電極を用いた際には, 開回路電位が安定的に計測され, 疑似参照電極として機能することを示している. また, この現象は, 水素終端界面の静電容量が, 電解質イオンの吸着によって比較的大きくなることが原因であることを明らかにしている. さらに, これを疑似参照電極として用いることで, 有効塩素濃度やドーパミン濃度を計測することにも成功している.</p> <p>第 4 章では, CO₂ 還元用の電極としての多結晶ダイヤモンド電極の粒径依存性について述べている. サブミクロンサイズの多結晶ダイヤモンド電極は, ドープされているホウ素濃度にかかわらず良好な CO₂ 還元性能を示すことを明らかにしている. この現象は, サブミクロンサイズの多結晶には多くの粒界が存在し, そこに含まれる sp² 炭素成分が原因であることを見出している.</p> <p>第 5 章では, CO₂ 還元用の電極としての多結晶ダイヤモンド電極の形状依存性について述べている. 平板電極に比較して, 粗い面をもつダイヤモンド電極では, その表面積の増大に伴って CO₂ 還元生成物の増大が観測されるが, 細孔の多いダイヤモンド電極では, 表面積は増大するものの, 細孔内では CO₂ 還元が起こらず, 結果として CO₂ 還元性能には反映されないなどの知見を得ている.</p> <p>第 6 章では, 本論文の総括ならびに今後の展望について述べている.</p> <p>以上要するに, 本論文は, ダイヤモンド電極の表面制御を行い, その特性を明らかにするとともに, それらの電気化学応用に関する重要な知見を与えており, 電気化学分野のみならず, 材料科学分野の発展に大きく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.</p>			

内容の要旨

報告番号	甲 第6093号	氏名	寫本 慶太
主論文題名： Hybrid Position/Force Control and State Estimation for Position-and-Force-Sensorless Robots (位置・力センサレスロボットのためのハイブリッド制御および状態推定)			
<p>作業の効率化と省人化を目的とし、農業や建築、福祉などの分野で力制御機能を含めた自動化や、ロボットと人の協働が期待されている。しかし、使用環境の温度や振動により、ロボット内の精密機器であるセンサ類が故障する恐れがある。そのため、位置センサや力センサを必要としないロボットが期待されている。従来のセンサレス制御や多自由度力制御は推定誤差や振動があり、ロボットに要求される位置決め動作や反力制御には不十分であった。そこで、本研究では、位置・力センサレスなロボットのハイブリッド制御の実現に向けた、位置センサレス制御と多自由度力センサレス制御の手法考案と有効性の実証を目的とした。</p> <p>第1章では、本研究の背景と従来技術の問題点と課題、研究の目的について説明した。 第2章では、基礎技術である位置センサレス制御について説明した。 第3章では、基礎技術である外乱オブザーバと力センサレス多自由度制御、実験で用いた4自由度平行リンクマニピュレータのモデル化について説明した。 第4章では、位置・力センサレス多自由度制御を提示し、従来手法を実装した場合に所望の擦り動作を実現できなかったことを述べ、原因を考察した。 第5章では、モータ内の磁束を考慮し、回転子永久磁石磁束のN極とd軸が同期して回転するd-q軸座標系におけるクロスカップリングファクターを含む電圧方程式を導入した。位置とクロスカップリングファクターを推定する手法を考案した。推定値を反映した位置センサレス制御により位置推定誤差と振動を低減し、外乱へのロバスト性を向上したことを実験結果により示した。 第6章では、等価質量行列および力制御軸の速度により、位置制御と力制御間の干渉が変化することを式により明らかにした。接触動作中は位置制御と力制御を非干渉化し、位置制御軸に働く外乱が力制御軸に影響させない等価質量行列を考案した。擦り動作時の押し当て力振動を低減したことを実験結果により示した。 第7章では、第5章と第6章の考案内容を組み合わせ、位置・力センサレス制御系を構築した。位置・力センサレス制御を用いた4チャンネルバイラテラル制御系による力覚伝達と4自由度の平行リンクマニピュレータによる擦り動作を実現し、位置推定誤差の課題は残るが、力の振動が低減し、位置・力センサレス制御系の性能が向上したことを示した。 第8章に、結論として各章で得られた内容をまとめ、本研究の成果を要約した。</p>			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6093 号	氏 名	寫本 慶太
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 村上 俊之
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 滑川 徹
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 柿沼 康弘
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 高橋 正樹
		慶應義塾大学名誉教授	工学博士 大西 公平

学士（工学）、修士（工学）寫本 慶太 君提出の学位請求論文は「Hybrid Position/Force Control and State Estimation for Position-and-Force-Sensorless Robots」（位置・力センサレスロボットのためのハイブリッド制御および状態推定）と題し、8章から構成されている。作業の効率化と省人化のため、様々な分野で力制御機能を含めた自動化、またロボットと人の協働作業の実現が強く望まれている。そのため、どのような環境においても信頼性の高い動作制御が実現できるロボットシステムが求められている。そこで、本研究ではセンサの脆弱性を克服するため、位置・力センサレス制御とその多自由度システムへの応用に着目し、制御性能の劣化をもたらす軸干渉の新たなモデルの導入と等価質量行列を考慮した位置・力センサレスハイブリッド制御における高性能化手法を提案しその有用性を実証している。

第1章では、本研究の目的を述べ、モータドライブ技術の動向を含めたセンサレス制御に関する研究の位置付けおよび論文構成を概説している。

第2章では、本研究で用いる埋込型永久磁石同期電動機：IPMSM（Interior Permanent Magnet Synchronous Motor）の位置センサレス制御に関する基本技術を説明している。

第3章では、本研究の基礎制御技術として重要となる外乱オブザーバおよび力センサレス多自由度制御の基本構成を示し、また実機実験で利用する4自由度平行リンクマニピュレータの等価質量行列に基づいたモデル化について概説している。

第4章では、本研究で提案している位置・力センサレス多自由度制御の全体構成を示し、ロボット等の実応用で重要な擦り動作を取り上げ、従来手法において所望の擦り動作の実現が困難となる要因についてその考察をまとめている。

第5章では、本研究で用いているIPMSMにおいて、磁束のクロスカップリングファクターを含むdq軸電圧方程式を新たに定式化し、回転位置とクロスカップリングファクターを推定する手法を提案している。また、同推定値に基づいた位置センサレス制御により位置推定誤差および高周波振動が低減でき、外乱へのロバスト性向上も得られることを実機実験により示している。

第6章では、位置と力のハイブリッド制御において、等価質量行列および力制御軸の速度の状態が、位置制御と力制御間の干渉状態に直接影響することを理論関係式により明確化している。これに基づき、多自由度マニピュレータによる環境との接触動作において、位置制御と力制御の非干渉化を達成するため、位置制御軸の振動的な応答が力制御軸へ干渉力として影響する外乱を相殺する等価質量行列の設定手法を提案し、擦り動作時の押し当て力振動が低減できることを実機実験により実証している。

第7章では、第5章と第6章の提案手法を組み込んだ位置・力センサレス制御系を提案し、4チャンネルバイラテラル制御系の力覚伝達実験および4自由度平行リンクマニピュレータによる擦り動作の実機実験を示し、提案する位置・力センサレス制御の有用性を実証している。位置推定誤差については改善の余地を残しているものの、力応答の振動抑制性能の向上が重要な結果として示されている。

第8章では、結論を述べ、得られた成果の重要な貢献と今後の展望について総括している。

以上要するに、本研究は駆動アクチュエータとしてIPMSMを用いた多自由度ロボットシステムにおいてクロスカップリングファクターおよび等価質量行列を用いた位置・力センサレス制御手法を提案し、実機実験によりその有用性を実証したものである。これらの研究はモーションコントロールならびにメカトロニクス分野において、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 6094 号	氏 名	竹村 玲哉
主論文題名： Comprehensive Framework for RRT-based Motion Planning of Autonomous Robotic Systems in Extreme Environments (極限環境における自律移動ロボットシステムの RRT に基づく 動作計画のための包括的なフレームワークの構築)			
<p>惑星や災害現場などの極限環境は、高放射線や、高温、高圧といった人間にとって過酷な条件下にあるため、代わりに無人地上車両 (Unmanned Ground Vehicle, UGV) や無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) など、いわゆる移動ロボットを用いて、惑星探査や被災状況の確認、遭難救助活動などが広く行われている。しかし、これらのロボットを人間が遠隔から操作することは通信遅延や断絶の影響から信頼性の低い運用となってしまふ。そのため、限られた時間内でロボットを効率的に活動させるため自律移動システムが必要不可欠となっている。自律移動システムは、環境認識や自己位置推定、動作計画、移動制御から構成され、ロボット自身に周囲環境を認識させ、行動の計画から実行までを自律的に可能とする仕組みである。しかし、極限環境においてロボットの移動を妨げる問題、例えば UGV の不整地走行におけるスリップやスタックといった危険、あるいは UAV の位置推定における劣化においては未解決の問題があり、信頼性のある自律移動の実現にはこれらの問題を包括的に取り組む必要がある。</p> <p>そこで本研究では、極限環境における自律移動ロボットの信頼性向上を目指し、ロボットの行動に関して意思決定を担う動作計画において、アルゴリズムの構築および有用性検証のためのフレームワークを提案した。本フレームワークは、まずロボットの形態や環境条件を考慮し、ロボットの知覚から得られる環境の幾何情報に基づいた予測モデルを各問題に応じて作成する。さらに同モデルに応じて探索アルゴリズムの一種である Rapidly-exploring Random Trees (RRT) を拡張させ、数値解析によりその有用性を検証するものである。本論文では4つの異なるシナリオに対して本フレームワークによる動作計画の実装を行い、その有用性を確認した。</p> <p>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。</p> <p>第2章では、軟弱土壌かつ不整地での車輪型移動ロボットが安全な走行を低計算コストで遂行できることを目的とし、本フレームワークにおいて、走破性予測モデルと地形情報に基づいた計算効率指標を導入することで RRT の拡張を行い、その有用性を示した。</p> <p>第3章では、UGV の車両横転や車輪の高スリップ状態の確率を低減することを目的に、第2章でのアプローチに対して、不確実性指標を導入し RRT を拡張した軌道計画アルゴリズムを構築し、本フレームワークに則ってアルゴリズムの検証を行った。</p> <p>第4章では、衛星測位システムが使用困難な未知環境において、UAV が位置推定精度を維持したまま目的地に到達することを目的に、本フレームワークにおいて視覚センサの知覚情報の質を考慮するよう RRT を拡張し、高忠実度なシミュレーターを用いて有用性の検証を行なった。</p> <p>第5章では、UAV の位置推定精度とエネルギー効率のトレードオフ問題を解くことを目的に、本フレームワークの元、知覚情報とエネルギー消費予測モデルを導入し、RRT を拡張するとともに、数値解析によりその有用性を検証した。</p> <p>第6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。</p>			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6094 号	氏 名	竹村 玲哉
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	博士（工学） 三木 則尚
		慶應義塾大学専任講師	博士（工学） 村田 真悟
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 高橋 正樹

学士(工学), 修士(工学) 竹村玲哉君提出の学位請求論文は「**Comprehensive Framework for RRT-based Motion Planning of Autonomous Robotic Systems in Extreme Environments**」(極限環境における自律移動ロボットシステムの RRT に基づく動作計画のための包括的なフレームワークの構築)と題し, 6 章から構成されている。

惑星や災害現場などの過酷な極限環境下では, 無人地上車両 (Unmanned Ground Vehicle, UGV) や無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) などのいわゆる無人ロボットを用いた科学探査や被災状況確認などが広く行われている。ロボット運用における通信遅延・断絶などの課題を補償する自律移動システムは, 環境認識や自己位置推定, 動作計画, 移動制御から構成されており, 特に極限環境における固有の問題, 例えば UGV の走行不能状態や, UAV の位置推定精度の劣化といった問題を適切に取り扱う自律移動システムの実現が求められている。

そこで本研究では, 極限環境における自律移動ロボットの信頼性向上を目指し, ロボットの動作計画に対するアルゴリズムの拡張とその有用性検証を可能とする包括的なフレームワークを提案している。本フレームワークは, まず, ロボットの形態や環境条件を考慮し, ロボットの知覚から得られる環境情報に基づいた予測モデルを各問題に応じて作成する。さらに, 同モデルに応じて動作計画アルゴリズムの一種である **Rapidly-exploring Random Trees (RRT)** を拡張させ, 数値解析によってこの動作計画の有用性を検証するものである。本論文では 4 つの異なるシナリオに対して本フレームワークに準じて動作計画の実装を行い, その有用性を確認している。

第 1 章では, 本研究の背景と関連研究ならびに目的を述べ, 提案するフレームワークの全体構成と問題解決アプローチについて述べている。

第 2 章では, 軟弱土壌かつ不整地を走行する UGV を対象とし, 走破性予測モデルと地形情報に基づいた計算効率指標を導入して RRT を拡張し, 数値シミュレーションにより動作計画の有用性を示している。

第 3 章では, UGV の車両横転や車輪の高スリップ状態という走行リスク低減を目的に, 第 2 章でのアプローチに対して不確実性指標を導入した軌道計画アルゴリズムを構築し, 本フレームワークに則って同アルゴリズムを検証している。

第 4 章では, 未知環境における UAV の位置推定精度を維持することを目的として, 視覚センサによる知覚情報の質を定量的に考慮するよう RRT を拡張し, 高忠実度なシミュレータを用いて動作計画の有用性を検証している。

第 5 章では, UAV の位置推定精度とエネルギー効率のトレードオフを解くことを目的に, 本フレームワークへ知覚情報ならびにエネルギー消費予測モデルを導入し, RRT を拡張するとともに, 数値解析によりその有用性を検証している。

第 6 章では, 本研究の成果を総括し, 今後の課題と展望について言及している。

以上要するに, 本論文は自律移動ロボットシステムに関する動作計画およびその包括的なフレームワーク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6095号	氏名	仲村 孝行
主論文題名： 鉄道車載蓄電用直流—直流変換システムの小型軽量・低損失化に向けた一手法			
<p>近年、蓄電媒体を搭載した鉄道車両が登場している。しかし、直流電気車に蓄電媒体を搭載する場合、蓄電媒体だけでなく、電圧変換および電流調整のための直流—直流変換システムを搭載する必要があるため、蓄電媒体搭載に伴い機器が大型重量化する課題がある。そこで、本論文は特に大型重量化する変換システム内の電気機器に着目して小型軽量化および低損失化の一手法について提案を行った。</p> <p>第1章では、パワーエレクトロニクス技術の鉄道車両への適用について、電気機器の観点を交えながら現在までの経緯および技術動向を示し、本論文で対象とする直流—直流変換システムに使用される電気機器に変圧器とリアクトルが存在することを示し、それぞれの課題を概説した。</p> <p>第2章では、絶縁型の直流—直流変換システムに使用される電気機器である変圧器に着目し、変圧器のインピーダンスと損失の周波数特性を取得した。絶縁型の直流—直流変換システムにおける変圧器は矩形波電圧印加で使用されることが標準であるため、矩形波電圧波形印加時の損失も取得した。この結果を通じて、絶縁型直流—直流変換システムを構成する際の課題を抽出した。特に、変圧器の固有振動数以下の周波数で運用する場合に無負荷損失が増加する課題があることを明らかにした。</p> <p>第3章では非絶縁型の直流—直流変換システム的一种である電流可逆チョップ内に存在する電気機器であるリアクトルに着目した。実車に搭載された車載蓄電用の直流—直流変換システム内の空芯リアクトルの温度上昇試験を通じて、電流可逆チョップ運用時に発生する電流リップルに起因する交流損失の実態を明らかにした。また、この交流損失が変換システムとして無負荷損失であることを明らかにした。</p> <p>実際の変換システムでは容量等の観点から多相化することもあるため、第4章では多相化による影響を扱った。まず多相化の手法を整理した後、多相化に伴い負荷損失が減少することに対して、無負荷損失が増加することを明らかにした。この関係から、負荷電流に応じた最適相数が存在すると考えられたため、変換システムのリアクトル内の負荷損失と無負荷損失の合計である合計損失を相数の関数として定式化した。さらに負荷電流に応じた最適相数に解析解が存在することを明示するとともに、関連パラメータを整理し、設計に活用可能な最適相数決定法を提案した。</p> <p>第5章および第6章では損失低減方策の一手法として、多相電流可逆チョップ内にある各相に存在するリアクトル間の電磁結合を活用する方法を検討した。電流リップル振幅が電磁結合係数とチョップ通流率の関数で示されることを明らかにした。チョップ通流率、電磁結合の手法およびスイッチングの手法によって、電流リップル振幅が低減可能となる電磁結合係数が異なることを明らかにした。</p> <p>この試算結果を元に、第6章では任意の電磁結合係数を実現する巻線構造を考案し、電磁結合を有するリアクトルを製作した。製作したリアクトルによる通電試験より、第5章で構築した理論の妥当性を示すことができ、リアクトルの小型軽量化および低損失化を電磁結合により実現可能であることを示した。</p> <p>第7章に、結論として本論文の各章で得られた知見を纏め、本研究の成果を要約した。</p>			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6095 号	氏 名	仲村 孝行
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 村上 俊之
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士 大森 浩充
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 博士（医学） 満倉 靖恵
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 飯盛 浩司
		慶應義塾大学名誉教授	工学博士 澤 孝一郎

学士（工学），修士（工学）仲村 孝行 君提出の学位請求論文は「鉄道車載蓄電用直流 - 直流変換システムの小型軽量・低損失化に向けた一手法」と題し，7章から構成されている．蓄電媒体を搭載した直流電気車においては，蓄電媒体だけでなく電圧変換および電流調整のための直流 - 直流変換システムを搭載する必要がある．一方で，蓄電媒体搭載に伴い機器が大型重量化する傾向にあり，機器の小型低損失化も必須課題となる．そこで，本研究では小型低損失化に寄与し得る変換システム内の電気機器に着目し，特に変圧器のインピーダンス特性ならびに損失における周波数特性の明確化，リアクトルの交流損失の新たな定式化，また損失を考慮した多相化の最適設計法および電磁結合の活用法を提案し，実機実験によりそれらの妥当性を検証している．

第1章では，本研究の目的を述べ，電気機器の技術動向を含めた研究の位置付けおよび論文構成を概説している．

第2章では，絶縁形直流 - 直流変換システムにおける矩形波電圧印加時の変圧器損失を検証し，その基本課題を明確化している．特に，固有振動数より低い周波数による変圧器運用では無負荷損失が増加することを明らかにしている．

第3章では，非絶縁形直流 - 直流変換システムにおいて，電流可逆チョップ内に存在するリアクトルに着目し，実際の鉄道車両に利用されている車載蓄電用の直流 - 直流変換システム内の空芯リアクトルの温度上昇に関する試験結果を示している．これにより，電流可逆チョップ運用時に発生する電流リップルに起因する交流損失が無負荷損失に相当することを明らかにしている．

第4章では，直流 - 直流変換システムにおける多相化の影響を検証し，多相化により負荷損失が減少するものの，無負荷損失の増加がみられることを明確化している．これより，負荷電流に応じた最適相数が存在することも見出し，変換システムのリアクトル内の負荷損失と無負荷損失の合計損失を相数の関数として定式化し，最適相数決定に基づいた多相化の設計手法を示している．

第5章では，多相電流可逆チョップ内の各相に設定されているリアクトル間の電磁結合を活用した損失低減の一手法を示し，電流リップル振幅が電磁結合係数とチョップ通流率の関数で示されることを示している．また，チョップ通流率，電磁結合およびスイッチングの手法によって，電流リップル振幅の低減が可能となる電磁結合係数が異なることを明らかにしている．

第6章では，リアクトルにおける任意の電磁結合係数を実現する巻線構造を示し，電磁結合を伴うリアクトルの実機製作を行い，第5章で構築した理論の妥当性を検証している．最終的に，リアクトルの小型軽量化および低損失化を電磁結合により実現可能であることを示している．

第7章では，結論を述べ，得られた成果の重要な貢献と今後の展望について総括している．

以上要するに，本研究は鉄道車載蓄電用直流 - 直流変換システムの小型軽量・低損失化に向けた変圧器およびリアクトルの損失解析法ならびに各種設計法を提案し，実機実験によりその有用性を実証したものである．これらの研究は直流 - 直流変換システムの実応用を含め，パワーエレクトロニクスならびに電気機器システム分野において，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6096号	氏名	中野 匠
主論文題名：			
手組作業における画像解析を用いた作業管理と工程管理者の支援に関する研究			
<p>近年、多品種少量生産への生産形態の変化、作業者の雇用形態の変化、生産拠点のグローバル化が進み、製造業を取り巻く環境は急激に変化している。これらの環境の変化の中においても、製品の品質と生産性の向上は重要な経営課題となっており、その業務を担当する製造スタッフ、工程管理者が果たすべき役割は大きい。</p> <p>製品の品質には、その作り方、すなわち、生産プロセスの良し悪しが影響を及ぼすことから、生産プロセス自体の品質を保証することが、製品品質の向上につながる。この生産プロセスの保証活動として、人に起因する作業のばらつきを管理する点がある。本研究で対象とする組立生産では、作業者による手組作業が中心となるので、特に作業のばらつきを管理する作業管理の重要性が高い。</p> <p>そこで本研究では、製造スタッフ、工程管理者を支援するため、実際の工場における手組作業を研究の対象にして、作業者の作業データの収集とその管理を自動化することによって生産プロセスの維持向上を目指す。さらには、収集した作業データを利用して、製造現場の改善を支援する仕組みを実証的に検証し、その方法を提案することを目的とした。</p> <p>はじめに、作業を撮影した動画像に含まれる、作業の中心となる物体を着目領域として定義し、着目領域内の作業に対して深層学習を用いた画像の分類を行うことによって作業内容を推定し、作業者の作業データを収集する方法を考案した。これにより、従来までの深層学習による作業内容の推定方法と比較して、少ない学習枚数と学習回数で高精度に作業内容を推定できることを確認した。次に、収集した作業データを利用して、作業標準と比較し、その結果を作業者および工程管理者にリアルタイムに知らせることによって、作業者に作業の是正を図る仕組みを構築した。これによって工程管理者の作業管理業務の一部が自動化され、生産プロセスの品質保証の品質が向上することを確認した。さらに、生産現場の改善を支援するため、生産状況の情報を見える化する仕組みを構築した。これにより、発生した問題の分析や潜在的な問題の発見が可能となり、生産プロセスの品質及び生産性の向上を確認した。</p> <p>以上のことから、本研究で対象とする組立生産における手組作業において、深層学習を用いた作業内容の推定を高い精度で効率的に実施する方法を提案し、そこで収集した作業データを用いて、生産プロセスの品質保証において、製造スタッフ、工程管理者を支援することが可能であることを明らかにした。</p>			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6096 号	氏 名	中野 匠
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士（工学） 志田 敬介
	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） 稲田 周平
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 篠沢 佳久
		青山学院大学教授	博士（工学） 松本 俊之

学士（工学）、修士（工学）、中野匠君提出の学位請求論文は「手組作業における画像解析を用いた作業管理と工程管理者の支援に関する研究」と題し、全6章からなる。

近年、多品種少量生産への生産形態の変化、作業者の雇用形態の変化、生産拠点のグローバル化が進み、製造業を取り巻く環境変化は著しい。このような環境変化の中において、製品の品質と生産性の向上は重要な経営課題であって、製品の品質と生産性の向上に関する業務を担当する製造スタッフや工程管理者の果たすべき役割は大きい。

製品の品質向上には、その作り方、すなわち、生産プロセスの保証が重要で、作業標準を遵守するための作業管理が必要となる。本研究で対象とする組立型の製造業では、作業者による手組作業が中心となるので、作業管理の重要性は特に高い。そこで本研究では、生産プロセスを保証し、製品品質を向上させる作業管理方法と生産性向上のために工程管理者を支援する方法を提案し、実際の工場において、その効果を検証した結果について論じている。

第1章では、近年の多品種少量生産や生産拠点のグローバル化、人材の流動性の高まりの中で、製品品質と生産性向上において、特に手組作業における作業管理が問題となっている製造業の現状と課題について説明している。これらの現状と課題を踏まえ、本研究の目的を手組作業における作業管理と工程管理者の支援方法の提案と定めている。

第2章では、作業管理に関する動向調査ならびに作業データの収集と生産プロセスの保証および生産性の向上に向けた改善活動の支援に関する先行研究について調査した結果について述べている。さらに、これらの先行研究を踏まえ、本研究で提案する画像解析を用いた作業管理方法について述べている。

第3章では、手組作業において収集すべき作業データの特性や作業データの収集方法について検討し、既存のデータ収集方法と本研究で提案する方法を比較した評価実験を行っている。その結果、作業位置と作業内容を分割して画像解析することによって、推定精度の高い作業データが収集できることを示している。

第4章では、第3章で提案した作業データの収集方法を用いた作業管理方法を提案し、自動車部品製造工場および油圧ギヤポンプ製造工場において、実際に作業管理を実施した結果について述べ、生産プロセスの保証に関して提案手法の有効性を検証している。

第5章では、生産プロセスの生産性の向上に関して工程管理者の支援方法を提案し、実際の工場において、工程管理者の支援を実施した結果について述べ、工程管理者の支援に関して提案手法の有効性を検証している。

第6章では、本論文を総括し、本研究の結論と今後の課題、作業管理方法に関して本研究を通じて得られた新たな着眼点とその応用の可能性について述べている。

以上、本研究では製造業における組立作業を対象に、生産プロセスを保証し、製品品質を向上させる作業管理方法と生産プロセスの生産性向上のための工程管理者の支援方法を提案し、実際の工場において、その提案方法の有効性を検証したもので、学術的な貢献のみならず、実務者に対しても一定の示唆を与えるものと考えられる。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 6097 号	氏 名	澁谷 健一
主論文題名：			
A Study on Corporate Social Responsibility Impact Analysis and Design for Environment (企業の社会的責任の影響分析と環境配慮設計に関する研究)			
<p>近年、企業は社会・環境との共生が求められている。変化する社会情勢と消費者ニーズに応えるため、企業に対する顧客視点を明らかにすることが課題となる。本論は企業の社会的責任（以下、CSR）、所有コスト、品質次元、顧客満足度や顧客ロイヤルティの因果構造モデルを提案・実証を行った。また、アシュアランスケースを自動車の環境配慮設計に適用し、効果検証を行った。以上より、社会・環境に対する企業の取り組みに対して戦略的意思決定の一助となる知見の獲得を目指す。本論では、自動車業界を対象に、三つの研究から構成される。第一の研究では、自動車のサービス性、所有コスト、CSR、顧客満足度、顧客ロイヤルティの因果構造を日本とフランスの自動車ユーザーによるアンケート調査結果から、国別比較を行った。探索的因子分析（以下、EFA）により、上記5因子を抽出し、抽出した因子から仮説モデルを構築した。続いて、確認的因子分析（以下、CFA）と構造方程式モデリング（以下、SEM）を行った。その結果、日本はCSRが顧客満足度に影響を与えるが、フランスは影響を与えるとは言えないことが分かった。フランスに対して日本はCSRを重視しており、顧客満足度を向上させるための要素となることが示唆された。第二の研究では、CSRが顧客満足度に影響を与える日本を対象として、CSR、社会的品質、知覚品質、顧客満足度、顧客ロイヤルティの因果構造をアンケート調査により検証した。CFAにより測定モデルの妥当性を確認した後、SEMおよびブートストラップ法により総合効果と間接効果を検証した。その結果、CSRは顧客ロイヤルティに直接影響を与えるとは言えないが、知覚品質を媒介して顧客満足度に影響を与えることが分かった。また、社会的品質は顧客満足度に直接影響を与えるとは言えないが、知覚品質を媒介して顧客満足度に影響を与えることが分かった。第二の研究から、知覚品質がCSRや社会的品質のメディエーターであることが示唆された。第三の研究では、CSRの推進項目に挙げられる取り組みの一つである環境配慮設計（以下、DfE）のマネジメントを目的に、アシュアランスケースを適用した。自動車のDfEにおいて、商品企画段階の複数の検討結果（エビデンス）をもとに概念設計を行うプロセスに適用するアシュアランスケース記述法を提案し、有効性については、DfEに携わる関係者にアンケート調査を実施した。その結果、DfE遂行にあたってアシュアランスケースが業務プロセスの可視化により担当者が自律的に行動できることが示唆された。以上より、本論では、自動車を対象に、取り巻く社会動向の中で、顧客の意向と顧客満足度向上のための因果構造を明らかにするとともに、環境に配慮した設計プロセスを可視化することで仕組み化し、社会・環境に対する取り組みとマネジメントに資する包括的な指針を得た。</p>			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6097 号	氏 名	澁谷 健一
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 鈴木 秀男
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 松川 弘明
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 山田 秀
		慶應義塾大学教授	博士（システムエンジニアリング学） 白坂 成功
<p>学士（工学）、修士（工学）、澁谷健一君の学位請求論文は「A Study on Corporate Social Responsibility Impact Analysis and Design for Environment (企業の社会的責任の影響分析と環境配慮設計に関する研究)」と題し、全5章からなる。</p> <p>近年、企業は社会・環境との共生が求められている。変化する社会情勢と消費者ニーズに対応するため、企業に対する顧客視点を明らかにすることが課題となっている。本論文は企業の社会的責任（以下、CSR）、所有コスト、品質次元、社会的品質と顧客満足度や顧客ロイヤルティの因果構造モデルを提案・実証している。また、社会的品質やCSRと捉えることができる環境配慮やその設計に着目し、アシュアランスケースを自動車の環境配慮設計に適用して、効果検証を行っている。本論文は以下のように構成されている。</p> <p>第1章は序論であり、本研究の背景および課題を明らかにし、論文の概要を説明している。</p> <p>第2章では、自動車のサービス性、所有コスト、CSR、顧客満足度、顧客ロイヤルティの因果構造を日本とフランスの自動車ユーザーによるアンケート調査結果から、国別比較を行っている。探索的因子分析により、上記5因子を抽出し、抽出した因子から仮説モデルを構築している。続いて、確認的因子分析（以下、CFA）と構造方程式モデリング（以下、SEM）を行い、日本のモデルにおいてCSRが顧客満足度に影響を与えることが示され、日本の顧客はCSRを比較的重視し、顧客満足度を向上させるための要素となることを示唆している。</p> <p>第3章では、2章の結果を踏まえて、CSR、社会的品質、知覚品質、顧客満足度、顧客ロイヤルティの因果構造を、日本のアンケート調査データにより検証している。CFAにより、測定モデルの妥当性を確認した後、SEMおよびブートストラップ法により、CSRや社会的品質の総合効果と間接効果を検証している。その結果、CSRは、知覚品質を媒介して顧客満足度に影響を与えること、また、社会的品質は知覚品質を媒介して顧客満足度に影響を与えていることが分かった。すなわち、知覚品質がCSRや社会的品質の媒介変数であることを示唆している。</p> <p>第4章では、CSRの推進項目に挙げられる取り組みや社会的品質の一つである環境配慮設計（以下、DfE）のマネジメントを目的に、アシュアランスケースを適用している。自動車のDfEにおいて、商品企画段階の複数の検討結果（エビデンス）をもとに概念設計を行うプロセスに適用するアシュアランスケース記述法を提案し、その有効性を示すためにDfEに携わる関係者にアンケート調査を実施している。その結果、DfE遂行にあたってアシュアランスケースが業務プロセスの可視化により担当者が自律的に行動できることを示している。</p> <p>第5章は、本論文のまとめと今後の課題と展望について述べている。</p> <p>以上要するに、本論文では、自動車を対象に、取り巻く社会動向の中で、CSRや社会的品質を考慮した顧客の意向と顧客満足度向上のための因果構造を明らかにするとともに、環境に配慮した設計プロセスを可視化することで仕組み化し、社会・環境に対する取り組みとマネジメントに資する包括的な指針を得ている。CSRや社会的品質を考慮した顧客満足度や顧客ロイヤルティの体系的実証研究、DfEを取り上げた業務プロセスの可視化に関する研究はまだ少なく、本論文の成果はCSRや社会的品質の研究の発展、それを考慮した実務的な研究の発展に寄与するものと期待される。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。</p>			

2023（令和5）年9月までの新制博士学位授与者数は次のとおり。

[]内は内数。当該年度学期（2023年度春学期）授与者数。

学位の種類	課程修了によるもの (課程博士・・・・甲)	論文提出によるもの (論文博士・・・・乙)	計
工学博士	451	389	840
博士（工学）	1,646 [17]	318 [0]	1,964 [17]
理学博士	26	8	34
博士（理学）	462 [1]	49 [0]	511 [1]
学術博士	0	1	1
博士（学術）	1 [0]	1 [0]	2 [0]
計	2,586 [18]	766 [0]	3,352 [18]

本書に記載した論文審査担当者の所属および職位は2023（令和5）年度春学期のものである。

2023(令和5)年12月1日 発行

発行者 理工学研究科委員長 齋木 敏治

編集 慶應義塾大学理工学部学生課学事担当

〒223-8522

神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1