慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

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	2023
Jtitle	慶應義塾大学理工学部研究報告別冊 Vol.94, (2022.) ,p.1- 94
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO50002003-20220002-0001

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5875号	氏　名	アリモフ，ジクリラ

主 論 文 題 名 ：

Development of effective and affordable particulate matter sampling devices for toxicity analyses in arid regions
（乾燥地域における粒子状物質の有害性評価のための効果的かつ安価なサンプリングデバイスの開発）

本論文は、発展途上地域の大気環境問題の解決に向けて、先進的なエアロゾル技術を効果的かつ安価に最適化し実際の利用に資することを目的とした。

第1章では、粒子状物質の定義、物理化学的性質、異なる気候地域での毒性について説明した。さらに対象とする発展途上地域の例として、経済的に余裕がなく大気汚染監視システムが非常に貧弱な中央アジアを挙げてその現状を説明した。

第2章では、粒子状物質濃度および化学成分の正確な測定のために、同時に複数の均質なエアロゾル試料を得るための低コストな多連サンプラーの設計とその性能評価について示した。流量計の代わりに臨界ノズルを使用してコストを半減させた。気温、相対湿度、気圧、フィルター材料などの条件が流量に与える影響を調べ、これらの要因は分析結果に大きな影響を与えないことを見出した。

第3章では、乾燥地域であるウズベキスタンにおける大気エアロゾルの挙動と特性に関するフィールド調査の結果を示した。本研究で開発した装置を用いてサンプルを採取した。無機元素、水溶性イオン、有機炭素、酸化能の分析を行い、エアロゾル粒子の発生源と有害性について議論した。

第4章では、バイオエアロゾルサンプラーの運転条件と捕集効率の評価について述べた。複数のフィルターへの捕集効率をパーティクルカウンターと蛍光X線分析で評価した。気中微生物分析のために一般的に用いられているバイオエアロゾルサンプラーの粒子捕集効率は高くなく、得られた結果の解釈には注意を要することを指摘した。

第5章では、サイクロンのサイズと流量の違いによる分離性能の評価と、サイクロンのサイズが捕集エアロゾル粒子の化学組成と有害性評価への影響について示した。様々なサイズや形状を持つ粒子のサイクロンの粒子透過率、化学組成、酸化能、エンドトキシン分析、および細胞曝露実験を実施した。大小のサイクロンを用いることで、得られる粒子サイズを変えることが可能であり、それが化学成分や細胞応答に大きく影響を与えることを見出した。

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5875号	氏　名	アリモフ，ジクリラ

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	博士（工学）	松本　佳宣
		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

学士（Chemical Technology）、修士（Process and Devices of Oil and Gas Working Out） アリモフ，ジクリラ君提出の学位請求論文は「Development of effective and affordable particulate matter sampling devices for toxicity analyses in arid regions （乾燥地域における粒子状物質の有害性評価のための効果的かつ安価なサンプリングデバイスの開発）」と題し、6章から構成されている。

近い将来、人間の早期死亡をもたらす最大の環境要因は大気汚染となり、特に空気中の粒子状物質（エアロゾル）によるものが最も深刻となることが予測されている。特に世界人口の約６割を占めるアジア地域では、環境への配慮を欠いた開発などにより大気汚染が深刻化する一方で、経済的資源の乏しさゆえに高価な観測機器を導入できず、大気汚染の現状把握すら困難な状況にある。そこで本論文では、発展途上地域に導入可能な効果的かつ安価な大気環境観測装置を製作し、実環境中での応用例を示している。

第1章では、粒子状物質の定義、物理化学的性質、異なる気候地域での毒性について説明している。さらに対象とする発展途上地域の例として、経済的に余裕がなく大気汚染監視システムが非常に貧弱な中央アジアを挙げてその現状を説明している。

第2章では、粒子状物質濃度および化学成分の正確な測定のために、同時に複数の均質なエアロゾル試料を得るための低コストな多連サンプラーの設計とその性能評価について示している。流量計の代わりに臨界ノズルを使用してコストを半減させ、これに加えて、気温、相対湿度、気圧、フィルター材料などの条件が流量に与える影響を調べ、これらの要因は分析結果に大きな影響を与えないことを見出している。

第3章では、乾燥地域であるウズベキスタンにおける大気エアロゾルの挙動と特性に関するフィールド調査の結果を示している。本研究で開発した装置を用いてサンプルを採取し、無機元素、水溶性イオン、有機炭素、酸化能の分析を行い、エアロゾル粒子の発生源と有害性について議論している。

第4章では、バイオエアロゾルサンプラーの運転条件と捕集効率の評価について述べている。複数のフィルターへの捕集効率をパーティクルカウンターと蛍光X線分析で評価し、気中微生物分析のために一般的に用いられているバイオエアロゾルサンプラーの粒子捕集効率は高くなく、得られた結果の解釈には注意を要することを指摘している。

第5章では、サイクロンのサイズと流量の違いによる分離性能の評価と、サイクロンのサイズが捕集エアロゾル粒子の化学組成と有害性評価へ及ぼす影響について示している。様々なサイズや形状を持つ粒子のサイクロンの粒子透過率、化学組成、酸化能、エンドトキシン分析、および細胞曝露実験を実施している。大小のサイクロンを用いることで、得られる粒子サイズを変えることが可能であり、それが化学成分や細胞応答に大きく影響を与えることを見出している。

第6章では、本論文で得られた知見についてまとめている。

以上要するに、本研究は、利用できる経済的資源が限られている発展途上地域における大気環境問題の解決に向けて、先進的なエアロゾル技術を効果的かつ安価に最適化した大気環境観測装置を製作し、実環境中における利用実績を示したものであり，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5878号	氏　名	新井　公大

主論文題名：

固相化法及び超音波浮揚法を活用した非ウイルスベクターによる
効率的な遺伝子導入技術に関する研究

医薬品製造において、高効率かつ安全性の高い遺伝子導入法が求められており、ウイルスベクターを用いた遺伝子導入法は高効率であるが、安全面での課題が多い。そこで、安全面での課題が少ない非ウイルスベクターを用いた手法が注目されているが、遺伝子導入効率の向上が課題である。細胞標的性を高めた遺伝子キャリアにより遺伝子導入効率向上を目指す研究が多く行われている。本研究では、遺伝子複合体と細胞とを物理的手法により相互作用させることで、遺伝子発現活性へ与える影響を評価した。

第1章では、遺伝子導入技術に関して医薬品製造における重要性を説明し、本研究を行うことの意義と目的を述べた。

第2章では、固相リバーストランスフェクション法（RTF）に適したpDNA/多糖複合体を開発し、それらの遺伝子発現メカニズムを解明した。pDNA/キトサン/ヒアルロン酸（HA）三元複合体はRTFで優れた遺伝子発現活性を示した。pDNA三元複合体はフォワードトランスフェクション法（FTF）ではマクロピノサイトーシスとクラスリン介在性エンドサイトーシスを介して細胞内へ取り込まれたが、RTFではマクロピノサイトーシスを介して取り込まれることを明らかにした。pDNA三元複合体の細胞内取り込み効率についてはFTFとRTFの間に顕著な差は見られなかったが、RTFにおいてpDNA三元複合体は微小管を介して後期エンドソームに輸送され、核に効率的に輸送されることを明らかにした。

第3章では、超音波浮揚を利用した遺伝子導入法の開発を行った。細胞を超音波浮揚させる実験条件を至適化することで、超音波浮揚条件では、静置条件の場合と比較して遺伝子導入効率が向上することが見いだされた。遺伝子発現機構の解析において、pDNA複合体の細胞内取り込み量が超音波浮揚条件で増加することが見出された。さらにpDNA複合体の細胞内動態解析を行い、超音波浮揚させた細胞ではpDNA複合体のエンドサイトーシス経路がマクロピノサイトーシスのみに変化することを見出した。超音波浮揚法では、細胞やpDNAにダメージを与えることなく効率的な遺伝子導入を達成できることが明らかとなった。

第4章では、本研究のまとめを行い、本研究の成果が当該分野の研究と開発にもたらす影響について述べた。

審査の要旨

報告番号	甲　第 5878 号	氏　名	新井　公大

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	工学博士	佐藤　智典
	副査	慶應義塾大学教授	博士（地球環境科学）	土居　信英
		慶應義塾大学教授	博士（理学）	宮本　憲二
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	竹村　研治郎
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	松原　輝彦

学士（工学）・修士（工学）新井 公大君提出の学位請求論文は「固相化法及び超音波浮揚法を活用した非ウイルスベクターによる効率的な遺伝子導入技術に関する研究」と題して、4 章で構成されている。高効率かつ安全性の高い遺伝子導入法は、遺伝子治療や医薬品製造において重要な技術となっている。遺伝子を細胞内に導入する手法の一つとしてウイルスベクターが用いられており、その遺伝子導入効率は高いものの、安全面での課題が多い。そこで、安全性の高い非ウイルスベクターを用いた遺伝子複合体が注目されているが、その遺伝子導入効率は低いことから、効率の向上が実用化に向けた課題になっている。この様な課題の解決のために、遺伝子複合体の細胞標的性を高めるための研究が多く行われている。一方で、物理的な手法を用いて細胞への導入効率を向上するための研究も実施されている。そこで、本著者は、細胞との親和性を高める遺伝子複合体と物理的な手法を組み合わせた新たな遺伝子導入技術についての研究を行っている。

第 1 章では、遺伝子治療や医薬品製造分野での細胞内への遺伝子導入技術に関する背景と重要性を説明し、本研究を行うことの意義と目的が述べられている。

第 2 章では、固相リバーストランスフェクション（RTF）法に着目した研究を実施している。著者は、この RTF 法に適したプラスミド DNA（pDNA）／多糖複合体の探索を行い、pDNA ／キトサン／ヒアルロン酸三元複合体が、細胞への最も高い遺伝子導入効率を示すことを見出した。さらに、その複合体の遺伝子発現メカニズムの解明を行っている。RTF 法での pDNA 三元複合体は、一般的なフォワードトランスフェクション法（FTF）と比較して、エンドサイトーシスの経路が異なっていると述べている。さらに、細胞内輸送経路を解析することで、細胞内に取り込まれた後で微小管を介して後期エンドソームに輸送され、その結果、核内に効率的に輸送されることで、高い遺伝子発現が達成されたと述べている。

第 3 章では、超音波浮揚法を利用した遺伝子導入法の開発を行っている。著者は、超音波浮揚させた液滴内で細胞と pDNA 複合体を相互作用させる実験条件を確立し、超音波浮揚条件では静置条件の場合と比較して遺伝子導入効率が向上することを見出している。遺伝子発現メカニズムの解析により、超音波浮揚条件では pDNA 複合体の細胞内取り込み量が増加しており、そのことが遺伝子発現効率の向上の要因であると述べている。さらに、pDNA 複合体の細胞内取り込み機構の解析により、超音波浮揚させた細胞では静置条件と比較してエンドサイトーシスの経路が異なっていることを見出しており、超音波浮揚が細胞機能に影響を与えた可能性があると述べている。

第 4 章では、本論文を総括し、確立した遺伝子細胞内導入技術の展望について述べている。

本論文では、固相リバーストランスフェクション法と超音波浮揚法という二つの手法を用いることで、遺伝子複合体の細胞内への効率的取り込みと遺伝子発現効率の向上に成功している。さらに、遺伝子発現効率が向上するメカニズムの解明を行っている。これらの成果は、遺伝子の細胞内導入手法として、理工学の基礎的な分野だけではなく、医薬品開発にも寄与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。

Thesis Abstract

Registration Number	“KOU” No.5884	Name	Zhang, Linlin

Thesis Title

Federated Learning for Driver Drowsiness Detection

Federated learning is often used in industrial cyber-physical systems (ICPSs) in which the datasets belong to different entities that are unwilling to share their private data. Collaborative training solves the problem of data isolation, but decentralized learning creates new issues, including efficiency reduction and privacy leakage. In this thesis, some techniques are introduced to federated learning method to solve these issues and applied to driver drowsiness detection as an example of its practical use. This thesis proposed three FL-based methods, named PMFL, PFTL-DDD, and PMFTL-DDD, to meet the requirements of the ICPs and the specific scenario of driver drowsiness detection, respectively. The contributions of this thesis can be summarized as follow:

PMFL: We first introduce a privacy-preserving federated learning framework that is universally applicable to ICPSs. The proposed PMFL method uses the momentum to speed up the convergence of the FL system. Moreover, the privacy of the industrial agents is protected by adopting the CKKS-based encryption protocol to the parameters exchanged between the cloud server and the industrial agents. The experimental results on the common datasets MNIST and F-MNIST show that the PMFL method improves the convergence rate while preserving the data resources of industrial agents. The experimental results on the YAWDD dataset indicate that PMFL is capable for drowsiness detection tasks, at the same time, improving the structure of the model has the potential to increase the accuracy.

PFTL-DDD: For the specific task of driver drowsiness detection, we introduce transfer learning and CKKS-based privacy-preserving pro-tocol in the drowsiness detection FL system. The PFTL-DDD transfers the knowledge learned from similar dataset so as to improve the classification performance of the driver drowsiness detection task. Considering that the CKKS-based communication protocol has better encryption speed, this encryption scheme is still used in the PFTL-DDD. The experimental results on the driver drowsiness benchmark datasets show that the PFTL-DDD method exhibits outstanding performance and saves considerable communication resources as compared to the conventional drowsiness detection FL systems. Moreover, the analysis shows that the security framework of the proposed method protects the privacy of edge nodes.

PMFTL-DDD: Inspired by the error analysis of PFTL-DDD, we use the features of continuous frames in a video to predict driver drowsiness. The PMFTL-DDD adopts CKKS-based security framework, transfer learning and momentum accelerating techniques for driver drowsiness detection. The experimental results indicate that the performance of the model can be improved by using features from successive frames in a video as a drowsiness prediction basis.

Federated learning (FL) is a distributed learning approach, which allows the distributed computing nodes to collaboratively develop a global model while keeping their data locally. However, parameters sharing in conventional FL systems may leak the private information of the industrial agents. In addition, model performance improvement is a challenge of FL-based methods. In this thesis, a novel federated learning method is proposed to solve these issues and applied to driver drowsiness detection as an example of its practical use. The experimental results verify the effectiveness of the proposed method.

This thesis firstly proposes an accelerating privacy-preserving momentum FL method, named PMFL, which introduces a fully homomorphic encryption scheme CKKS to general FL systems to preserve their local private information. The performance of the PMFL is evaluated on two benchmark datasets, i.e., MNIST and Fashion-MNIST. Theoretical analysis and experimental results verify that the proposed method can protect the private information of the industrial agents and speed up the training process without extra communication costs compared to the existing momentum FL method.

This thesis secondly introduces transfer learning technique into the FL system based on the CKKS security framework and applies it to the driver drowsiness detection task (named PFTL-DDD). We use fine-tuning transfer learning on the initial model of the drowsiness detection FL system. Furthermore, a CKKS-based privacy-preserving protocol is applied to preserve the drivers' private data. The experimental results show that the PFTL-DDD method is superior in terms of accuracy and efficiency compared to the conventional FL-based method on the NTHU-DDD and the YAWDD dataset. The theoretical analysis demonstrates that the PFTL-DDD can reduce the communication cost of the system.

Finally, the CKKS-based security framework, momentum terms, and transfer learning technique are adopted in a driver drowsiness detection federated learning method called PMFTL-DDD. The PMFTL-DDD is evaluated on YAWDD by using the features of continuous frames in a video which is much more in line with reality.

In the future, we aim to: (1) further improve the extensibility of the proposals according to similar tasks; (2) explore concept drift detection and adaptation systems to mitigate the adverse effects of heterogeneous data; (3) explore appropriate methods to implement video classification in federated learning.

審査の要旨

報告番号	甲　第 5884 号	氏　名	Zhang, Linlin（張　琳琳）

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（情報学）	杉浦　孔明
		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）	青木　義満

学士（工学）、修士（工学）張　琳琳君提出の学位請求論文は、「Federated Learning for Driver Drowsiness Detection（運転手の眠気検知のための連合学習）」と題し、6 章で構成されている。

複数のエッジ計算機群が学習データをローカルに保持しながら協調分散学習する連合学習では、各エッジ計算機の学習モデルの相互共有に起因するプライバシー漏洩からの保護や、分散学習性能の向上が課題となっている。本論文は, これらの課題を解決するための新しい連合学習法を提案し、その実利用例として車載エッジ計算機による運転支援のための眠気検知に提案手法を適用し、その有効性を検証した成果についてまとめたものである。

第 1 章では、本論文で注目した連合学習の問題点とその解決のための基本的コンセプトについて述べ、本論文で提案するプライバシー保護型モーメンタム連合学習（PMFL）法と、この手法に基づく運転手の眠気検知手法の関連研究に対する位置づけを示している。

第 2 章では、連合学習と運転支援のための眠気検出技術に関するサーベイが示されている。

第 3 章では、プライバシー保護のために CKKS 暗号化をエッジ計算機間通信に適用し、分散学習効率向上のためにモーメンタム法による最適化を用いる連合学習法である PMFL 法を提案している。そして、その理論的背景と実装のためのフレームワークを示し、その性能評価実験について述べている。MNIST と Fashion-MNIST データセットによるベンチマークにより、従来型の連合学習に比べて提案する PMFL 法がプライバシー保護性能を保ちながらも学習効率を改善できることを示している。

第 4 章では、CKKS 暗号化によるプライバシー保護機能を有する連合学習を運転手の眠気検知（DDD）に適用するために転移学習を導入したプライバシー保護型連合転移学習（PFTL-DDD）法を提案し、その性能を 2 つの DDD 用ベンチマークデータセット NTHU-DDD と YAW-DDD によって評価した実験結果が示されている．この実験結果により、PFTL-DDD が従来型の連合学習に比べて検出精度と学習効率が高いことが示している。

第 5 章では、PFTL-DDD にモーメンタム法を導入して最適化計算の効率向上を実現する PMFTL-DDD を提案し、NTHU-DDD と YAW-DDD による性能評価実験結果により、従来の連合学習と 4 章に示した PFTL-DDD に比べて、検出精度と学習効率が高いことを示している。

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、本論文で提案したプライバシー保護型モーメンタム連合学習とその関連技術に関する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、連合学習におけるプライバシー保護機能と分散学習性能を向上させるための新たな方法を提案し、提案手法の原理を利用した車載エッジ計算機による連合学習による運転支援として眠気検知のための新しい手法を示し, 提案手法がプライバシー保護性能を保ちながらも従来の連合学習に比べて検出精度と計算効率を向上でき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。

内容の要旨

報告番号	甲　第5893号	氏　名	河村　泰良

主論文題名：

駆動散逸冷却 Fermi 原子気体における非平衡 BCS-BEC クロスオーバー

本論文では、化学ポテンシャルの値が異なる 2 つの熱浴との接続により系の非平衡性が制御される、2 成分駆動散逸冷却 Fermi 原子気体を理論的に研究した。原子間引力相互作用の強さが Feshbach 共鳴により可変である場合の、この駆動散逸系における非平衡量子多体現象を研究するため、熱平衡状態にある冷却 Fermi 原子気体に対し開発された BCS（Bardeen-Cooper-Schrieffer）-BEC（Bose-Einstein Condensation）クロスオーバー理論を、非平衡系に拡張した。この強結合理論と、非平衡超流動に対する平均場 BCS 理論を駆使し、空間的に非一様な秩序パラメータを有する新奇超流動状態が、非平衡定常状態で実現しうることを明らかにした。また、対形成揺らぎがこの超流動状態に与える影響や、この秩序状態を駆動散逸系で安定的に実現させる方法の理論的提案も行った。

当該研究分野の概観と本論文の研究動機を第 1 章で説明した後、第 2 章では、熱平衡系に対する超流動平均場 BCS 理論を、本研究が対象とする駆動散逸系に拡張した。それを用い、Fermi 原子間に引力相互作用がはたらくと、通常の BCS 状態に加え、空間的に非一様な超流動秩序パラメータを有する Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov（FFLO）タイプの新奇超流動状態（非平衡 FFLO 状態）が、非平衡平均場解として得られることを示した。また、この超流動状態の出現が、2 つの熱浴との接続に因る Fermi 原子の運動量分布の 2 段構造に起因することを明らかにした。

第 3 章では、前章で得られた超流動平均場解の安定性を研究した。超流動秩序パラメータに微小変位を与えた際の、その後の秩序パラメータの時間変化を追跡することで、各平均場解の安定性を調べた。その結果から、非平衡定常状態にある駆動散逸冷却 Fermi 原子気体の平均場相図を完成させた。また、この相図において、非平衡 FFLO 状態が、安定な超流動状態として存在することを指摘した。

第 4 章では、駆動散逸系に対する強結合理論（非平衡 T 行列近似）の定式化を説明した。次に、それを用い、超流動転移に対する非平衡効果を BCS-BEC クロスオーバー全域で明らかにした。弱結合 BCS 領域では、熱平衡状態では見られない異常な疑ギャップ現象を伴うリエントラント転移が起こることや、この現象が非平衡 FFLO 状態に関係した対形成揺らぎに起因すること、および、この揺らぎにより、非平衡 FFLO 状態が不安定化することを示した。

第 5 章では、対形成揺らぎによる非平衡 FFLO 状態の不安定化が、系の持つ連続的な回転対称性と密接に関係していることを指摘した。そして、3 次元光格子を導入しこの対称性を破ると、Fermi 面が異方的になることで、この非平衡超流動状態が安定化することを、強結合理論に基づく計算により明らかにした。

第 6 章で、本論文のまとめと今後の展望を述べた。

審査の要旨

報告番号	甲　第5893号	氏　名	河村　泰良

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	博士（理学）	大橋　洋士
	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）河村泰良君の学位請求論文は、「駆動散逸冷却 Fermi 原子気体における非平衡 BCS-BEC クロスオーバー」と題し、全 6 章より構成されている。

BCS-BEC クロスオーバーとは、Fermi 粒子間にはたらく引力相互作用が強くなるにつれ、実現する超流動の性質が、金属超伝導で議論されている BCS 状態から、強く結合した分子の Bose-Einstein 凝縮(BEC)へと連続的に移行する量子多体現象である。これは、相互作用が自在に制御できる Fermi 原子気体で 2004 年に初めて実現され、それ以降、当該研究分野における中心テーマの一つとして活発に研究されてきた。更に近年、急速な実験技術の進歩により様々な非平衡状態がこの系で実現できるようになり、これまで熱平衡系において行われてきた BCS-BEC クロスオーバーの研究を非平衡系に発展させることで、新奇量子多体現象の発見が期待されている。しかし、非平衡状態は熱平衡状態に比べ多彩であるため、最適な実験条件や、期待される現象の情報が理論に求められているものの、本研究以前には、非平衡状態を扱える BCS-BEC クロスオーバーの理論は存在しなかった。

当該研究分野のこうした状況に対し、本研究は、Schwinger-Keldysh の非平衡 Green 関数を駆使することで、粒子の流入と散逸により非平衡定常状態になっている駆動散逸冷却 Fermi 原子気体を扱える非平衡 BCS-BEC クロスオーバー理論の構築に成功、それを用い、この系の非平衡相図を完成させるという重要な成果を挙げている。また、非平衡効果によって重心運動量がゼロでない対形成揺らぎの異常な増大が起こることや、系を光格子中に入れると、この揺らぎが抑制され、磁場中超伝導で議論されている Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov （FFLO） 状態に類似の新奇非平衡超流動(非平衡 FFLO 状態)が実現することを理論的に予言する、という成果も挙げている。

第 1 章は序論である。駆動散逸系の説明と扱うモデルの導入の後、研究目的が述べられている。

第 2 章では、駆動散逸冷却 Fermi 原子気体の超流動相を非平衡 BCS 平均場理論の枠組みで研究している。系の非平衡効果を制御する 2 つの熱浴によりもたらされる粒子の運動量分布の 2 段構造によって、通常の BCS 状態に加え、空間的に非一様な超流動秩序パラメータを有する非平衡 FFLO 状態が平均場解として得られることを示している。

第 3 章では、前章で得られた平均場解に微小変位を与え、その後の超流動秩序パラメータの時間発展を数値的に追跡することで、超流動状態の安定性を分析している。その結果、平均場近似の範囲では、非平衡 FFLO 状態が安定であることを明らかにしている。

第 4 章では、先ず、熱平衡系での BCS-BEC クロスオーバー理論の 1 つである強結合 T 行列理論を、非平衡定常状態に拡張する方法が詳説されている。次に、それを数値的に解き、超流動転移に対する非平衡効果を BCS-BEC クロスオーバー全域で明らかにしている。弱結合 BCS 領域では、非平衡 FFLO 状態に関係した対形成揺らぎがリエントラント転移を引き起こすことや、この対形成揺らぎにより、平均場理論では安定であった非平衡 FFLO 状態が不安定化することを明らかにしている。

第 5 章では、前章で得られた非平衡 FFLO 状態の不安定性が、熱平衡状態における通常の FFLO 状態同様、系の持つ連続的な回転対称性と密接に関係していることを指摘、3 次元光格子を系に導入しこの回転対称性を破ることで、非平衡 FFLO 状態が安定化することを、数値的に示している。

第 6 章では、結論として本研究の成果がまとめられている。

本研究により得られた非平衡 BCS-BEC クロスオーバーの理論は、近年様々な非平衡状態が可能になっている当該研究分野の発展に大いに貢献すると共に、励起子ポラリトンといった他の駆動散逸系の研究に対しても資するものがあり、高く評価できる。FFLO 状態は、超伝導や超流動、QCD といった様々な分野でその実現可能性が議論されており、非平衡効果により類似の超流動状態が実現することを理論的に予言した本研究の成果は、FFLO 状態の研究の更なる発展にも貢献すると判断する。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5894号	氏　名	佐々木　詩月

主論文題名：

リアルカラーディスプレイのためのランダム偏光フィルムの設計および特性評価

液晶，OLEDディスプレイには内部に偏光板が用いられており，偏光サングラスを着用してディスプレイを視認した際には偏光板の透過軸が直交する直交ニコル状態において画面が完全に見えなくなる．このブラックアウト問題を解消するため，直線偏光を円偏光に変換する4分の1波長板（QWP）が広く用いられている．しかし，QWPを透過した光の偏光状態は波長に依存するため，既存のQWPを用いたディスプレイは偏光サングラスの透過軸の角度により画像の色が変化して見える．ディスプレイの色変化を生じさせることなく，ブラックアウト問題を解消する方法として，本研究ではランダム偏光フィルム（RDF）を提案する．RDFはマイクロサイズの複屈折性粒子をポリマーフィルムに添加することで作製される．添加した粒子の複屈折により，RDFを透過した光は微小領域ごとに異なる偏光状態に変化する．本研究では，添加粒子のサイズ，フィルム母材として用いるポリマー，添加粒子の材料を変えてRDFの作製を行い，ディスプレイの色変化を解消し，かつディスプレイの鮮明度への影響が小さいRDFの設計を行った．

第1章は序論であり，本研究の背景と目的を示した．

第2章では，RDFの偏光解消の基礎知識として偏光と複屈折に関して概説した．

第3章では，RDFの偏光解消原理に関して説明し，RDFの設計方針を示した．

第4章では，ディスプレイの色変化の観点からRDFに添加する粒子サイズの検討を行った．粒径3.6および7.3 μmのカルサイト粒子を添加したRDFが，マクベスチャートの全24色に対し人間の眼には色の違いを認識できないとされる色度変化量を示した．これより，ディスプレイの色変化を解消するためには，おおよそ600–1200 nm以上のリタデーションが必要であることが示唆された．

第5章では，ディスプレイの鮮明度の観点からRDFに添加する粒子サイズと母材ポリマーの検討を行った．鮮明な画像を実現するためのカルサイト粒子の粒径は14.3 μm以上，母材ポリマーはポリスルホンであることが明らかになった．

第6章では，RDFの添加粒子材料の検討を行った．粒径20 μmのシルクパウダーを添加したRDFがディスプレイの色変化を解消し，さらに直交ニコル状態において最も鮮明な画像を実現することが明らかとなった．

第7章では，シルクパウダーを添加したRDFの偏光解消効果を解析した．シルクパウダーを添加したRDFにより，ディスプレイからの光の偏光度が99.9%から19.2%まで低減されることを示した．また，RDFが斜めからディスプレイを視認した際に生じる虹むらの解消にも有用であることを示した．

第8章は結論であり，得られた成果を総括し，今後の展望について述べた．

審査の要旨

報告番号	甲　第 5894 号	氏　名	佐々木　詩月

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	片山　靖
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士	朝倉　浩一
		慶應義塾大学准教授	工学博士	二瓶　栄輔
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	緒明　佑哉
		慶應義塾大学名誉教授	工学博士	小池　康博

学士（工学），修士（工学）佐々木詩月君提出の学位請求論文は「リアルカラーディスプレイのためのランダム偏光フィルムの設計および特性評価」と題し，8 章から構成されている．

液晶，有機発光ダイオードディスプレイには内部に偏光板が用いられており，偏光サングラスを着用してディスプレイを視認した際には偏光板の透過軸が直交する直交ニコル状態において画面が完全に見えなくなる．このブラックアウト問題を解消するため，直線偏光を円偏光に変換する 4 分の 1 波長板 （QWP） が広く用いられている．しかし，QWP を透過した光の偏光状態は波長に依存するため，既存の QWP を用いたディスプレイは偏光サングラスの透過軸の角度により画像の色が変化して見える．

本研究では，ディスプレイの色変化を生じさせることなく，ブラックアウト問題を解消する方法として，ランダム偏光フィルム （RDF）を提案している．RDF はマイクロサイズの複屈折性粒子をポリマーフィルムに添加することで作製される．添加した粒子の複屈折により，RDF を透過した光は微小領域ごとに異なる偏光状態に変化する．本研究では，その理論的原理を構築し，添加粒子のサイズ，フィルム母材として用いるポリマー，添加粒子の材料を変えて RDF を作製し，ディスプレイの色変化を解消し，かつ鮮明度への影響が小さい RDF の設計及び特性評価を行っている．

第 1 章は序論であり，本研究の背景と目的を示している．

第 2 章では，RDF の偏光解消の基礎として偏光と複屈折に関して概説している．

第 3 章では，RDF の偏光解消原理に関して説明し，RDF の設計方針を述べている．

第 4 章では，ディスプレイの色変化の観点から RDF に添加する粒子サイズの検討を行っている．粒径 3.6 および 7.3 μm のカルサイト粒子を添加した RDF が，マクベスチャートの全 24 色に対し人間の眼には色の違いを認識できないとされる色度変化量を示している．これより，ディスプレイの色変化を解消するためには，おおよそ 600-1200 nm 以上のリタデーションが必要であることを明らかにしている．

第 5 章では，ディスプレイの鮮明度の観点から RDF に添加する粒子サイズと母材ポリマーの検討を行っている．鮮明な画像を実現するためのカルサイト粒子の粒径は 14.3 μm 以上，母材ポリマーはポリスルホンが適していることを明らかにしている．

第 6 章では，RDF の添加粒子材料の検討を行っている．粒径 20 μm のシルクパウダーを添加した RDF がディスプレイの色変化を解消し，さらに直交ニコル状態において最も鮮明な画像を実現することを明らかにしている．

第 7 章では，シルクパウダーを添加した RDF の偏光解消効果を解析している．シルクパウダーを添加した RDF により，ディスプレイからの光の偏光度が 99.9%から 19.2%まで低減されることを示している．また，RDF が斜めからディスプレイを視認した際に生じる虹むらの解消にも有用であることを明らかにしている．

第 8 章は結論であり，得られた成果を総括するとともに，今後の展望について述べている．

以上要するに，本論文は，ディスプレイの色変化の解消，鮮明度への影響が少ないリアルカラーディスプレイを実現するための理論的原理を構築し，最適なランダム偏光フィルムの設計指針を詳細に検討し，実証したものであり，ディスプレイ分野において，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5895号	氏　名	秋本　直郁

主 論 文 題 名 ：

深層生成モデルを用いた画像の周辺補完　～通常画角から 360 度へ～

アクションカメラやヘッドマウントディスプレイをはじめとして，多様な撮影デバイスと表示デバイスが普及している．そのため，撮影された画像の縦横比と表示画面のサイズが異なることが頻繁に発生しており，最適な表示のために画像のピクセル数を増減させる処理が行われる．本研究では，画像の周辺ピクセルを補完するという Image outpainting を用いて，画像拡張と 360 度画像の生成を行う．これらは画像の不足している領域を補うという処理であるため，多様な画面サイズに合わせた表示やコンテンツ制作にも有用である．しかしながら，外挿問題であるため，内挿を対象にした既存の Image inpainting 手法では望ましい結果を得ることができず，新たな手法の探求が必要である．そこで本研究では，問題を簡単化するための入力画像に対する前処理と，情報を広範囲から集約するためのネットワーク構造を持つ Outpainting 手法を検証し，その生成品質の高さで 3DCG 等のコンテンツ制作での実利用へ近づけることを目的とした．

第 1 章に，本研究の背景と目的を述べた．

第 2 章では，深層学習の基礎技術と，本研究に関連する先行研究について概説した．

第 3 章では，Image outpainting による画像拡張に取り組んだ．既存手法の課題として，入力ピクセルと離れた位置の補完ピクセルの質が下がること，適用される画像のシーンが限定されることを挙げた．本研究での目標は，これらの改善に加え，生成画像のセマンティックのコントロール性の付与とした．これら目標に対し，入力画像の前処理の一種となる Mirrored input を提案した．そして，広範囲の情報を集約するための CNN 手法の検討を行った．Mirrored input は，補完領域の近くに入力ピクセルを配置することで，より補完の質が向上することを明らかにした．さらにそれは，多様なシーンに適用されてきた Inpainting 手法の性能を引き出せることと，生成をコントロールする条件付けとなることを実験で示した．一方，広範囲の情報を集約する CNN 手法でさえ，Mirrored input が有効であったことから，Outpainting にはより一層広範囲から情報を集約する方法が必要であるという課題を明らかにした．

第 4 章では，Image outpainting による 360 度画像補完に取り組んだ．第 3 章で明らかにした広範囲から情報を集約すべきという知見を生かし，非局所的に情報を集約する目的で Transformer を導入した手法を提案した．結果として，既存手法よりも自然な見た目の生成が可能であることを示した．また，Transformer の出力からのサンプリングにより多様な出力結果を得ることで，出力結果を選択する機会を利用者に与えられることを示した．既存手法の課題の 1 つである，学習解像度への過適合に対して，補完と調整という 2 段階の生成方法を導入することで解決できることを示した．そして最後に応用として，3DCG ソフトウェア上で，生成された 360 度画像を遠景画像として利用可能であることをデモし，Image outpainting がコンテンツ制作での実利用へ近づいたことを示した．

第 5 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 5895 号	氏　名	秋本　直郁

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
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	杉本　麻樹

学士（工学），修士（工学）秋本直郁君提出の学位請求論文は、「深層生成モデルを用いた画像の周辺補完 ～通常画角から 360 度へ～」と題し，5 章から構成されている．

アクションカメラやヘッドマウントディスプレイをはじめとして，多様な撮影・表示デバイスが普及している．これらは画像の縦横比と表示画面のサイズが異なることから，最適な表示のために画素数を増減させる処理が求められる．この課題に対応すべく，本研究では，画像の周辺ピクセルを補完するという Image outpainting を用いた新たな画像拡張及び 360 度画像生成手法を提案している．これらは画像の不足領域を補う処理であるため，多様な画面サイズに合わせた表示やコンテンツ制作にも有用である．しかしながら，画像の外挿問題であるため，内挿を対象にした既存の Image inpainting 手法では望ましい結果を得るのが困難であった．本研究では，入力画像に対する前処理と，情報を広範囲から集約するためのネットワーク構造を持つ高精度な Outpainting 手法を提案し，画像生成による画質や多様性の評価を通して，3DCG のコンテンツ制作での実利用が可能であることを示している．

第 1 章では，研究背景を述べた後，本研究の目的を明らかにしている．

第 2 章では，深層生成モデルの基礎と，関連する画像周辺補完についての先行研究を概説した上で，本論文において提案される手法の位置づけを明らかにしている．

第 3 章では，Image outpainting による画像拡張の提案手法について述べている．既存手法の課題として，入力ピクセルと離れた位置の補完ピクセルの質が下がること，適用される画像のシーンが限定されることを挙げている. 提案手法では, 入力画像の前処理の一種となる Mirrored input を用い，広範囲の情報を集約するための Convolutional Neural Networks（CNN）手法の検討を行っている．Mirrored input は，補完領域の近くに入力ピクセルを配置することで，より補完の質が向上することを明らかにしている．また，多様なシーンに適用されてきた Inpainting 手法の性能を改善できること，生成をコントロールする条件付けとなることを実験で示している．一方，広範囲の情報を集約する CNN 手法でさえ，Mirrored input が有効であったことから，Outpainting にはより一層広範囲から情報を集約する方法が必要であるという知見を明らかにしている．

第 4 章では，Image outpainting による 360 度画像補完の提案手法について述べている．前章で明らかにした知見を生かし，非局所的に情報を集約する目的で Transformer を導入した新しい手法を提案している．結果として，既存手法よりも自然な画像の生成が可能であることを示している．また，Transformer の出力からのサンプリングにより多様な出力結果が得られることを示している．既存手法の課題の 1 つである，学習解像度への過適合に対しては，補完と調整という 2 段階の生成方法を導入することでこの課題を解決できることを示している．本手法の応用例として，3DCG ソフトウェア上で生成された 360 度画像を遠景画像として利用可能であることを明らかにしている．

第 5 章では，結論として本研究で得られた貢献を要約するとともに，今後の課題と技術の発展可能性について述べている．

以上要するに，本論文は深層生成モデルを用いた新たな Image outpainting 手法により，既存手法よりも自然で高品質，かつ多様な 360 度画像を生成可能であることを示したもので，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5896号	氏　名	目片　悠貴

主論文題名：

Development of a method for maintaining arousal levels
by inducing intrinsic motivation
（内発的動機づけの誘発による覚醒維持手法の確立）

近年、航空機操縦や自動車運転などの人間・システム系における自動化が進んでいる。自動化に伴う監視中心の制御形態では、人間とシステムのインタラクションが減少・単調化することによる覚醒水準の低下が懸念され、このことは、非常時などに人間の介入が必用となる半自動システムの場合、事故等の要因となり得る。従来の覚醒維持のアプローチとして、睡眠管理や疲労管理に加えて、警告音や振動などの単純外的刺激を用いた手法が主に検討されており、実現場に取り入れられてきた。一方で、人の内的変化は、覚醒水準に影響を及ぼすことが知られているが、これに着目した覚醒維持手法は未だ確立されていない。そこで、本研究では、心理学理論および生理学理論に基づく仮説立てから、内発的動機づけの下位要因の支援を人間・システム系に組み込むことによる新たな覚醒維持手法を提案・検証した。

第一に、自動運転（SAE レベル 2 相当）への適用を想定し、心理学理論に基づく内発的動機づけの源泉の下位要因を支援する一方法として、ドライバの主体性、能力の発揮の実感、システム（自動車）との良好な関係構築を満たす音声情報の提示を考案した。ドライビングシミュレータによる実験から、これらの情報提示を行った条件において、内発的動機づけに関連する脳領域に賦活の傾向が見られること、脳波および自律神経系の生理指標に覚醒の傾向を示す反応が見られることが分かった。第二に、ドライバの顔画像データを取得し､覚醒水準をリアルタイムで 5 段階推定するモデルを構築した上で、内発的動機づけの誘発による覚醒維持効果を保証する情報提示タイミングを実験的に探索した。結果から、レベル 1（覚醒水準最高）に対して遅くともレベル 4 に達するより前に情報提示を行う必要があることを明らかにした。第三に、内発的動機づけの誘発による覚醒維持手法の効果強度を、既存の単純外的刺激（警告音、振動、香り、ガム咀嚼）による手法と比較した。結果から、同手法は既存の単純外的刺激による手法と同等かそれ以上の覚醒維持効果を有し、かつ、煩わしさや効果減衰が少ないことを明らかにした。

以上のことから、監視中心の制御形態において、内発的動機づけを誘発する情報提示は、従来検討されてきた個人の疲労管理、単純外的刺激に次いで、人間の覚醒水準を維持する第 3 の手法として有効であることを明らかにした。

審査の要旨

報告番号	甲　第 5896 号	氏　名	目片　悠貴

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	中西　美和
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	大門　樹
		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（工学）	重野　寛
		千葉大学教授	博士（理学）	岩永　光一

目片悠貴君の博士論文「Development of a method for maintaining arousal levels by inducing intrinsic motivation（内発的動機づけの誘発による覚醒維持手法の確立）」は、人間の内発的動機づけを誘発することにより覚醒水準を維持させるという、従来一般的な単純外的刺激の提示とは異なる新たな手法について、具体例を提案し、実験的にその効果を検証したものである。

人間・システム系において、自動化に伴うインタラクションの減少・単調化は、人間の覚醒水準の低下をもたらすとされ、このことは、非常時などに人間の介入が必要となる半自動システムの場合、事故等の要因となり得る。従来の覚醒維持のアプローチは、警告音や振動などの単純外的刺激を用いた手法が主であった。本研究は、人の内的変化が覚醒水準に影響を及ぼすことに着目し、心理学理論および生理学理論に基づく仮説立てから、内発的動機づけの下位要因の支援を人間・システム系に組み込むことで、人間の覚醒維持を図る新たな手法を提案・検証している。

各章の概要は、次の通りである。

第 2 章「Derivation of the design for information presentation that induces intrinsic motivation（内発的動機づけを誘発する情報提示デザインの導出)」では、自動運転（SAE レベル 2 相当）への適用を想定し、内発的動機づけに関する心理学理論を整理した上で、内発的動機づけを誘発する具体的方法の一つとして、ドライバの主体性、能力の発揮の実感、システム（自動車）との良好な関係構築を満たす情報提示を提案している。

第 3 章「Experimental verification of the effects of the information presentation aimed at inducing intrinsic motivation on maintaining arousal levels（内発的動機づけの誘発をねらいとした情報提示による覚醒維持効果の実験的検証)」では、ドライビングシミュレータによる実験から、内発的動機づけを誘発する情報提示を行った条件において、実験参加者の覚醒水準が高く維持される傾向があることを明らかにしている。

第 4 章「Consideration of information presentation timing to improve the effectiveness at which arousal levels are maintained by inducing intrinsic motivation（内発的動機づけの誘発による覚醒維持効果の向上のための情報提示タイミングの検討)」では、ドライバの顔画像データから覚醒水準をリアルタイムで 5 段階推定する機械学習モデルを構築した上で、内発的動機づけの誘発による覚醒維持効果を高める情報提示タイミングとして、5 段階のうち 1 段階（覚醒水準最高）に対して遅くとも 4 段階に達するより前に情報提示を行う必要があることを、実験に基づいて明らかにしている。

第 5 章「Identification of the effects the proposed method in maintaining arousal levels and comparison with existing methods（内発的動機づけの誘発による覚醒維持手法の効果強度の同定)」では、内発的動機づけの誘発による覚醒維持手法の効果強度を、既存の単純外的刺激（警告音、振動、香り、ガム咀嚼）による手法と比較し、これらの既存手法と同等かそれ以上の覚醒維持効果を有し、かつ、煩わしさや効果減衰が少ないことを明らかにしている。

本論文は、今後益々増加する監視中心の制御形態において、人間の覚醒水準を維持する手法として、個人の疲労管理や単純外的刺激による方法とは異なる第 3 の手法を提案し、有効性と適用効果を実験的に示している点で高く評価できる。

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5897号	氏　名	Wei, Kaijie

主論文題名：

FPGA-Based Image Processing Algorithms Implementations
for Advanced Driver Assistance System
（先進的運転支援システムに向けた画像処理アルゴリズムのFPGAによる実装）

ヒューマンエラーによる車両事故を防止するため、先進的運転支援システム（ADAS）は一部の自動車メーカーで採用されており、最新モデルのほとんどがこのサービスを提供している。しかし、車載システムには電力が限られている。FPGA（Field-Programmable Gate Array）はデータ処理スピードとエネルギー効率が優れている点で、優れたプラットフォームである。本論文では、ADASの二つ重要な機能を着目し、FPGAを用いて、画像認識のためのCNN(Convolutional Neural Network)と距離知覚のためのステレオマッチングシステムを実装した。開発スピードと開発後のメンテナンスを考慮し、両システムとも、High-Level Synthesis（HLS）を設計ツールとして採用した。

まず、FPGAボード上のCNN実装について述べる。自動運転ブームにより、エッジデバイスへのニューラルネットワークアプリの移植が進められている。様々な問題の中で、エネルギー消費量とリソース使用量が最も深刻である。そこでGPU(Graphics Processing Unit）やTPU（Tensor Processing Unit）などのハイエンドデバイスの代わりに、エネルギー効率優れているFPGAを適用する。メーカーの立場から考えると、製造コストを考えなければならないが、ローコストFPGAを採用すると、限られた内部メモリがさらに問題になる。これらの問題を踏まえ、ローエンドFPGAに向けCNNシステムのフレームワークを開発した。提案したフレームワークは主に二つの部分、モデル軽量化とハードウェア最適化が特徴である。最初に、プルーニングと2値化の技術でモデルを軽量処理する。モデル軽量化には認識精度と圧縮率がトレードオフの関係で、両方のバランスをとる必要がある。次に、CNNの構造要素を考えた上で、HLSで各レイヤーの設計を行う。2値化のお陰で、ビットベースの計算で、計算量もリソース使用量も抑えられる上、HLS の技術で inter-/intra-レベルのパイプラインが実現できた。また、スライドウィンドを使い、リソースの再利用率を最大化した。フレームワークを用い、Vivadoで設計したモジュールを Zynq システムに組み込み、システムを構築した。提案したフレームワークはPYNQ-Z1やZCU104などのFPGAボードを使い、Alexnet、YOLOv3とBinaryConnectで評価した。例えば、YOLOv3をローエンドPYNQ-Z1に実装した場合、モデル軽量化について、

元のモデルに比べ、97.71%パラメータが圧縮され、5.32%mAP（Mean Average Precision）の認識精度しか損失しない。ハードウエア最適化について、この極端なリソース条件で、設計したシステムはARMコアと比べ、22倍も早くなった。

次にFPGAベースのステレオマッチングシステムに関して述べる。近年の車載製品において、バックモニタの普及が進んでいるが、ディスプレイの映像は平面に配置され、奥行情報が欠如している。立体ディスプレイで奥行情報を付与することで、物体の遠近の認識ミスによる車体と物体の接触が避けられると考えられる。立体像を構築するには、奥行情報を手に入る必要がある。電力効率とメンテナンスの面を考慮し、FPGAをプラットフォームにする。Fixstars社によるlibSGMを対象アルゴリズムとし、HLSの設計には、5つのモジュールに分け、提案システムRT-libSGMを構築した。まず、複数のバッファを用いたコスト計算を行なった。スライドウィンドウとHLS技術の組み合わせで、内部メモリの利用率を向上した上、モジュールの性能も上げる。次には、4方向コスト集約でコストを最適化する。左コストのデータ依存性を除去するには、インターリーブと 並び替えの処理を行った。バッファリングとFIFOの設計で、内部メモリのデータの利用率を上げる。視差値を決定するため、Winner-take-all（WTA）に従い、集約コストを最小化する視差値を適用した。提案システムは二分探索法による最小値を探索し、木構造一層分の生成を 1 クロックにて完了できる。視差値のリファインするため、uniqueness checkとL-R consistency checkで異常値を排除し、中央値フィルタで視差画像のノイズを軽減した。さらにPragmaの利用で、各モジュールで並列計算を行い、システム性能を最適化した。実際のシステムではZED 2iにより、画像2枚を得て、FPGAボードであるM-KUBOSでlibSGMを計算した。生成した視差画像はHDMIで出力し、Teranex mini 12Gコンバータを用いて、SDIとHDMIの信号変換を行った。本システムのライブラリは柔軟な設計になっており、パラメータを変更することによって種々のFPGA において動作可能である。GPUに負けない性能が達成できることを確認した。

本稿では、上記2つの提案システムの詳細な実装と評価を述べる。FPGA上のCNN実装では、極端な条件下で、いくつかのCNNモデルをPYNQ-Z1やZCU104などのFPGAボードで実装することで提案機構の実用性と拡張性を示した。一方、RT-libSGM はアルゴリズム構造とFPGAの特徴を考えた上、各モジュールを設計した。これにより、システムの性能が保証できる。

審査の要旨

報告番号	甲　第 5897 号	氏　名	Wei, Kaijie（ウェイ　カイジ）

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）	斎藤　英雄
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	西　宏章
	埼玉大学教授	博士（工学）	新井　正敏

工学士、修士（工学）Wei Kaijie 君の学位請求論文は、FPGA-Based Image Processing Algorithms Implementations for Advanced Driver Assistance System（先進的運転支援システムに向けた画像処理アルゴリズムの FPGA による実装）」と題し 7 章から成る。

ADAS（Advanced Driving Assistance System）は、ヒューマンエラーによる事故を防ぐため、近年の車両には不可欠なものとなり、その機能は益々高度化し、高い処理能力が必要となっている。最近の強力な CPU や GPU（Graphics Processing Unit）を用いれば、性能自体を満足することは可能だが、大きなエネルギーを消費する。専用の ASIC（Application Specific Integrated Circuit）を開発すれば、性能とエネルギー消費の問題は解決するが、柔軟性が低いため次々に開発される新しい手法に対応することができない。書き換え可能な LSI である FPGA（Field Programmable Gate Array）は、すべての要求を満足するプラットフォームとして注目されているが ASIC に比べ回路密度が低く回路単価も高い Wei 君の研究は、制限された資源しか持たない安価な FPGA 上に、重要な ADAS アプリケーションである画像認識とステレオマッチングを構築するための方法論と実装例を示すものである。本論文の内容は以下の通りである。

1 章で研究の意義と論文の構成を示し、2 章では NN（Neural Network）を用いた画像認識とステレオマッチングのアルゴリズムを紹介する。3 章では、FPGA 上での CNN（Convolutional Neural Network）の各種実装手法を紹介する。FPGA への CNN 実装は過去においていくつかの試みがあるが、資源が制限されている FPGA ボードへの実装には様々な困難な点がある点を指摘している。4 章では本研究の主題の一つである CNN の小規模 FPGA への実装手法の提案を行う。FPGA の利用資源の節約についてアルゴリズムレベルと実装レベルで様々な手法が提案されている。本論文では、精度低下を抑えた回路プルーニングおよびバイナリ量子化回路圧縮などの手法を組み合わせて、認識精度の低下を防ぎつつ、実装可能な設計を得る手法を提案している。安価な CPU-FPGA 混載デバイスを用いた PYNQ-Z1 ボードに提案手法を用いた高性能な NN モデル YoLo tiny3 を実装することで、ほとんど認識精度を落とさず 22 倍の加速が実現できることを示した。これは Xeon E5-2667　CPU を用いたサーバーに比べても 3 倍程度優れた性能である。さらに、HLS（High Level Synthesis）設計手法を用いているため、変更が容易で、メインテナンス性にも優れている。

5 章では、ステレオマッチングの FPGA への実装を調査し、新しいアルゴリズムである libSGM を紹介している。6 章では、本研究のもう一つの主題である FPGA 向きのステレオマッチングアルゴリズム RT-libSGM の提案と実装を述べる。RT-libSGM は libSGM を基にし、アルゴリズムの各段階に、並列化、パイプライン化、Slide-window の利用などの手法を導入し、効率良く FPGA 上に実装できるようにしたものである。この手法をややサイズの大きな CPU-FPGA 混載デバイス上に同様に HLS を用いて実装し、Tegra X2 GPU 上で libSGM を実行した場合に比べ 2 倍の性能をやや少ない電力で実現している。

7 章では、研究成果の ADAS への貢献をまとめると共に、今後の課題を述べている。

以上、Wei 君の研究は、本格的な画像認識、ステレオマッチングアルゴリズムを実装する手法と優れた FPGA 実装例を示した点で、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 5907 号	氏　名	露木　雅文

主 論 文 題 名 ：

アルコールの OH 伸縮振動およびポリインの CCH 変角振動に起因する
電子密度変化と赤外吸収強度の分子依存性に関する理論的研究

分子の赤外吸収強度は、その構造変化に起因する電子密度変化についての詳細な情報を含むことから、分光学はもとより関連分野において長年研究されてきた。筆者は本論文で吸収強度の分子依存性が異なった 2 つの振動モードに注目し、それらの分子依存性の背景にある化学的な描像を明らかにするため、ローカルモードモデルによる振動状態計算と電子密度が示す線形および非線形応答の概念を用いて理論的に分析した。

本論文で注目する 1 つめの振動モードは（置換）エタノールの OH 伸縮振動である。その吸収強度は、基音($\Delta v = 1$)と倍音($\Delta v \geq 2$)で顕著に異なった分子依存性を示す。特に、基音強度が置換基に強く依存する一方で、倍音強度はむしろ配座に強く依存する。従来、倍音強度が置換基に依存しにくい性質は Universal Intensity Concept（UIC）と呼ばれてきたが、本論文ではさらに配座依存性も含めてこれらの強弱を理論的に解析した。

本論文で注目する 2 つめの振動モードは、直鎖ポリイン($C_{2n}H_2$)の $\pi_g+\pi_u$ 結合音である。一般に、二つの異なった振動モードが同時励起する結合音は、基音に比べ非常に弱い。しかし、$C_{2n}H_2$ の $\pi_g+\pi_u$ 結合音は基音に匹敵する強い強度を示す上に、三重結合数 n とともに強くなる性質がわかっている。

第一章では序論として、赤外分光に関する基礎的な理論と実験的に知られている性質をまとめた。すなわち、赤外分光法、XH 伸縮振動の UIC、$C_{2n}H_2$ の $\pi_g+\pi_u$ 結合音強度について記述し、本論文の目的を述べた。

第二章は理論の章として、本研究と先行研究で用いられている計算方法、考え方と特徴をまとめた。すなわち、赤外吸収強度の計算方法を一般的に述べた上で、一連の振動状態計算の方法として基準振動解析法、2 次の振動摂動法、ローカルモードモデルについて述べた。さらに、分子の電子密度を構成原子や結合の寄与に分割して分析する方法として Atoms in Molecules （AIM） 法、概念的密度汎関数法の枠組における分子構造変化に起因する電子密度変化を計算する方法として線形および非線形応答関数の表式をまとめ、それぞれの特徴を記述した。

第三章では、特に、エタノールの配座によって OH 伸縮振動の倍音強度が異なることをローカルモードモデルによる理論計算で示したうえで、電子密度のプロトン座標による微分量を AIM 法と線形応答関係を使って分析した。その結果、倍音強度の配座依存性は、振動する OH 基よりも CH や CC 結合の寄与に由来すること、特に OH 結合を内部回転させて考えると、OH に対してアンチペリプラナーな位置の CH の電子移動量が増大し、また CC 結合上の電子移動量および方向はほぼ一定のまま、OH 基と CC 結合軸との相対的な位置関係が変化することによって生じることを明らかにした。

第四章では、まず、$C_{2n}H_2$ の基準座標における $\pi_g+\pi_u$ 結合音強度が、片側 CCH 変角振動のローカルモードモデル描像では倍音吸収強度に対応することを示した。三重結合数 n とともに $\pi_g+\pi_u$ 結合音強度が増大することを解釈するため、電子密度のプロトン座標による微分量を、線形および非線形応答関係を用いて分析し、その増大は、共役鎖の伸長によって電子密度が分子軸方向に歪みやすくなることに起因することを明らかにした。

第五章では、分子構造と基音・倍音吸収強度の関係を、線形および非線形応答の考え方に基づいた静電的な解釈により、注目した 2 つの現象に新たな解釈を与えられることを総括した。本論文の結果は、分子振動にともなう立体電子効果を定量的に評価するための一表現を与えたものである。

審査の要旨

報告番号	甲　第 5907 号	氏　名	露木　雅文

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学准教授	博士（理学）	畑中　美穂
	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	理学博士	中嶋　敦
		慶應義塾大学教授	工学博士	吉岡　直樹

学士（理学)、修士（理学） 露木雅文君の学位請求論文は、「アルコールの OH 伸縮振動およびポリインの CCH 変角振動に起因する電子密度変化と赤外吸収強度の分子依存性に関する理論的研究」と題し、全 5 章より構成されている。

分子に赤外光を照射すると、異なる振動状態間のエネルギー差に対応する波数の光が吸収される。一般に、振動量子数が 1 異なる状態間の励起に起因する基音は、吸収強度が大きく、吸収波数が分子に依存するため、有機化合物や星間分子など、幅広い物質の同定に用いられてきた。これに対し、振動量子数が 2 以上異なる状態間の励起に起因する倍音や、異なる振動モードが同時に励起する結合音は、調和振動近似の元では禁制遷移となるため、基音に比べて吸収強度が小さいものの、基音のスペクトルとは異なる情報を内包することが示唆されている。例えば、アルコールの OH 伸縮振動の基音吸収強度は、置換基依存性が大きく、配座依存性は小さいが、倍音の吸収強度の場合は、置換基依存性が小さく、配座依存性は大きいという逆の傾向が見られる。また、ポリイン $C_{2n}H_2$（$n = 1, 2,\cdots$）の CCH 変角振動の結合音には、基音と同程度の吸収強度を持ち、炭素鎖長を伸ばしていくことで、吸収波数はすぐに一定値に収束するが、吸収強度は増加するという特徴がある。本研究では、局所的な振動（ローカルモード）モデルを用いて振動状態を計算することと、分子振動に伴う電子密度の歪みが倍音や結合音の吸収強度に与える影響を解析することで、上記の 2 つの現象に対する理論的な解釈を与えている。

第 1 章は序論である。赤外分光法や分子振動の基礎や、倍音、結合音に対する先行研究の紹介の後に、研究目的が述べられている。

第 2 章では、本学位論文で用いる計算手法や解析法が述べられている。特に、非調和性を考慮した倍音、結合音の吸収強度の計算方法と、線形応答関数を用いて、分子振動に伴う電子密度の歪みが吸収強度に与える効果を解析する方法について詳説されている。

第 3 章では、アルコールの OH 伸縮振動における基音と倍音吸収強度の置換基依存性と配座依存性について理論的解析を行っている。2 種類のアルコール（エタノールと 2,2,2-トリフルオロエタノール）を例に、OH 伸縮振動の倍音吸収強度が置換基にほぼ依存しないことと、配座に依存することをローカルモードモデルによる理論計算で確認した上で、OH 伸縮振動に伴う電子密度の歪みが、倍音吸収強度に与える影響を分析している。その結果、倍音吸収強度の配座依存性は、振動する OH 基よりも置換基の CC 結合や CH 結合上の微小な電子移動に由来することを明らかにしている。

第 4 章では、ポリインの CCH 変角の結合音強度の炭素鎖長依存性の解析を行っている。ローカルモードモデルを用いることで、結合音強度が片側の CCH 変角振動の倍音強度で表現できるため、結合音強度にも第 3 章と同じ解析を適用できることを示している。実際に、CCH 変角振動の結合音強度を解析することで、結合音吸収強度が大きい理由が、ポリインの酸性度が高い、すなわち CH 結合上に強い分極が生じるためであることを明らかにしている。さらに、炭素鎖が長くなることで結合音吸収強度が大きくなるのは、電子密度が分子軸方向に歪みやすくなることに起因することを明らかにしている。

第 5 章では、結論として本研究の成果がまとめられている。

本研究で得られた解析結果は、基音、倍音、結合音の吸収強度の分子依存性や配座依存性を、分子内の電荷分布や分子振動に伴う電子密度の歪みを通して包括的に解釈したものであり、高く評価できる。

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5908号	氏　名	野村　晶代

主論文題名：

界面スピン軌道相互作用によるスピン流変換とスピン間相互作用に関する研究

電子の有する電荷自由度に加え、スピン自由度を自在に制御することで、従来の枠組みを超えた次世代電子情報技術の基盤となるのがスピントロニクスである。近年、スピントロニクスにおいてスピン軌道相互作用が生み出す新現象・新機能の発見が相次いでおり、このようなスピン軌道相互作用を中心とした研究領域はスピンオービトロニクスと呼ばれる。スピンオービトロニクスの基盤となるのは、スピン軌道相互作用によるスピン流変換とスピン間相互作用である。スピンオービトロニクスの端緒を開いたのは、重金属バルク中のスピン軌道相互作用によるスピン流変換現象の観測であるが、一方でバルクスピン軌道相互作用のみならず、空間反転対称性の破れに起因する界面スピン軌道相互作用の重要性も指摘されてきた。本博士研究では、顕著な界面スピン軌道相互作用が期待される界面構造に注目し、界面スピン軌道相互作用によるスピン流変換・吸収とスピン間相互作用の増強効果を観測した。

本論文は8章から構成される。第1章は序論として研究背景およびスピンオービトロニクスにおける物理現象について述べ、本研究の位置づけを示す。第2章では、スピン流と磁化との相互作用およびスピン軌道相互作用に基づくスピン流・電流変換現象の理論を述べ、本研究の予備知識を与える。第3章では本研究で用いた磁化ダイナミクス・スピン流・Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用（DMI）・電流誘起トルクの定量手法について述べる。第4章では、$Ni_{20}Fe_{80}$/Ag/Bi 三層膜においてスピンポンピングによる Ag/Bi 界面での逆 Rashba-Edelstein 効果を観測し、スピン流から電流への変換効率の温度依存性を明らかにした結果を示す。第5章では、高絶縁性トポロジカル絶縁体 $Sn_{0.02}$-$Bi_{1.08}Sb_{0.9}Te_2S$ におけるスピン流吸収を調べた結果を示す。室温付近ではバルク及び表面状態によるスピン吸収が観測されるのに対し、低温において表面状態によるスピン流の吸収が支配的となることを示す。第6章では、Re/Co/Pt 構造における DMI の定量結果について述べ、Re/Co および Co/Pt 界面 DMI により巨大な DMI が発現することを示す。第7章では、Re/Co/Pt 構造、Re/Ni 構造、Re/$Ni_{81}Fe_{19}$ 構造における電流誘起トルクに関する結果を示す。Re/Ni 構造における電流誘起トルクの符号と長距離拡散から、軌道流および軌道トルクの存在が示される。第8章では本研究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5908号	氏　名	野村　晶代

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（理学）	能崎　幸雄
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	牧　英之
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	海住　英生

学士（工学），修士（工学）野村晶代君の学位請求論文は「界面スピン軌道相互作用によるスピン流変換とスピン間相互作用に関する研究」と題し，全 8 章より構成される．

スピン流とスピン軌道相互作用を中心とする電子物理工学としてスピンオービトロニクスがある．スピンオービトロニクス現象の理解とデバイス応用において重要となるのは，スピン流と電流の変換・磁気構造の制御・磁気構造の電気的操作に集約される．重金属におけるスピンホール効果の観測以来，これらのスピンオービトロニクス研究の中心的役割を担ってきたのは重金属バルクのスピン軌道相互作用であった．しかし，空間反転対称性の破れた界面特有のスピン軌道相互作用の重要性も指摘されてきた．そこで本研究では，スピンオービトロニクス現象の顕在化が期待される界面に注目し，スピン流変換現象における界面スピン軌道相互作用の役割を明らかにするとともに，カイラル磁気構造の安定化を実現する Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用（DMI）の増強効果を観測し，さらに電気的磁化操作の基盤となる電流誘起スピン・軌道トルクを定量した．

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，スピン流と磁化の相互作用およびスピン軌道相互作用に基づくスピン流・電流変換現象の理論が述べられる．第 3 章では，磁化ダイナミクス・スピン流・DMI・電流誘起トルクについて，実験方法及び解析手法が示される．第 4 章では，スピンポンピングによる Ag/Bi 界面での逆 Rashba-Edelstein 効果を観測し，スピン流から電流への変換効率の温度依存性を明らかにした実験が示される．第 5 章では，高絶縁性トポロジカル絶縁体におけるスピン流吸収に関する実験について述べられる．ここでは，スピン流吸収測定の温度依存性測定が示され，トポロジカル絶縁体のバルク・表面状態によるスピン吸収が議論される．第 6 章では，Re/Co/Pt 構造における DMI について議論され，Re/Co および Co/Pt 界面に起因する巨大な相加的 DMI の発現が示される．第 7 章では，Re/Co/Pt 構造における界面スピン軌道トルクについて述べられる．さらに Re/Ni 構造における電流誘起トルクに関する実験が示され，観測された電流トルクの符号と膜厚依存性から，軌道流および軌道トルクの存在が示される．第 8 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，界面スピン軌道相互作用が鍵となるスピン流変換・スピン間相互作用・電流誘起トルクに関する新しい知見を得たものであり，スピンオービトロニクスの物理，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5909号	氏　名	林　宏樹

主論文題名：

金属系における異常・スピン・軌道ホール効果と電流誘起トルクに関する研究

多バンド輸送を起源とする内因性ホール効果は物質中のスピン依存伝導の理解に重要な役割を果たしてきた。強磁性体中のスピン依存伝導現象である異常ホール効果において内因性機構の重要性が初めて認識され、さらにスピンホール効果においても内因性機構が支配的であることが明らかになってきた。異常ホール効果とスピンホール効果はスピン流の電気的生成を可能とする。さらに内因性ホール効果の一つとして、軌道流の生成を可能とする軌道ホール効果の存在も理論的に指摘されてきた。スピン流と軌道流は、強磁性体中の磁化との相互作用により電流誘起トルクを生み出し、これによる磁化の電気的制御はスピン軌道相互作用を中心としたスピントロニクスの基盤である。本博士研究では、金属系における異常・スピン・軌道ホール効果に注目することで、スピン流と軌道流による電流誘起トルクの増大機構を探索した。

本論文は全7章から構成される。第1章では序論として本研究の研究背景と位置づけについて述べる。第2章では内因性ホール効果と電流誘起トルクに関する理論を述べる。第3章では本研究で用いた解析方法及び実験方法について述べる。第4章では、PtO_x/Co構造における異常ホール効果に関する研究について述べる。異常ホール効果の温度依存性と Co 膜厚依存性から、PtO_x/Co 界面における外因性機構によって異常ホール抵抗率が増大することを示す。第 5 章では、代表的スピントロニクス素子である Pt/強磁性金属構造におけるスピンホール効果と電流誘起トルクに関する研究について述べる。本構造における電流誘起トルクは強磁性金属の選択に強く依存することを明らかにし、これが界面におけるスピン透過とスピン反射により説明されることを示す。第6章では軌道ホール効果による電流誘起トルクに関する研究を述べる。スピンホール効果を無視できる Ti によって巨大な電流誘起トルクが現れることを示し、この電流誘起トルクの強磁性物質依存性及び膜厚依存性から、この起源が軌道ホール効果によるものであることを示す。さらに、スピンホール効果と軌道ホール効果が競合する W において、電流誘起スピン・軌道トルクのクロスオーバーを観測した結果を示す。第7章では、本研究の結論と今後の展望を述べる。

審査の要旨

報告番号	甲　第 5909 号	氏　名	林　宏樹

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	理学博士	江藤　幹雄
		慶應義塾大学准教授	Ph.D.	清水　智子
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	海住　英生

学士（工学），修士（工学）林宏樹君の学位請求論文は「金属系における異常・スピン・軌道ホール効果と電流誘起トルクに関する研究」と題し，全 7 章より構成される．

強磁性体における異常ホール効果の起源として多バンド構造に起因する内因性メカニズムの重要性が明らかになって以来，内因性ホール効果に関する研究はスピン輸送現象の理解に本質的役割を果たしてきた．特に，異常ホール効果とスピンホール効果はスピン流の生成を可能とし，このスピン流が生み出す電流誘起トルクによる磁化の電気的制御は現代のスピントロニクスの基盤となっている．また，電子スピンの流れであるスピン流に対し，電子の軌道角運動量の流れである軌道流を生み出す現象として軌道ホール効果の存在が期待されてきた．本研究では，金属系における異常ホール効果・スピンホール効果・軌道ホール効果に注目した実験により，スピン流による電流誘起トルクの生成メカニズムを解明するとともに，軌道流が生み出す電流誘起トルクを観測した．

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，内因性ホール効果と電流誘起トルクに関する理論が述べられる．第 3 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 4 章では，PtO_x/Co 構造における異常ホール効果が議論される．異常ホール効果の温度依存性と Co 膜厚依存性から，PtO_x/Co 界面に起因する異常ホール効果の存在が示される．第 5 章では，代表的スピントロニクス素子である Pt/強磁性金属構造における電流誘起トルクの生成メカニズムに関する実験が述べられる．本構造における電流誘起トルクは強磁性金属の選択に強く依存することを明らかにし，これが Pt/強磁性金属界面におけるスピン透過とスピン反射を考慮した模型により説明されることが示される．第 6 章では軌道ホール効果に起因する電流誘起トルクの観測に関する実験が示される．スピン軌道相互作用が極めて弱く，スピンホール効果を無視できる Ti が巨大な電流誘起トルクを生み出すことが明らかにされ，この電流誘起トルクの強磁性物質・膜厚依存性から，この電流誘起トルクの起源が軌道ホール効果であることが示される．さらに，スピンホール効果と軌道ホール効果が競合する W において，電流誘起スピントルクと軌道トルクのクロスオーバーを観測した結果が示される．第 7 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，異常・スピン・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，スピントロニクスの物理，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5910号	氏　名	岩間　清太朗

主論文題名：

Cortico-cortical coupling of neural oscillations underlying human sensorimotor control
（ヒトの感覚運動制御を支える大脳皮質間の律動的結合）

ヒトの巧緻な運動は複数の神経領域が情報伝達により筋出力を調整することで実現する。随意的な筋活動の出力を担う皮質脊髄路は大脳皮質体性感覚運動野（Sensorimotor cortex, SM1）に起始し筋へと到達する。その興奮性制御に関与する神経機構の一つに両側半球の活動を互いに抑制する半球間抑制があるが、自然環境下での随意運動に半球間の相互作用が時空間的にどのような関与を示すかは明らかではない。

SM1 近傍の頭皮上に貼付した電極から取得される頭皮脳波には、その興奮性を反映する成分である感覚運動リズムが含まれる。高密度頭皮脳波計を用いて全頭から頭皮脳波を多点計測し、運動内容や運動成績を反映する脳波特徴量を同定することで、上肢運動遂行中の巨視的な神経律動が示す時空間的な脳情報表現について検討した。

第一章は序論である。まず、ヒトの運動制御や適応を評価するための行動学的な手法について概説した。次に、感覚運動制御に関連する神経基質について説明し、これらが示す脳情報表現について述べた。最後に、巨視的な神経細胞群の活動が示す脳律動に関するこれまでの知見について解説し、本研究の目的を述べた。

第二章では、一側上肢運動遂行中の頭皮脳波信号から筋出力パタンを推定することを目的に、高密度頭皮脳波計を用いて健常成人 19 名を対象に運動課題中の脳波信号および随意筋電図を計測した。運動実行中に計測した頭皮脳波に対して学習した機械学習分類器に対する解析により、運動の有無の推定には運動手と対側半球の SM1 が、遂行中の運動の内容の推定には同側の SM1 がそれぞれ貢献することを見出した。ヒトの遠位筋は主に対側半球 SM1 に起始する皮質脊髄路を介した運動出力が支配的であることから、筋出力の調整に関与する半球間の神経修飾作用が頭皮脳波上に表現されていることを示唆した。

第三章では、感覚運動リズムが半球間相互作用に関する脳情報を反映していることを検証するために、逆位相の両手指タップ課題を遂行中の頭皮脳波と運動成績の関連について、健常成人 62 名を対象に検討した。運動開始前の半球間の機能的結合性が運動成績に関連するかを検証した結果、運動開始前の感覚運動リズムの位相同期性と逆位相の両手指タップ課題の持続時間は負に相関することを認めた。逆位相運動は半球間の運動指令の干渉により自発的に順位相に転移するため、半球間の相互作用が低い条件で、逆位相運動の持続時間が延伸した実験結果は仮説を支持する。

第四章は、結論である。本研究の成果を総括し、今後の展望と課題を述べている。

審査の要旨

報告番号	甲　第5910号	氏　名	岩間　清太朗

論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	牛場　潤一
副査	慶應義塾大学教授	工学博士	岡　浩太郎
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	舟橋　啓
	慶應義塾大学教授	博士（工学）・博士（医学）	満倉　靖恵

学士（工学）、修士（工学）岩間清太朗君提出の博士学位請求論文は、「Cortico-cortical coupling of neural oscillations underlying human sensorimotor control（ヒトの感覚運動制御を支える大脳皮質間の律動的結合）」と題し、全4章から成る。ヒトの脳は、機能ごとに分かれた複数の領域が互いに影響を及ぼし合って、巧みな身体運動を生成している。しかし、複数の脳領域が具体的にどのような関係性をもって相互に作用し、実際の身体運動を特徴づけているか不明な点が多い。本論文では、大脳皮質活動を頭皮上から多点脳波計測し、機械学習による波形分類、信号間の位相差解析、ならびに反復的経頭蓋磁気刺激法を用いた摂動実験を通じて、左右の大脳皮質体性感覚運動野（Sensorimotor Cortex、以後SMC）が機能的に連携して身体運動情報を処理していることを明らかにしている。

第 1 章は序論で、身体運動の生成に関する神経機構について、これまでに生理学研究によって明らかにされてきた知見が紹介されている。また、ヒトの身体運動を評価するための実験手法について述べられている。最後に、非侵襲的な脳活動計測法の 1 つである頭皮脳波が、巨視的な神経細胞群の律動的な活動を反映していることについて言及しながら、本研究の目的が述べられている。

第 2 章では、3 種類の一側上肢運動（手指の屈曲、伸展、共収縮）を遂行している被験者から頭皮脳波を多点計測し、機械学習分類器の 1 つであるランダムフォレスト･アルゴリズムを適用して、遂行中の運動タイプを頭皮脳波から同定した研究について述べられている。学習済みの分類器を解析し、安静と運動の二状態の判別には、運動肢に対して対側の大脳半球 SMC 由来の脳活動が大きく貢献していた一方、3 種類の運動タイプを判別するためには、運動肢に対して同側の大脳半球 SMC 由来の脳活動が必要であることを明らかにしている。すなわち、運動の出力そのものと、運動の種類を決める脳領域は左右の半球に分かれて分布し、それらが連携して一側上肢運動を生成していることを見出している。

第 3 章では、両手指逆位相タッピング課題を遂行中の、頭皮脳波と運動成績の関連について検討した研究について述べられている。課題開始前に左右の大脳半球 SMC 由来の律動的脳活動に関して位相同期性を調べ、直後に行ったタッピング課題の遂行成績との関係を検討した結果、脳活動の位相同期性が高いほど、両指のタッピング運動が順位相に遷移しやすいことを見出している。左右の大脳半球 SMC に共通入力を与える脳領域の 1 つである、補足運動野に反復的経頭蓋磁気刺激法により摂動を与えたところ、前述の関係性は消失したことから、補足運動野が左右の SMC 活動の位相同期性を調節し、SMC の位相非同期的な活動が巧緻な手指運動の生成に貢献していることを明らかにしている。

第 4 章は結論である。本研究を総括するとともに、非侵襲的な脳活動計測である頭皮脳波の計測限界や、非侵襲的な経頭蓋磁気刺激法の刺激範囲の広さといった実験手法上の課題に触れつつ、今後のヒト神経科学の展望を述べている。

以上、本論文の成果は、左右両側の体性感覚運動野の活動が相互に作用しながら、ヒトの巧みな身体運動を生成していることを生理実験によって明らかにしたことであり、身体運動を支える神経機構の理解、ならびに、運動学習や神経リハビリテーション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（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5911号	氏　名	徳岡　雄大

主 論 文 題 名 ：

深層学習による定量的な体外受精胚評価手法の開発

近年，発生工学の分野では体外受精 （*in vitro* fertilization; IVF）によってヒト胚，ウシ胚，マウス胚などの様々な哺乳類胚が作製され体外にて培養されている．IVF 胚の活用において, 特に不妊治療や畜産では出生する胚を選別することは重要な課題であり，その選別基準を決定するために現在は胚培養士が形態的特徴に基づいて胚の評価を行っている．しかし，その評価方法による出生率は低く，その要因として定性的な基準で経験的に定められた指標に基づいて評価することが挙げられている．そこで本研究では，胚の形態的特徴を定量的に扱い，出生可否予測において最適な指標を用いて胚を評価することで, 既存のグレーディング手法に代わる出生率を改善するための新たな IVF 胚の評価手法の開発を行った.

第 1 章では，緒言として，IVF と胚培養技術，そして IVF 胚に対する従来の評価手法について紹介した．また，本研究において開発した IVF 胚の評価手法における基盤技術として活用した深層学習について概説し，次いで本研究の目的について述べた.

第 2 章では，胚の形態的特徴を定量的に扱うために開発した手法について述べた．開発した手法により，生きたまま対象を観察できる技術であるライブセルイメージングによって撮像されたマウス IVF 胚の画像から細胞核形状を区画化（セグメンテーション）することで, 発生過程における胚の形態的特徴を定量的に取得することが可能となった. 本手法を用いたマウス IVF 胚の細胞核セグメンテーション精度は, 既存の画像セグメンテーション手法の精度を上回り，正確に胚の形態的特徴を取得できることを示した.

第 3 章では，第 2 章で述べた手法により取得した胚の形態的特徴を系列データとして入力に用いた胚の出生可否予測手法の開発について述べた. 本手法によるマウス IVF 胚の出生可否予測精度（83.87%）が，既存の系列データ分類手法の予測精度（74.19%）だけでなく胚培養の専門家による予測精度（64.87%）を大きく上回ることを示した. また，予測に寄与した胚の形態的特徴を解釈する機構を実装することにより，桑実胚期や細胞分裂時における細胞核形状がマウス胚の出生可否に寄与することを明らかにした.

第 4 章では，本研究において開発した胚の評価手法についてまとめ，本手法による出生予測のさらなる精度向上に向けた方法，そして本手法を不妊治療や畜産において IVF 胚の選別を行うための新しい基盤技術として確立するための展望について議論した.

審査の要旨

報告番号	甲　第 5911 号	氏　名	徳岡　雄大

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	舟橋　啓
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士	岡　浩太郎
		慶應義塾大学教授	博士（理学）	榊原　康文
		近畿大学教授	博士（農学）	山縣　一夫

学士（工学），修士（工学）徳岡雄大君提出の学位請求論文は，「深層学習による定量的な体外受精胚評価手法の開発」と題し全 4 章から構成されている．

哺乳類動物の体外受精-胚移植（*in vitro* fertilization - embryo transfer; IVF-ET）技術が発生工学の分野で発展したことに伴い，不妊治療における生殖補助医療，畜産技術，遺伝子改変，ゲノム編集技術，ライブセルイメージングなど様々な用途に活用されている．IVF により作製した胚の中から母体に移植する胚を選ぶ際には，出生する可能性の高い胚を選別することは重要であり，従来は胚培養士などの専門家が形態的特徴に基づいて胚の選別基準を決定・評価している．しかし，その評価方法による出生率は低く，その要因は定性的な基準で経験的に定められた指標に基づいて評価することが挙げられる．本論文では，胚の形態的特徴を定量的に扱い，出生可否予測において最適な指標を用いて胚を評価し，既存のグレーディング手法に代わる新たな IVF 胚の評価手法の開発を行っている．

第 1 章では，緒言として IVF と胚培養技術，そして IVF 胚に対する従来の評価手法について紹介している．また，第 2 章，第 3 章において IVF 胚の評価手法の開発に活用した深層学習について概説し，次いで本論文の目的について述べている．

第 2 章では，胚の形態的特徴を定量的に取得するための深層学習手法の開発について記述している．開発した手法では，生きたまま対象を観察できる技術であるライブセルイメージングによって撮像されたマウス IVF 胚の画像から細胞核形状を区画化（セグメンテーション）することで，発生過程における胚の形態的特徴を定量的に取得できる．本手法を用いたマウス IVF 胚の細胞核セグメンテーション精度はセグメンテーションの評価指標である IoU （Intersection over Union）で 0.746 を達成し，既存の画像セグメンテーション手法の精度である IoU 0.558 を上回り，正確に胚の形態的特徴を取得できることを示している．

第 3 章では，第 2 章で述べた手法により取得した胚の形態的特徴を，系列データとして入力に用いた胚の出生可否予測手法の開発について述べている．開発した予測手法によるマウス IVF 胚の出生可否精度は Accuracy 0.839 を達成し，既存の系列データ分類手法の予測精度である Accuracy 0.742 だけでなく，胚培養の専門家による予測精度である Accuracy 0.649 を大きく上回る．また，予測に寄与した胚の形態的特徴を解釈する機構を実装することにより，桑実胚期や細胞分裂時における細胞核形状がマウス胚の出生可否に寄与することを明らかにしている．

第 4 章では，第 2 章及び第 3 章で開発した 2 つの深層学習手法についてまとめ，本手法による出生予測のさらなる精度向上に向けた方法，そして本手法を IVF-ET において新しい基盤技術として確立するとともに生殖補助医療や畜産技術に活用するための展望について議論している．

以上本論文は 2 種類の深層学習手法を開発することでマウス IVF 胚の出生可否精度を大幅に向上することに成功しており，今後の定量生物学，発生工学研究に大いに資するものである．

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5912号	氏　名	上野　将樹

主論文題名：

過給エンジンのモデリングと非線形モデル予測制御による制御系設計に関する研究

自動車業界では，CO2 排出量低減の対策としてガソリンエンジンの熱効率向上技術の開発に取り組んでいる。熱効率向上技術の一つに過給エンジンがあり，近年，さらなる性能向上を目指し過給エンジンのシステムが複雑化している。これに伴い，アクチュエータ数が増加し過給エンジンは多入出力干渉系となっている。ところが，現在エンジン制御はマップ制御やルールベース制御が主流であり，パラメータ調整などの適合時間の増大が問題となっている。この課題の対応のため，モデルベースト制御のエンジンへの適用が望まれている。本論文では，過給エンジンを対象とし，計算負荷と制御性能を両立する非線形モデル予測制御（NMPC）の設計法を提案する。

第 1 章では，過給エンジンへの NMPC の適用の必要性などの研究背景を述べ，本論文の位置付けと構成を述べる。本論文の目的は，車載 ECU（Engine Control Unit）の限られた計算能力を考慮し，過給エンジンに対する NMPC の適用可能性を確認することである。

第 2 章では，本論文の制御対象である過給エンジンの概要を述べ，制御要求を示す。また，自動車用エンジンのモデリングと制御器設計に関する既存研究についてまとめる。

第 3 章では，過給エンジンの NMPC に用いる制御指向モデリング法を提案する。自動車用エンジンではさまざまな環境条件や運転条件における動作の保証が必要なことから，制御指向モデルは高精度かつ高い汎化能力を有することが求められる。さらに，車載 ECU への実装を考慮すると，制御指向モデルは低計算コストであることも重要である。そのため，制御指向モデルは，高汎化能力，高精度，低計算コストを両立することが必要である。これらの課題に対して，第一原理モデルと実験モデルを融合したグレーボックスモデルに Lasso 回帰を適用した非線形状態空間モデルを提案する。

第 4 章では，過給エンジンに対する NMPC 設計法を提案する。提案する NMPC 設計法では，制約条件の定式化法であるバリア法に着目する。バリア法は，計算負荷が少ない制約条件の定式化方法として知られているが，従来のバリア関数を用いると，制約境界値を実現できないため制約近傍での制御性能が低下してしまう。この課題に対応するため，制約境界値を実現できるように改良した疑似バリア関数を用いるバリア法を提案する。さらに，提案法を適用した NMPC を車載 ECU に実装し，実機実験により提案法の有効性を確認する。

第 5 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5912号	氏　名	上野　将樹

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	工学博士	足立　修一
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	内山　孝憲
		慶應義塾大学教授	工学博士	大森　浩充
		慶應義塾大学准教授	博士（情報理工学）	堀　豊

学士（工学），修士（工学）上野将樹君提出の学位請求論文は，「過給エンジンのモデリングと非線形モデル予測制御による制御系設計に関する研究」と題し全５章から構成されている。

自動車用ガソリンエンジンの熱効率向上のために過給エンジンが使用されている。近年，さらなる熱効率向上の要求のため，過給エンジンシステムへのアクチュエータ数が増加し，過給エンジンは複雑な多入出力干渉システムとなっている。現在のエンジン制御ではマップ制御やルールベース制御が主流であり，複雑なシステムに対してはパラメータ調整などの適合時間の増大が問題となっている。また，制御を実装化するためには，車載 Engine Control Unit（ECU）の限られた計算能力を考慮する必要もある。これらの課題の対応のため，本論文では，過給エンジンを対象とし，物理的な事前情報を考慮したモデリング法と，計算負荷と制御性能を両立する非線形モデル予測制御（Nonlinear Model Predictive Control: NMPC）の設計法を提案している。

第１章では，過給エンジンへの NMPC の適用の必要性などの研究背景を述べ，本論文の位置付けと構成を述べている。

第２章では，本論文の制御対象である過給エンジンの概要を述べ，制御要求を示している。また，自動車用エンジンのモデリングと制御器設計に関する既存研究についてまとめている。

第３章では，過給エンジンに NMPC を適用するために必要なモデルを構築する制御指向モデリング法を述べている。自動車用エンジンでは，さまざまな環境条件や運転条件における動作を保証するために，高精度かつ高い汎化能力を有する制御指向モデルが望まれている。さらに，車載 ECU への実装を考慮すると，制御指向モデリングのための計算量の低減も重要である。このように，制御指向モデルは，高汎化能力，高精度，低計算コストを両立することが必要である。これらの課題に対して，第一原理モデルと実験モデルを融合したグレーボックスモデルに Lasso（least absolute shrinkage and selection operator）回帰を適用した非線形状態空間モデルの構築法を提案している。

第４章では，過給エンジンに対する NMPC による制御器の設計法を提案している。提案する NMPC設計法では，制約条件の定式化法であるバリア法に着目している。バリア法は，計算負荷が少ない制約条件の定式化方法として知られているが，従来のバリア関数を用いると，制約境界値を実現できないため制約近傍での制御性能が低下していた。この課題に対応するため，制約境界値を実現できるように改良した疑似バリア関数を用いるバリア法を提案している。さらに，提案法を適用した NMPC を車載 ECU に実装し，実機実験により提案法の有効性を確認している。

第５章は本論文のまとめである。

以上要するに，本研究では自動車の過給ガソリンエンジンを対象として、物理的な事前情報を考慮した制御指向モデリング法と，計算負荷と制御性能を両立する非線形モデル予測制御（NMPC）の設計法を提案し，実機実験によってその有効性を確認している。この研究は実用化を強く意識した研究であり，自動車用エンジンのモデリングと制御における貢献が大である。

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5913号	氏　名	井手　春希

主 論 文 題 名 ：

Algebraic independence of the values of certain power series, infinite products, and Lambert type series

（ある冪級数，無限積，ランベルト型級数の値の代数的独立性）

超越数論の主要な研究対象は解析関数の代数的数における値の代数的独立性である．西岡は 0 でない任意の代数的数における任意の階数の導関数値すべてからなる無限集合が代数的独立となる整関数を構成した．また，代数的数を底とし指数が線形回帰数列をなす数列の母関数 $F(x)$ がこの性質を持つことを田中は証明した．ただし，指数の線形回帰数列には適切な条件が仮定される．さらに田中は，零点の集合が上記数列の一般項の逆数から成る無限積 $G(y)$ に対して，零点以外の代数的数における導関数値からなる無限集合の代数的独立性を示した．一般に，各々代数的独立であることが知られている複数個の集合の和集合の代数的独立性を示すことは困難である．本論文ではこの問題に関する種々の結果を証明する．

第 1 の結果は $F(x)$ と $G(y)$ に関する上記 2 結果を含む拡張である．本論文では，田中により各々の代数的独立性が示された 2 集合の和集合に無限積 $G(y)$ の零点における導関数値を加えた無限集合の代数的独立性を証明した．上記の線形回帰数列に関するより強い仮定の下では，$F(x)$ と $G(y)$ を p 進整関数と捉えた場合にもこの結果が成立する．

第 2 の結果は複素数体における第 1 の結果のさらなる拡張である．十分に異なる複数個の代数的数を底とし線形回帰数列によって前述のように生成される複数個の冪級数と無限積を考える．本論文では，これらの関数の零点を含む任意の代数的数における，零でないあらゆる導関数値からなる無限集合の代数的独立性を証明した．

以上 2 種の結果は，上記整関数族の導関数値のみならず 2 変数化されたある種のランベルト型級数の偏導関数値を含む無限集合の代数的独立性を扱った，本論文の主定理の系として得られる．また主定理のさらなる系として，2 変数整関数の無限族であって，それら無限個の関数の任意の代数点における任意の階数の偏導関数値すべてからなる無限集合が代数的独立となるものを明示的に構成する．

本論文で証明される代数的独立性の判定定理及びある種の関数方程式の有理関数解に関する田中の結果により，主定理の証明はある 1 変数冪級数族の 1 次独立性に帰着される．第 2 の主定理の証明におけるこれら冪級数の 1 次結合はより複雑である．本論文では，この困難を多変数冪級数の 1 次独立性へと帰着することにより克服した．

審査の要旨

報告番号	甲　第 5913 号	氏　名	井手　春希

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学准教授	博士（理学）	田中　孝明
	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）	井関　裕靖
		慶應義塾大学教授	博士（数理科学）	坂内　健一

学士（理学）、修士（理学）井手春希君提出の学位請求論文は「Algebraic independence of the values of certain power series, infinite products, and Lambert type series（ある冪級数, 無限積, ランベルト型級数の値の代数的独立性）」と題し、全 4 章より構成されている。

ひとつの関数であって、その定義域内にあるすべての代数的数における値と任意の階数の微分係数をすべて併せても代数的独立となる、という著しい性質をもつものが存在する。そのような関数を用いれば、代数的数を起点として最も効率良く代数的独立な超越数の実例を構成でき、超越数の間の構造を見出すという超越数論の目的達成に近付く。但し、先行研究では上記のような強い性質をもつ関数の実例は 1 変数に限られていた。本論文の著者は上記を拡張した性質をもつ 2 変数関数、即ち、代数的数を成分とするすべての点における値及び、そのような点における任意の階数の偏微分係数をすべて併せても代数的独立となるものを構成し、更に、そのような 2 変数関数の無限族の構成にも成功した。このような大量の数の代数的独立性は一般に、複数の段階を経由して証明され、各段階の手法は互いに独立している。本研究の場合は以下の 4 段階から成る。第 1 段階は、代数的独立性を示したい集合を Mahler 関数と呼ばれる、ある種の関数方程式を満たす関数の特殊値の集合に置き換えることである。第 2 段階は Mahler 関数自身の有理関数体上での代数的独立性への帰着であり、第 3 段階は Mahler 関数自身の 1 次独立性への帰着である。第 4 段階は Mahler 関数の 1 次独立性の証明である。それら 4 段階の中で、特に第 1 段階と第 4 段階について、本論文の著者は先行研究と大きく異なる手法により解決した。

第 1 章は序論であり、先行研究の手法と本研究で用いた Mahler の方法との比較に基づく本研究の位置付け、及び本論文で得られたすべての定理とその系が述べられている。

第 2 章は 3 節から成る。第 2.1 節では以下の問題の解決について述べられている。無限積で定義される関数に対し、代入すると関数の値が 0 になる点（以下、零点という）における高階の微分係数を、零点を回避した無限積を用いた明示式で表すことは困難であった。本論文の著者は零点の因子を除外せずに微分する新手法を開発し、無限積の零点おける高階微分係数を、零点を回避した無限積の 1 次結合で明示した。第 2.2 節では無限積で定義される関数の逐次導関数と、ランベルト型級数の逐次導関数の間の双正則変換、即ち当該写像とその逆写像がともに多項式で書ける変換を得ている。この手法は任意の次元への拡張が可能である。第 2.3 節では、上記 2 変数関数の無限族に関する結果を第 2.1、2.2 節の結果とランベルト型級数を含む主定理から導いている。

第 3 章では上記第 2 及び第 3 段階、即ち Mahler 関数自身の代数的独立性への帰着、更には 1 次独立性への帰着について述べられている。従来手法である代数的独立性の判定定理の拡張であるが、複素数体のみならず素数 p に対する p 進数体上でも成立する形に一般化している。

第 4 章はランベルト型級数を含む 3 つの主定理の証明である。特に無限族の代数的独立性の証明では、従来手法では扱えない複雑な関数の 1 次独立性を、クロネッカー型の特殊化を施すと当該関数に一致するように多変数化したものを用いる方法で解決した点が顕著である。

以上要するに本論文の著者は、代数的独立性を示すべき集合の置き換え、無限積とランベルト型級数の逐次導関数の間の双正則変換、多変数の関数の 1 次独立性に関する新手法を創り出し、代数的独立性の判定定理の適用範囲を著しく拡大した。また、これらの手法は数理科学の他の分野にも応用できる汎用性があり、数理科学の諸分野の発展に寄与すると考えられる。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5914号	氏　名	井上　博夏

主論文題名：

月極域探査ローバの時空間経路計画に関する研究

近年、リモートセンシングデータの分析結果から、月の極域に水が存在する可能性が高いことが示唆されている。また、月極域は地球の極域と同様に太陽高度が低いため、一部の標高の高い地域では、長期間連続的に日照が得られる白夜のような状態となる。このような水の存在可能性と、長期日照の条件から、将来の月面拠点として月の極域が注目され、世界各国で月極域探査計画が進められている。本論文では、月極域探査ローバを対象とした経路計画法を提案する。

第1章では、月極域探査ローバの経路計画の必要性などの研究背景を述べ、本論文の位置付けと構成を述べる。本論文の目的は、ミッション制約や環境条件に応じたローバの時空間広域経路を計画する方法を示すことである。

第2章では、研究の対象である月極域探査、また関連する既存研究として着陸地点解析や探査ローバの経路計画についてまとめ、本研究との関係を示す。

第3章では、時変環境における経路計画法を提案する。月の極域では、日照条件や地球との通信条件が時々刻々と変化するため、時変環境を考慮した経路計画が必要となる。さらに、探査ローバは走行時に車輪がスタックしやすいことや、予想外の事態が生じて作業が滞るなど、様々な要因によって事前に計画したスケジュールから遅延する可能性が高い。そのため、スケジュール遅延を考慮する必要がある。この課題に対して、時間毎の月面時変環境マップを生成し、このマップ上で時間が遅れた場合の環境条件を考慮した経路計画を行うことを提案する。

第4章では、リモートセンシングデータの不確かさを考慮した経路計画法を提案する。標高データ（DEM）の源泉データであるレーザ高度計の特性から、DEM の信頼性が領域内で均一になっていないことが知られている。そのため、経路計画時に DEM を一定の不確かさで扱ってしまうと、実際に期待していた傾斜よりも、実際の傾斜が大きく走行できない危険が生じる可能性がある。この課題に対応するため、レーザ高度計のデータからガウス過程回帰を用いて DEM を生成し、その標準偏差を DEM の不確かさの指標として扱うことを提案する。また、実際の月極域のデータを用いたシミュレーションによって、提案法が既存法よりも DEM の不確かさの大きい領域を避ける安全な経路を計画できることを示す。

第5章では、各章で得られた内容をまとめ、本論文の成果と今後の課題を述べる。

審査の要旨

報告番号	甲　第5914号	氏　名	井上　博夏

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	工学博士	足立　修一
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	内山　孝憲
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	高橋　正樹
		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）井上博夏君提出の学位請求論文は，「月極域探査ローバの時空間経路計画に関する研究」と題し全５章から構成されている。

近年，リモートセンシングデータの分析結果から，月の極域に水が存在する可能性が高いことが示唆されている。月極域は地球の極域と同様に太陽高度が低いため，一部の標高の高い地域では，長期間連続的に日照が得られる白夜のような状態となる。このような水の存在可能性と，長期日照の条件から，将来の月面拠点として月極域が注目され、世界各国で月極域探査計画が進められている。本論文では，月極域探査ローバを対象とした経路計画法を提案している。

第１章では，月極域探査ローバの経路計画などの研究背景を述べ，本論文の研究の目的を述べている。

第２章では，研究の対象である月極域探査，また関連する既存研究として着陸地点解析や探査ローバの経路計画についてまとめている。

第３章では，時変環境下における経路計画法を提案している。月極域では，日照条件や地球との通信条件が時々刻々変化する。そのため，この時変環境に対する経路計画が必要となる。また，探査ローバは走行時に車輪がスタックしやすいことや，想定外の事態が生じて作業が滞るなど，さまざまな要因によって事前に計画したスケジュールから遅延する可能性が高い。この課題に対して，時間ごとの月面時変環境マップを生成し，このマップ上でスケジュール遅延を考慮した経路計画を行うことを提案している。そして，月面環境データを用いた経路計画シミュレーションにより提案法の有効性を示している。

第４章では，リモートセンシングデータの不確かさを考慮した経路計画法を提案している。標高データ（Digital Elevation Model: DEM）の源泉データであるレーザ高度計の特性から，DEM の信頼性が領域内で均一でないことが知られている。そのため，経路計画時にDEMの不確かさを一定とすると，予測していた傾斜よりも実際の傾斜が大きく，走行できない危険が生じる可能性がある。この課題に対応するため，レーザ高度計のデータからガウス過程回帰を用いて DEM を生成し，その標準偏差を DEM の不確かさの指標として扱うことを提案している。そして，実際の月極域のデータを用いた経路計画シミュレーションによって，提案法が既存法よりも安全な経路を計画できることを示している。

第５章は本論文のまとめである。

以上要するに，本研究では月極域探査ローバを対象として，リモートセンシングデータを用いた時空間経路計画法を提案し，ユーザがミッション制約や環境条件に応じてパラメータ調整を行うことで，所望の経路を計画できる手順を示し，実運用での利用が可能となることを示したことである。この研究は，今後ますます重要性が増す，月をはじめとする惑星探査への貢献が大である。

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5915号	氏　名	髙武　直弘

主 論 文 題 名 ：

ポリマー導波路搭載型光トランシーバの設計・作製と高速高密度信号伝送への応用

近年，クラウドやビッグデータを活用したサービスが進展し，データセンタやハイパフォーマンスコンピュータ内の情報トラフィック量が急増している．これに伴い，サーバやスイッチなどの I/O スループットも増大し続けており，従来装置間の高速信号伝送に用いられてきた光ファイバリンクを，機器内部の信号伝送へ適用する技術が進んでいる．装置内部の光リンクとして，光トランシーバを Serializer deserializer（SerDes） IC 直近に配置する On-Board Optics（OBO）や，IC パッケージ基板上に配置する Co-Packaged Optics（CPO）と呼ばれる形態が注目されており，100 m 以下の伝送にはコスト面で有利なマルチモードファイバ（MMF）が利用されている．光トランシーバのフットプリントが I/O スループットの制約となるため，OBO や CPO の実現には，光トランシーバの小型・高密度化が必要不可欠である．しかし，光トランシーバを小型・高密度化する上で，次の 2 点の課題が存在する．1 点目は，IC と光素子の近接実装による送受信（TRx）間クロストークの増加である．特に，垂直共振器型面発光レーザ（VCSEL）の駆動電流（数 mA）は，フォトダイオードの光電流（数 10 μA）に比べて 2 桁以上も大きいため，TRx クロストークにより光電流の信号品質が劣化する．2 点目は，高集積光実装による光素子・ファイバ間の光結合損失の増加である．信号伝送の高速化に伴い出射光の広がり角（開口数：NA）が増加した VCSEL とファイバとの高密度かつ低損失な結合が求められる．従来技術では，高集積化と低クロストーク特性，高密度化と低損失光結合の両立は困難であった．そこで本研究では，「狭幅絶縁層を有するグランド電極構造を用いた高密度集積と TRx クロストーク低減」と，「90°曲げ円形屈折率分布（GI）型コアポリマー光導波路を用いた小型・高効率な光結合」を提案し，光トランシーバを設計・試作するとともに，高速 MMF リンクに対して適用可能であることを実証した．

第 1 章では，本研究の技術背景および現行技術の課題を概説し，本研究の目的を示した．

第 2 章では，MMF リンクに求められる光トランシーバの小型・高密度化仕様および本研究の提案技術を概説し，光トランシーバのサイズ制約とリンクパワーバジェットを議論した．

第 3 章では，等価回路モデルを用いて，狭幅絶縁層導入の効果を理論的に示し，さらにワーストケース（光トランシーバの筐体温度 70°C）のもとでも光素子が動作温度上限を超過しないことを示した．続いて，提案する構造を適用した光トランシーバを試作し，一般フォームファクタ（QSFP）と比較してフットプリントを約 42%にまで小型化した上に，伝送速度 25.78 Gb/s かつ 4 チャネル動作で MMF 100 m の伝送を実現して，提案構造の有効性を示した．

第 4 章では，90°曲げ円形 GI 型コアポリマー光導波路の構造（曲げ半径，コア径，NA）の最適化で，VCSEL-MMF 間の結合損失を低減できることを示した．また，ボンディングワイヤによって光素子と導波路コア間に生じる 100 μm 程度の空隙を原因とする過剰結合損失の影響について示し，空隙への高屈折率樹脂充填と導波路構造の最適化で挿入損失を低減できることを示した．さらに，25.78 Gb/s の 100 m OM3-MMF 光伝送に成功し，光導波路の適用可能性を実証した．

第 5 章では，提案技術について総括し，今後の展望を示した．

審査の要旨

報告番号	甲　第 5915 号	氏　名	髙武　直弘

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	石榑　崇明
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	田邉　孝純
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	松本　佳宣
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	太田　泰友

学士（工学），修士（工学）髙武直弘君提出の学位請求論文は「ポリマー導波路搭載型光トランシーバの設計・作製と高速高密度信号伝送への応用」と題し，5 章から構成されている．

近年，クラウドやビッグデータを活用したサービスが進展し，データセンタやハイパフォーマンスコンピュータ内の情報トラフィック量が急増している．これに伴い，従来，サーバやスイッチなどの装置間高速信号伝送に用いられてきた光ファイバリンクを，機器内部の信号伝送へ適用する光インターコネクト技術が進展している．特に，光トランシーバを IC チップパッケージ基板上に配置する Co-Packaged Optics（CPO）と呼ばれる形態が注目されており，100 m 以下の伝送には，低コストなマルチモードファイバ（MMF）が利用されている．CPO の実現には，光トランシーバの小型・高密度化が必要不可欠であるが，従来技術では「送受信（TRx）間クロストークの増加」および「光素子・ファイバ間の光結合損失の増加」が課題となり，高密度化と低損失光結合の両立が困難であった．そこで本研究では，「狭幅絶縁層を有するグランド電極構造を用いた高密度集積と TRx クロストーク低減」ならびに「90° 曲げ円形屈折率分布（GI）型コアポリマー光導波路を用いた小型・高効率光結合」を提案し，光トランシーバを設計・試作するとともに，高速 MMF リンクに適用可能であることを実証している．

第 1 章では，技術背景，現行技術の課題を概説し，本研究の目的を示している．

第 2 章では，MMF リンクに求められる光トランシーバの小型・高密度化仕様および本研究の提案技術を概説し，光トランシーバのサイズ制約要因およびリンクパワーバジェットについて議論している．

第 3 章では，狭幅絶縁層を有するグランド電極構造導入によるクロストーク低減効果を，等価回路モデルを用いて理論的に示し，さらに，光トランシーバの筐体温度が 70ºC でも，光素子の温度は，動作可能上限（85ºC）を超過しないことを示している．続いて，提案する構造を適用した光トランシーバを試作し，一般フォームファクタと比較してフットプリントを 50%以下に小型化した上で，伝送速度 25.78 Gb/s，4 チャネル動作にて MMF 100 m 伝送に成功し，提案構造の有効性を実証している．

第 4 章では，90° 曲げ円形 GI 型コアポリマー光導波路の構造（曲げ半径，コア径，開口数）最適化で，光素子・MMF 間の結合損失を低減できることを示している．また，ボンディングワイヤのために光素子・導波路間に必要となる 100 μm 程度の空隙によって生じる結合損失に着目し，空隙への高屈折率樹脂充填と，それに合わせた導波路構造最適化により挿入損失低減に成功している．さらに導波路を搭載して 25.78 Gb/s, 4 チャネル動作にて MMF 100 m 伝送を行い，導波路の適用可能性を実証している．

第 5 章では，本研究で提案した技術について総括し，今後の展望を示している．

以上要するに，本論文の著者は，短距離高速リンク向け光トランシーバの小型・高密度化に対する要求仕様・設計指針を明らかにし，実際に 90° 曲げコアポリマー光導波路を搭載した新たなデバイスを提案・試作して高速光リンクを実現しており，光通信工学，高分子科学の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5916号	氏　名	加藤　慎

主論文題名：

Thermal error and temperature-dependent dynamics modeling of CFRP machine tool spindle unit using IoT system
（IoT システムを使用した CFRP 工作機械主軸ユニットの熱変位と温度依存性を考慮した動特性のモデリング）

近年の工作機械は加工精度向上、生産性向上に加え、省エネルギー化が強く望まれている。このような背景のもと、軽量かつ高剛性な炭素繊維強化プラスチック（CFRP）を工作機械の構造材料に適用する試みや、アイドリングストップなどの省エネ加工法の研究開発が加速している。一方、CFRP や省エネ加工法の導入により、工作機械の熱変位・動特性は一層複雑となる。そのため、正確なモデルを必要とするデジタルツインによる工作機械の知能化への対応が大きな課題である。そこで本研究では、IoT システムによる多点の温度情報の同期計測により、CFRP を使用した主軸ユニットの熱変位および温度依存性を考慮した動特性モデルを開発することを目的とした。

第 1 章では、工作機械における熱変位とびびり振動の課題と対策、および省エネ化技術に関する研究背景を述べ、研究目的を示した。

第 2 章では、CFRP 工作機械および各要素の熱特性について概説した。また、多点温度計測と機械学習が可能な IoT システムについて述べ、通信性能の評価結果を示した。

第 3 章では、CFRP 工作機械の熱変位解析の結果を示し、それに基づく熱変位モデルを提案した。重回帰分析で得られるモデルに対して、訓練データ量と使用するセンサ数に応じた熱変位推定性能を比較評価することで、効果的なモデルを導出した。

第 4 章では、CFRP を適用した主軸ユニットの動特性をモデル化するために、多点に対して一般化したレセプタンスカップリングと複合材料の機械特性に対するパラメータ同定方法を提案した。提案手法により、シャフトモデルと軸受モデルを組み合わせた主軸モデル、更に様々なホルダや工具を組み合わせたモデルまで導出することを可能にした。また、主軸モデルの比較を通して、CFRP 適用の効果を明らかにした。

第 5 章では、主軸ユニットにおける温度依存性を考慮した動特性のモデル化手法を提案した。加振試験から軸受モデルのパラメータを同定し、熱影響による動特性の変化を明らかにした。提案モデルに基づき導出した安定限界線図から、CFRP 主軸ユニットにおける高能率加工のための主軸回転数を決定し､その妥当性を切削試験により評価した。

第 6 章では、本研究の結論と今後の展望を述べた。

審査の要旨

報告番号	甲　第 5916 号	氏　名	加藤　慎

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	柿沼　康弘
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	青山　英樹
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	髙橋　正樹
		慶應義塾大学専任講師	博士（工学）	小池　綾

学士（工学），修士（工学）加藤慎君提出の学位請求論文は「Thermal error and temperature-dependent dynamics modeling of CFRP machine tool spindle unit using IoT system」（IoT システムを使用した CFRP 工作機械主軸ユニットの熱変位と温度依存性を考慮した動特性のモデリング）と題し，6 章から構成されている．

近年の工作機械は加工精度向上，生産性向上に加え，省エネルギー化が強く望まれている．このような背景のもと，軽量かつ高剛性な炭素繊維強化プラスチック（CFRP）を工作機械の構造材料に適用する試みや，省エネ加工法の研究開発が加速している．一方，CFRP や省エネ加工法の導入により，工作機械の熱変位・動特性は一層複雑になる．そのため，正確なモデルを必要とするデジタルツインによる工作機械の知能化への対応が大きな課題である．そこで本研究では， IoT システムによる多点の温度情報の同期計測により, CFRP を適用した主軸ユニットの熱変位および温度依存性を考慮した動特性モデルの開発に取り組んでいる．

第 1 章は序論であり，工作機械における熱変位，びびり振動の課題と対策および省エネ化技術に関する研究背景を述べた後，研究目的を示している．

第 2 章では，CFRP 工作機械および各要素の熱特性について概説している．また，多点温度計測と機械学習が可能な IoT システムについて述べ，その通信性能を評価した結果を示している．

第 3 章では，CFRP 工作機械の熱変位解析の結果を示し，それに基づく熱変位のモデルを提案している．省エネ加工法を想定した測定実験の結果をもとに，重回帰分析で得られるモデルに対して，訓練データ量と使用するセンサ数に応じた熱変位推定性能を比較評価することで，効果的なモデルを導出している．

第 4 章では，CFRP を適用した主軸ユニットの動特性をモデル化するために，多点レセプタンスカップリングと複合材料の機械特性に対するパラメータ同定方法を提案している．提案手法により，シャフトモデルと軸受モデルを組み合わせた主軸モデル，更に様々なホルダや工具をアセンブリしたモデルまで導出することを可能にしている．また，主軸モデルの比較を通して，CFRP 適用の効果を明らかにしている．

第 5 章では，主軸ユニットにおける温度依存性を考慮した動特性のモデル化手法を提案している．加振試験により軸受のモデルパラメータを同定することで，熱影響による特性変化を明らかにしている．導出したモデルから，CFRP 主軸ユニットにおける高能率加工のための主軸回転数を決定し，その妥当性を切削試験により評価している．

第 6 章は結論であり，上記内容を統括するとともに今後の展望に関して述べている．

以上要するに，本研究では新構造材料である CFRP を適用した主軸ユニットにおける熱変位と温度依存する動特性のモデリングに成功しており，生産加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．

Thesis Abstract

Registration Number	"KOU" No.5917	Name	Alauddin, Nursuhana Binti

Thesis Title

A model of total quality management and student score analysis in school education

This dissertation explores the total quality management (TQM) implementation in school education. Comparisons with existing quality models for education are carried out to develop a TQM model based on Deming criteria. The concept of a customer-oriented which is congruent with TQM is replaced by a society-oriented model for school objectives. Furthermore, analysis of student performance, especially the student scores, is one of the important activities to improve the quality of education. Detecting the abnormality in the daily operation of teaching and learning helps to ensure process stabilization in education. Linear models are developed to detect unusual scores of individual students for the daily assessments and semester examinations to enable immediate remedies. This dissertation is organized into five chapters, in addition to References, Acknowledgements, and Appendices.

Chapter 1 provides an introduction to the research describing the background, research questions, and the outline of the research.

Chapter 2 is dedicated to answering research questions 1). It describes the development of a TQM model for school education to realize school objectives and obtain organizational ability in the present and attain sustainable excellence in the future. A qualitative research approach is utilized for model validation through a case study.

Chapter 3 is aimed to answer research question 2), introducing research about the detection of unusual scores in a daily assessment for individual students. The detection is described through a linear model based on daily assessment data. A dataset from an international school is obtained to validate the model.

Chapter 4 is aimed to answer research question 3) for unexpected condition detection. It describes research about the detection of unexpected scores in an examination for individual students. The detection is described through a linear model based on data of past scores, current daily efforts, and current score trends. A different dataset from Chapter 3 is obtained from an international school to validate the model.

Chapter 5 is a concluding remark to synergize what has been achieved in the above research as a total.

Educational institutions, including schools, prioritize educational quality to provide students with the finest possible learning experiences. One of the useful tools to improve and enhance quality in education is the implementation of total quality management (TQM). Frameworks for educational systems have been established as part of continual improvement via quality standards and frameworks to ensure that educational institutions perform their goals. In this research, a TQM model based on Deming criteria for school education is developed to ensure organizational strength in school management in the present and attaining sustainable excellence in the future. A qualitative approach is carried out to validate the model at an international school in Japan. Furthermore, as education is mainly about student learning, students are the center of education. The development of student monitoring systems enables the observation of the growth of individual students and learning progress on a longitudinal basis. The systems are designed to manage various parameters to improve educational quality and encourage data-based decision-making through the provision of data for goal setting. Owing to the progression of information technology systems, not only semester examination data, but also daily assessment data are becoming available in the school's centralized monitoring system. Therefore, it is made possible to utilize such data for immediate remedies and hints of a good practice in the same academic year based on student ability, subjects, and various assessments. In this research, two methods are developed for the detection of unusual scores for individual students according to the type of data and purpose of detection; 1) analysis based on daily assessment data through a linear ANOVA model to detect unusual scores in a daily assessment, and 2) analysis based on past scores, current daily efforts, and current score trends by a combination of ANOVA, principal component analysis, and multiple regression analysis to detect unexpected score in an examination. The unusual or unexpected score is detected simultaneously for different subjects for individual students. Dataset is obtained from an international school in Japan for model validation.

審査の要旨

報告番号	甲　第 5917 号	氏　名	アラウディン, ヌルスハナ ビンティ

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	山田　秀
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	鈴木　秀男
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	松浦　峻
		中央大学教授	工学博士	中條　武志

学士（工学），Master of Engineering Management，アラウディン，ヌルスハナ ビンティ君の学位請求論文は，A model of total quality management and student score analysis in school education（学校教育における総合的品質管理モデルと生徒の成績分析）と題しており，全 5 章からなる．

教育の質保証の重要性により，対象とする教育分野固有の研究に加え，心理，発達，教育制度などさまざまな立場からの研究がある．この論文では，プロセスのアウトプットである製品・サービスの品質を作り込むための総合的品質管理（Total Quality Management: TQM）の立場から，教育の質を管理するべく研究を展開している．

第 1 章の序論では，教育の質に関連するさまざまな立場からの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．教育の質の管理には，教育の提供側と受け手である生徒やその親，社会など様々な利害関係者を考慮するモデルが必要になること，生徒の能力や学習形態の多様性を考慮した管理が必要にな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，社会を含む利害関係者全体における価値を向上させるためのモデルをデミング賞の評価基準から導いている．デミング賞は，優秀な TQM 実践組織に授与される賞である．その基準は，目的と手段の関係が明確であり，全ての産業を対象にしているために一般性が高い．そこで，この基準を教育向けに変換した上で，教育の質の確保に重要な要素を文献研究から明確にし，これらの要素をモデルに導入している．さらに，あるインターナショナルスクールの診断にこのモデルを適用し，十分に効果をあげている活動，改善が必要な活動を明確にするとともに，このモデルの有効性を質問紙調査や対面インタビュー調査などで立証している．

第 3 章では，生徒の能力や学習形態の多様性を考慮した教育のプロセス管理をねらいとして，日々の演習の結果などの日常的なデータによる異常検知法を提案している．情報技術の発展により，日々の演習などの結果を学校のデータベースに登録し，学校全体として活用できるようになっている．このデータをもとに，点数が極端に下がるなどの異常を検出する方法について，正規線形模型をもとに開発している．この異常検出により，教員が日々の演習などの直後に生徒に対してアクションを取ることができるようになり，教育の質の確保につながる．さらに，インターナショナルスクールでの適用事例も示し，その実務的な有効性をも示している．

第 4 章では，期末試験など最終成績を，当該学期の日々のデータに加え，過年度の成績で説明するモデルを用い，最終成績の異常検知方法を提案している．モデル化の際，生徒の能力や学習形態の多様性を考慮し，過年度の学業成績データを，線形模型により解釈や対策が容易な項に分解している．また，当該学期の日々の学習データに関しては，直交分解を施し予測精度を上げたうえで，異常検出に活用している．このような経時的なデータと日常データの特徴を踏まえた解析をすることで，従来よく用いられている管理図などの適用に比べて，有効である点を導いている．

第 5 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，事例研究でも有効性があることを論じている．提案する教育の質に関する TQM モデルは，全体的なフレームワークとして有効である．またそれに基づく成績データの分析方法は，教員個人ではなく，学校として統一的に保有しているデータの有効な活用であり，学校全体の教育の質の改善への貢献が大きい．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5918号	氏　名	田代　紘一郎

主 論 文 題 名 ：

血栓の力学的挙動の数値解析手法に関する研究

急性期脳梗塞は血栓等の塞栓源により脳血管が詰まることで生じる疾患である．この疾患に対して，機械的血栓除去と呼ばれる，医療機器により機械的に血栓を取り除く治療方法がおこなわれている．しかしながら，この治療が十分に奏功しない症例が最大 15%存在すると言われており，患者の予後の改善のために治療技術の発展が求められている．機械的血栓除去はステントの拡張力やカテーテルの吸引圧などにより機械的に血栓を除去するため，その治療成績は血栓と医療機器との間の機械的な相互作用に大きく影響を受ける．ここで，有限要素法解析 （Finite Element Method：FEM）は，応力の伝播や物体の変形を可視化できるため，機械的な相互作用を詳細に分析する手法として期待されている．本研究は，血栓の力学的挙動を予測可能とする数値解析手法を確立することを目的とした．本研究ではまず，血栓は血液という粘弾性液体から形成されることに着目し，粘弾性則を実装した FEM を構築した．その後，血栓と充填ゴムがいずれも粒子状と紐状の物質から成る網目状構造を有する構造の類似性から，充填ゴムの特有の現象として知られる Mullins 効果の数理モデルである Damage モデルを実装した FEM を構築した．そして，それぞれの数値解析手法により血栓の機械的特性がどのように再現されるかを検証した．

第 1 章では，本研究の背景として，急性脳梗塞の血管内治療に関する従来までの知見，および本研究の目的を述べている．

第 2 章では，血栓の形成機序と血栓の発揮する機械的特性を基礎事項としてまとめている．そして，血栓の機械的特性の理論的研究と数値解析に関する従来研究から得られている知見について述べている．

第 3 章では，模擬血栓の評価結果と理論曲線でのカーブフィッティングの結果を述べている．評価結果として，血栓の組成を変えたときの剛性と応力ひずみ特性の変化を述べている．また，どのような超弾性モデルと粘弾性モデルを用いたとき血栓の力学的挙動の実験データの再現が可能であるかを述べている．

第 4 章では，粘弾性則を実装した FEM で血栓の力学的挙動を解析した結果を述べている．血栓の発揮する超弾性，粘弾性，および機械的ヒステリシスがどのように数値解析で再現されるか，検証結果を述べている．

第 5 章では，Damage モデルおよび弾塑性則を実装した FEM を実行した結果を述べている．本章では検証範囲として，血栓の種類を 3 種類へと拡張し，さらに，引張-圧縮の両方の負荷形態へと拡張している．超弾性と機械的ヒステリシスがどのように数値解析で再現されるか，検証結果と考察を述べている．

第 6 章では，総論として，第 3, 4, 5 章の知見をもとに，本研究でおこなった数値解析の有効性についてまとめている．そして，機械的血栓除去の研究を進める上で最適な数値解析手法を提言している．

審査の要旨

報告番号	甲　第 5918 号	氏　名	田代　紘一郎

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	Ph. D.	堀田　篤
	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）	須藤　亮
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	荒井　規允

学士（工学），修士（生命科学）を有する田代紘一郎君の学位請求論文は「血栓の力学的挙動の数値解析手法に関する研究」と題し，全 6 章から構成されている．本論文では，急性期脳梗塞を治療するための機械的血栓除去法に関して，その正確なコンピュータシミュレーションを構築するために，血栓の力学的挙動の数値解析に焦点をあてて研究を実施している．すなわち，本論文の研究目的は，血栓が発揮する複雑な力学的挙動を予測可能とする数値解析手法を確立することである．本論文では，血栓は血液という粘弾性液体から形成されることに着目し，粘弾性則を実装した有限要素法解析（Finite Element Method : FEM）を構築している．そして，血栓と充填ゴムがいずれも粒子状と紐状の物質から成る網目状構造を有する構造の類似性から，充填ゴムの特有の現象として知られる Mullins 効果の数理モデルである Damage モデルを実装した FEM を構築している．さらに，それぞれの数値解析手法により，血栓の機械的特性がどのように再現されるかを検証している．

第 1 章では，急性脳梗塞の血管内治療に関する従来までの知見と本研究の目的を述べている．

第 2 章では，血栓の形成機序と血栓の発揮する機械的特性の基礎事項を述べている．そして，血栓の機械的特性の理論的研究と数値解析に関して，従来研究から得られている知見を述べている．

第 3 章では，血栓の FEM の実施に必要となる理論モデルと材料定数を特定することを目的として，組成の異なる 3 種類の模擬血栓を作製し，その機械的特性を評価している．実験の結果として，フィブリノーゲンを添加して作製した血栓は，添加していないものに比べて剛性が 3 倍以上になること，そして，剛性は添加量に比例しないことが示されている．実験で得られたデータを理論曲線でカーブフィッティングした結果，超弾性モデルとして Mooney-Rivlin モデル，レオロジーモデルとして 3 並列の Maxwell モデルを用いることで，実験データを再現できることが示されている．

第 4 章では，粘弾性則を実装した 3 次元の FEM（粘弾性 FEM）で血栓の力学的挙動を解析している．ここでは，粘弾性 FEM によって血栓の粘弾性の特性，すなわち，応力緩和，ひずみ速度依存性，および除荷における機械的ヒステリシスの発生を再現できることがわかった．さらに，粘弾性 FEM の応用例として，医療機器と血栓の機械的相互作用に関する解析をおこなっている．血栓の粘弾性により，ステントリトリーバーのステントストラットが血栓に徐々に入り込んでいく際の応力分布と変形を可視化できることが検証された．しかしながら，本手法では，血栓の除荷における応力ひずみ曲線と塑性ひずみを十分に再現できていないことも指摘している．

第 5 章では，Damage モデルおよび弾塑性則を実装した 3 次元の FEM（Damage モデル FEM）をおこなっている．本章では，解析対象の血栓が 3 種類へと拡張され，引張-圧縮の両方の負荷形態で検証がおこなわれている．その結果，圧縮下での赤血球濃度 0%の模擬血栓を除き，血栓のヒステリシスロス率には赤血球濃度が影響を及ぼさないことが示された．また，引張時は赤血球濃度が減るほど塑性ひずみが減少し，逆に圧縮時には赤血球濃度が減るほど塑性ひずみが増加する挙動が確認された．そして Damage モデル FEM で解析した結果，すべての種類の血栓と負荷形式において，塑性ひずみも含めて，血栓の負荷-除荷時における応力ひずみ曲線が高い精度で再現された．

第 6 章では，第 3, 4, 5 章の知見をもとに，本研究でおこなった数値解析の有効性について総括している．さらには，機械的血栓除去の研究を進める上で最適な数値解析手法を提言している．

以上要するに，本論文では，粘弾性則を実装した 3 次元の FEM，そして，Damage モデルと弾塑性則を実装した 3 次元の FEM を構築し，それぞれについて血栓の力学的挙動の予測に対する有効性の研究がなされた．これらの技術と知見は，機械的血栓除去に関する臨床症例の詳細な分析を可能とし，さらに，新たな治療技術の研究迅速化と低コスト化にも寄与しうる．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5919号	氏　名	丹羽　直也

主論文題名：

Techniques for low-latency and high-bandwidth interconnection networks by communication data compression
（通信データ圧縮による低遅延・広帯域の相互結合網技術）

HPC（High-Performance Computing）に代表される大規模並列計算では、相互結合網がボトルネックになることが予想される。システム全体の演算性能の指数関数的な上昇に比べ、通信用リンク帯域の伸びは緩やかであり、並列計算機の性能を向上させるためには、低遅延を犠牲にすることなく相互結合網の帯域を広げる技術が必要である。

相互結合網の帯域を広げる有力な方法として、通信データの圧縮がある。しかし、通信データ圧縮は圧縮遅延を伴うため、そのまま使用すると通信遅延が増大する。通信データ圧縮を利用して相互結合網の性能を向上させるためには、この遅延増加の影響を回避することが必要である。

本論文では、通信データ圧縮の遅延が性能に与える影響を緩和する低遅延・高帯域の相互結合網の技術を提案する。提案する技術は Compression Router と Selective Compression の 2 種類である。これらは、ネットワークの特性に応じて使い分けられる。大規模計算機システムの相互結合網は、Network-on-Chip のようにプロセッサコア、キャッシュ、メモリなどを結ぶ短距離ネットワークと、計算ノード間を結ぶ長距離ネットワークに大別される。この 2 つのネットワークは、伝送するデータの特性やネットワークの物理的な大きさなどから、設計上の制約が大きく異なっている。

遅延に敏感で、パケット長が短く、短距離のネットワーク向けに、圧縮・伸張の遅延をルータパイプラインに隠蔽する「Compression Router」を提案する。Compression Router は、ルーター内部に圧縮・伸長機能を組み込むことで、ルーティング処理中にパケットのペイロードを圧縮・伸長する技術である。この技術により、アプリケーションのパフォーマンスが最大で 31% 向上した。

一方、パケット長が長く、物理的な規模が大きい長距離ネットワークでは、同様のアプローチをとることが困難なため、高負荷時のみ通信データ圧縮を有効にする「Selective Compression」を提案します。Selective Compression は各計算ノードのネットワークインターフェースにおけるパケット受信頻度と待ち行列長からネットワークの混雑状況を検知し、閾値を超えた場合のみパケット圧縮を行うものです。この技術により、低負荷時に低遅延を維持しながら、最大 39% のスループット向上を達成しました。

本論文で提案するこれらの手法は、通信データ圧縮の欠点である遅延の影響を回避しつつ、高帯域の相互結合網を構築することを可能にするものである。本論文で提案するこれらの手法は、通信データ圧縮の欠点である遅延の影響を回避しつつ、高帯域の相互結合網を構築することを可能にするものである。また、大規模並列計算機システムに存在する特性の異なる 2 種類のネットワークに適用可能である。

審査の要旨

報告番号	甲　第 5919 号	氏　名	丹羽　直也

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）	重野　寛
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	松谷　宏紀
		国立情報学研究所教授	博士（工学）	鯉渕　道紘

工学士、修士（工学）丹羽直也君の学位請求論文は、Techniques for low-latency and high-bandwidth interconnection networks by communication data compression（通信データ圧縮による低遅延・広帯域の相互結合網技術）と題し 5 章から成る。

コンピュータの CPU（Central Processing Unit）単体の性能向上は限界に達しており、複数の CPU をチップ内で NoC（Network-on Chip）により接続するマルチコア、メニーコア方式が普及している。また、スーパーコンピュータやデータセンターなどの大規模コンピュータシステムでは筐体間をオフチップの相互結合網を用いて接続する。両者ともに接続されるコンピュータの数が急速に増加しており、相互結合網の転送遅延、転送容量の強化が重要になっている。様々な性能強化法の中で、転送データを圧縮する方式は、遅延、帯域の両方の改善が可能である点、他の性能強化法との併用が容易である点が特徴であるが、データの圧縮と伸長を、転送性能を阻害しないように行う必要があり、実装の困難さから広く用いられてはいない。丹羽君の研究は、NoC とオフチップ結合網それぞれの特性を考慮し、ネットワークインタフェース、ルータ本体のハードウェアに手を加えることで、データ圧縮による性能向上を行うものである。

1 章では、最近のコンピュータシステムにおける NoC、オフチップ結合網の重要性を示し、2 章で、今までの相互結合網の性能向上手法と、データ圧縮アルゴリズムについて調査している。

3 章以降が、論文の主題である。まず 3 章では NoC におけるデータ圧縮を利用した性能向上手法として、Compression Router を提案している。NoC は比較的短いパケットが短い距離を移動するため、パケットを転送するルータの転送遅延が性能に与える影響が大きい。Compression Router は、ルータの内部に圧縮ハードウェアと伸長ハードウェアを組み込み、投機的にデータ伸長を行うことにより、圧縮、伸長による転送遅延の増大を招くことなく、性能向上を実現することができる。この手法は若干のハードウェア量の増加を招くが、実アプリケーションに基づくフリットレベルのシミュレーションにより、最大 33%の性能向上を実現することが示された。

次に 4 章では筐体間を接続するオフチップ結合網に対する手法を検討している。オフチップ結合網では、転送距離が長く、パケット長も長くなるため、3 章と同じ手法を用いることは難しい。そこで、ネットワークインタフェースに圧縮、伸長機構を導入し、ネットワーク負荷が重い時のみパケットの圧縮､伸長を行う Selective Compression を提案した｡Selective Compression では、ネットワークインタフェースのパケットキューの長さにより、ネットワークの混み具合を測定し、一定の閾値を超えた時にのみ圧縮、伸長を行う。ネットワークが混雑しなければ圧縮、伸長は行われないので、転送遅延は変わらない。一方、混雑時には、パケットはキュー内で待たされるため、圧縮のための時間は転送遅延を増大させることはない。結果として、転送遅延を増大せずにデータの圧縮による恩恵により結合網の帯域を拡大することができる。シミュレーションによる評価の結果、39%の帯域改善効果が確認された。

5 章では全体をまとめると共に、今後の研究の可能性を示している。

以上、丹羽君の研究は、NoC、オフチップ双方についてその特性を考慮し、データ圧縮による結合網性能改善を行う現実的な手法を提案した点で、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5988号	氏　名	吉本　哲

主論文題名：

分泌型タンパク質における *C* 型糖修飾の役割と機能解析

糖鎖は、核酸、タンパク質に続く「第3の生命鎖」と呼ばれており、自然界に存在する多くのタンパク質は糖鎖による修飾を受けた糖タンパク質である。糖鎖はタンパク質の分泌や安定性等にも関与し、生体内でタンパク質がその機能を適切に発現するのに必要であるため、個々の糖鎖修飾の機能を解明することは糖タンパク質を理解する上で重要である。糖修飾の中でも *C* 型糖修飾は他の糖修飾と比較して基質タンパク質の報告例が少ないことから、機能についても未解明な点が多いのが現状である。以上のような現状をふまえ、本研究ではIsthmin-1（ISM1）,Vitelline membrane outer layer 1 homolog（VMO1） ,UMOD の 3 種類の基質タンパク質に焦点をあて、*C* 型糖修飾の機能解析を目的に研究を進めた。

第1章では、研究の序論として 3 種類の基質タンパク質候補と *C* 型糖修飾の機能の概説、およびそれらを研究する重要性について述べた。

第2章では、ISM1 における *C* 型糖修飾および *N* 型糖鎖修飾の役割を述べた。質量分析の結果、Trp^{223}および Trp^{226}の2ヶ所が *C* 型糖修飾されていた。*C* 型糖修飾は ISM1 の細胞外分泌量と細胞内局在を制御することを明らかにした。さらに、*N* 型糖鎖修飾阻害剤であるツニカマイシンを用いた実験などにより、*C* 型糖修飾が ISM1 に対する *N* 型糖鎖修飾に影響を与えることを発見した。以上の結果から、ISM1 の分泌において *C* 型糖修飾が最も重要であり、*N* 型糖鎖修飾は分泌できなくなった ISM1 をレスキューする形で機能することが示唆された。

第3章では、VMO1 における *C* 型糖修飾の役割を述べた。質量分析の結果、Trp^{105}は *C* 型糖修飾されていた。*C* 型糖修飾は VMO1 の細胞外への分泌に影響を与えない一方、VMO1 を不安定化させることを明らかにした。さらに VMO1 の構造解析予測の結果、Trp^{105}にマンノースが付加することによる構造変化が、VMO1 の不安定化を引き起こすことを推測した。以上の結果より、*C* 型糖修飾による不安定化タンパク質を初めて見出し、新たな機能を提唱することが出来た。

第4章では、UMOD における *C* 型糖修飾の関係性について述べた。質量分析の結果、Trp^{248}は *C* 型糖修飾されないことを明らかにした。*C* 型糖修飾されなかった理由を明らかにするために、UMOD/C248W の構造を AlphaFold2 による予測を行った結果、Trp^{248}におけるマンノースが付加する炭素原子の位置は、β シート構造に近接していることが分かった。よって、UMOD/C248W は *C* 型糖修飾のコンセンサス配列を有していても *C* 型糖修飾が行われなかった理由として、立体障害により糖転移酵素が Trp^{248}に近づけなかったためであることが予測された。以上の結果より、*C* 型糖修飾が行われる条件を考える際、コンセンサス配列だけでなく、立体構造も重要であると示唆された。

第5章は、実験により明らかにした3種類のタンパク質の機能に関する考察を行った。

第6章は、本研究の総括である。本研究では、*C* 型糖修飾が基質タンパク質に対する *N* 型糖鎖修飾に影響を与えること、基質タンパク質の構造を変化させることで不安定化させることを初めて明らかにした。

審査の要旨

報告番号	甲　第 5988 号	氏　名	吉本　哲

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	清水　史郎
	副査	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	医学博士	松本　緑
		慶應義塾大学准教授	博士（理学）	堀田　耕司

学士（工学）、修士（工学）吉本哲君の学位請求論文は、「分泌型タンパク質における *C* 型糖修飾の役割と機能解析」と題し、全 5 章で構成されている。本研究では、*C* 型糖修飾の基質タンパク質を多く同定し、その機能や役割について解析することで *C* 型糖修飾の機能解明を目的としている。具体的には、Isthmin-1（ISM1）,Vitelline membrane outer layer 1 homolog（VMO1）, Uromodulin（UMOD）という 3 種類の *C* 型糖修飾を受けると予想される基質タンパク質に焦点をあて、それぞれのタンパク質が *C* 型糖修飾を受けるか否か、基質タンパク質における *C* 型糖修飾の機能と役割について述べている。

第 1 章では、研究の序論としてタンパク質の翻訳後修飾、タンパク質の分泌や品質管理に関する糖鎖修飾の役割、*C* 型糖修飾の反応機構や報告されている機能と役割、研究対象として取り上げた 3 種類の *C* 型糖修飾を受けると予想される基質タンパク質の機能やドメイン構造、本研究を行う目的について述べている。

第 2 章では、ISM1 が *C* 型糖修飾を受けるか否かについてと ISM1 における *C* 型糖修飾および *N* 型糖鎖修飾の役割について述べた。精製した ISM1 に対して質量分析を行った結果、Trp^{223} および Trp^{226} の 2 ヶ所が *C* 型糖修飾されていた。ISM1 が *C* 型糖修飾を受けていたため、ISM1 における *C* 型糖修飾の機能解析を行った。その結果、*C* 型糖修飾は ISM1 の細胞外分泌量および細胞内局在を制御することを明らかにした。さらに、*N* 型糖鎖修飾阻害剤であるツニカマイシンを用いた実験などにより、*C* 型糖修飾が ISM1 に対する *N* 型糖鎖修飾に影響を与えることを発見した。以上の結果から、ISM1 の分泌において *C* 型糖修飾が最も重要であり、*N* 型糖鎖修飾は分泌できなくなった ISM1 をレスキューする形で機能することが示唆された。

第 3 章では、VMO1 が *C* 型糖修飾を受けるか否かについてと VMO1 における *C* 型糖修飾の役割について述べた。精製した VMO1 に対して質量分析を行った結果、Trp^{44} は *C* 型糖修飾されていない一方で、Trp^{105} は *C* 型糖修飾されていた。VMO1 が *C* 型糖修飾を受けていたため、VMO1 における *C* 型糖修飾の機能解析を行った。その結果、*C* 型糖修飾は VMO1 の細胞外分泌量に影響を与えない一方、VMO1 を不安定化させることを明らかにした。さらに VMO1 の構造解析予測の結果、Trp^{105} にマンノースが付加することによる構造変化が、VMO1 の不安定化を引き起こすことを推測した。以上の結果より、*C* 型糖修飾による不安定化タンパク質を初めて見出した。さらに、UMOD における *C* 型糖修飾の関係性について述べた。精製した UMOD に対して質量分析を行った結果、Trp^{248} は *C* 型糖修飾されないことを明らかにした。*C* 型糖修飾されなかった理由を明らかにするために、UMOD/C248W の構造を AlphaFold2 により予測を行った結果、Trp^{248} におけるマンノースが付加する炭素原子の位置は、β シート構造に近接していることが分かった。よって、UMOD/C248W は *C* 型糖修飾のコンセンサス配列を有していても *C* 型糖修飾が行われなかった理由として、立体障害により糖転移酵素が Trp^{248} に近づけなかったためであることが推測された。以上の結果より、*C* 型糖修飾が行われる条件を考える際、コンセンサス配列だけでなく、立体構造も重要であると示唆された。

第 4 章は、本研究で対象とした 3 種類のタンパク質の実験結果に関する考察を行った。

第 5 章は、本研究の総括である。本研究では、*C* 型糖修飾が基質タンパク質に対する *N* 型糖鎖修飾に影響を与えること、*C* 型糖修飾が基質タンパク質の構造を変化させることで基質タンパク質を不安定化させることを初めて明らかにした。これらの発見は *C* 型糖修飾の研究において意義深く、今後の進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（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5989号	氏　名	松村　英樹

主論文題名：

Rational points on algebraic curves and applications to rational triangles and quadrature formulas

（代数曲線の有理点問題と有理三角形と矩形求積公式への応用）

整数論において、代数方程式の有理数解を決定する問題は Diophantus 問題と呼ばれ、古代ギリシャ時代から研究されてきた。これは現代的には、代数多様体の有理点集合を決定する幾何学的な問題と見なすことができる。ここで有理点とは、有理数を座標として持つ点のことである。Fermat 予想の難解さが示唆するように、1 次元の代数多様体である代数曲線の有理点集合を決定するための統一的な解法は現在も知られていない。本論文の目的は、特定の代数曲線の有理点集合を決定し、「有理三角形」及び「矩形求積公式」に関する 2 つの具体的な問題を解決することである。また、有理点を丁度 2 個持つ超楕円曲線の無限族を構成することである。

第 1 部では、特定の超楕円曲線の有理点集合を決定することで、以下の定理を証明する：

「周の長さ同士が等しく、また面積同士も等しい有理直角三角形と有理二等辺三角形の組は相似を除いてただ 1 組しか存在しない。」

ここで、有理三角形とは、辺の長さが全て有理数となる三角形のことである。証明では、Jacobi 多様体の 2 降下法と Coleman による p 進 Abel 積分に基づいた、標準的だが高度な手法（Chabauty—Coleman 法）を用いる。高度に抽象化された現代数学の手法を用いて、初等的な幾何学への応用が得られた。なお、第 1 部の結果は、平川義之輔氏との共同研究によって得られたものであり、申請者は問題の定式化や超楕円曲線の有理点集合の計算などの主要な部分を担当した。

第 2 部では、特定の楕円曲線の有理点集合を決定することで、Bessel 多項式の重み関数に関するある種の矩形求積公式の存在や非存在を証明する。矩形求積公式とは、定積分を有限個の点（節点）での値で計算する公式である。Riesz—Shohat の定理より、有理矩形求積公式（節点が全て有理数となる矩形求積公式）の有無は、Diophantus 方程式に帰着される。有理矩形求積公式の有無の解明は、数値積分だけでなく、整数論における Waring の問題や代数的組み合わせ論における球面デザインなどの興味深い問題への応用に繋がる。澤・内田は、Hermite 多項式等の古典直交多項式の重み関数に関するある種の有理矩形求積公式の存在及び非存在を証明した。古典直交多項式は、超幾何直交多項式の系譜である Askey 図式に属する。従って、澤・内田の結果を Askey 図式に属するその他の多項式へ拡張するという問題は自然である。本研究では、数論幾何学的アプローチを用いて、「古典直交多項式に関する有理矩形求積公式」の 2 段階の一般化、すなわち、

(1) Bessel 多項式及び

(2) 先行研究ではほとんど考察されていなかった、ある虚 2 次体上

への拡張を扱った。

第 3 部では、有理点を丁度 2 個持つ種数 2 の超楕円曲線の無限族を構成する。証明では、2 降下法と Gant による Lutz—Nagell 型定理を用いる。楕円曲線の無限族の有理点集合を同時に決定した先行研究は数多く存在するが、種数が 2 以上の研究は比較的少ない。また、代数曲線が有理数体上で Mordell—Weil rank が 0 の楕円曲線を覆う場合は容易に有理点集合を決定できるが、本研究の超楕円曲線は、有理数体上で Mordell—Weil rank が 0 の楕円曲線を覆わない。さらに、本研究の超楕円曲線は Jacobi 多様体の Mordell—Weil rank が 0 だが、Chabauty—Coleman 法による有理点の個数の上界は 3 以上であるため、有理点集合を決定するには不十分である。本研究では、Lutz—Nagell 型定理を用いて上記の問題を解決した。ここで Lutz—Nagell 型定理とは、楕円曲線の捩れ有理点の集合を決定する Lutz—Nagell の定理の高種数化である。なお、第 3 部の結果は、平川義之輔氏との共同研究によって得られたものであり、申請者は 2 降下法の計算などの主要な部分を担当した。

審査の要旨

報告番号	甲　第5989号	氏　名	松村　英樹

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
		慶應義塾大学准教授	博士（理学）	田中　孝明
		東京都立大学准教授	博士（数理学）	内田　幸寛

学士（理学）、 修士（理学）松村英樹君提出の学位請求論文は、「Rational points on algebraic curves and applications to rational triangles and quadrature formulas（代数曲線の有理点問題と有理三角形と矩形求積公式への応用）」と題し、全4部15章からなる。

代数方程式の有理数解の存在は、Diophantus問題と呼ばれ、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、代数多様体と呼ばれる代数方程式で定義された幾何学的図形の有理点、すなわち有理数を座標とする点集合を決定する問題と解釈できる。有理点は、Mordell予想（Faltingsの定理）やBSD予想など、数論幾何分野の様々な重要な問題において中心的な役割を果たす。しかしながら有理点を決定することは一般的には難しく、1次元の代数多様体である代数曲線の場合ですら、決定するための統一的な解法は未だ知られていない。本論文の目的は、特定の代数曲線や代数曲線族の有理点を決定し、辺の長さが全て有理数となる三角形（有理三角形）や矩形求積法に対する具体的な応用を得ることである。

論文の第0部は序論であり、本論文の結果の概要が述べられている。第1章では代数曲線とその有理点の定義や一般的に知られている事実が述べられている。第2章では、有理三角形の組で、「辺の長さ」および「面積」がそれぞれ等しいものは、相似を除いて一意的に定まる、という本論文の最初の結果が紹介されている。第3章では、本論文の2つ目の結果である矩形求積公式に対する結果が紹介されている。矩形求積公式とは、定めた曲線上の重み付き線積分を、事前に定めた点での値の線形和で表す公式である。澤・内田は、古典直交多項式の重み関数に対する矩形求積公式の非存在や存在を証明した。本論文ではこの先行結果を、Bessel多項式と呼ばれる直交多項式の重み関数の場合に拡張している。第4章では本論文の3つ目の結果となる、丁度2つの有理点をもつ超楕円曲線の無限族の構成を与えている。論文の第1部では、本論文の最初の結果の証明が与えられている。第5章で超楕円曲線やJacobi多様体の定義を紹介した後、第6章で、Chabauty- Coleman法の紹介と証明の概要が述べられている。この結果と2-descentと呼ばれる手法を組み合わせることで、第7章では、特定の代数曲線の有理点が完全に決定されている。第8章では、この代数曲線の有理点と求める性質を持つ三角形の組の対応を通して、本論文の最初の結果が証明されている。論文の第2部では、本論文の2つ目の結果の証明が与えられている。第9章では、Bessel多項式の場合の矩形求積公式の定式化が与えられ、主結果の証明で重要な役割を果たすRiesz-Shohatの定理、Newton polygonやChristoffel-Darboux核などが説明されている。第10章と第11章ではこれらの理論を用いて、特定の場合にBessel方程式の矩形求積公式の非存在が証明されている。第12章では、Bessel方程式の矩形求積公式が存在する場合が与えられている。論文の第3部では、まず第13章で2-descentを紹介した後、第14章で超楕円曲線の無限族を構成してMordell-Weil階数が0であることを示し、第15章ではこの無限族の各曲線が丁度2つの有理点をもつことを証明する。

本論文で著者は、様々な数論幾何的手法を駆使することで、特定の代数曲線の有理点を決定することに成功し、有理三角形や矩形求積公式に対する興味深い成果を得ている。また、今まであまり研究されてこなかった種数が高い代数曲線族の有理点の決定でも新しい結果を得ている。これらの成果は国際的にも注目され、当該分野の専門家にも高く評価されている。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る。

内容の要旨

報告番号	甲　第5990号	氏　名	相田　泰毅

主論文題名：

Synthesis of Polycyclic Nitrogen-containing Compounds by Iterative Coupling of Five-membered Building Blocks

（ヘテロ五員環の反復連結法を用いた多環性含窒素化合物の合成）

アミノ酸から構成されるタンパク質のように、一次代謝産物は単量体の反復連結で合成され、その組み合わせにより多彩な生物活性を示す。一方、二次代謝産物は各々が特有の分子構造を有するため、各化合物に合わせた複雑な合成経路の開発が必要となっている。本論文は、一次代謝産物の反復合成法を応用し、ヘテロ五員環の反復連結法を基盤とした二次代謝産物や人工模倣分子の合成について述べたものである。

第一部では、緒論として、これまでに報告されている一次代謝産物の合成法を模倣した『単量体の反復連結』による複雑天然物の合成や、人工分子合成について紹介した。

第二部では、多環性ステモアミド類の網羅的全合成・構造活性相関研究について述べた。第一章では、ステモアミド類の単離・構造・生物活性・これまでの合成例について紹介し、第二章では、多環性ステモアミド類の網羅的全合成について述べた。ヘテロ五員環の反復構造から成るステモアミド類は、三環性ステモアミドを基準として、四・五環性類縁体が数多く単離されている。優れた抗炎症作用などが知られているが、複雑な多環性骨格のため合成供給が困難であり、創薬研究が立ち遅れている。1 回目のヘテロ 5 員環連結法であるビニロガス-Michael 反応を含む 7 工程で、三環性ステモアミドを合成した。次に、2 回目の連結反応であるステモアミドへのラクトン選択的な求核付加反応と、全置換型ブテノリドの構築法を確立し、四環性プロトステモナミド類を合成した。3 回目の連結反応として、Ir 触媒を用いたラクタム選択的な求核付加反応を確立し、さらにピロリジンの直接酸化反応を開発して、五環性プロトステモニン類の網羅的全合成を達成した。第三章では、合成したステモアミド類の iNOS 発現抑制活性試験について述べた。全置換型ブテノリド構造を含んだ五環性化合物が強い生物活性を示すことを明らかにし、構造活性相関を初めて解明した。第四章は、本研究の成果を簡潔にまとめた。

第三部では、5 員環ラクタムの反復連結を用いたオリゴピロリジンの迅速合成について述べた。第一章では、生体ポリアミンの生物学的な役割を紹介し、第二章では、オリゴピロリジンの立体選択的合成について述べた。スペルミンなどの生体ポリアミンは、核酸の持つリン酸基に対して高い親和性を示し、生体機能の制御に関わっている。特に、5 員環ラクタムを順次連結し、立体制御して三次元構造を剛直化したオリゴピロリジンは、特定のリン酸基を精密認識可能な分子として期待される。1 回目の連結反応では、ピロリジン環状の立体化学である *cis*/*trans* 選択的なラクタム連結法を速度論的・熱力学的条件を確立して実現した。続くエナミドの還元では、トレオ/エリトロ選択的な還元条件を開発し、4 つの立体異性体の選択的な合成法を確立した。2 回目のラクタム連結でも *cis*/*trans* 選択的な連結が可能なことを見出し、三環性化合物の合成に成功した。第三章は、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 5990 号	氏　名	相田　泰毅

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
		慶應義塾大学名誉教授	理学博士	千田　憲孝

学士（工学）、修士（理学）相田泰毅君提出の学位請求論文は、「Synthesis of Polycyclic Nitrogen-containing Compounds by Iterative Coupling of Five-membered Building Blocks（ヘテロ五員環の反復連結法を用いた多環性含窒素化合物の合成）」と題し、第一部から第三部、総括および実験編より構成されている。

アミノ酸から構成されるタンパク質のように、一次代謝産物は単量体の反復連結で生合成されている。単量体の組み合わせにより多彩な分子構造を形成し、様々な生物活性を示す。一方、二次代謝産物は、各々が特有の分子構造を有するため、各化合物に合わせた合成ルートの開発が必要となる。著者は本論文において、一次代謝産物の反復合成法を応用し、ヘテロ五員環の反復連結法を基盤とした二次代謝産物や人工分子の合成について述べている。

第一部では、緒論として、これまでに報告されている一次代謝産物の合成法を模倣した単量体の反復連結法による二次代謝産物や人工分子の合成法についてまとめている。

第二部は四章より構成されており、多環性ステモアミド類の全合成と、構造活性相関研究について述べている。第一章では、ステモアミド類の単離・構造・生物活性・これまでの合成例について紹介している。第二章では、五員環ブロックの反復連結法による多環性ステモアミド類の全合成について述べている。ステモアミド類では、三環性ステモアミドから全置換型ブテノリドが伸長した四・五環性類縁体が数多く単離されている。優れた抗炎症作用を示すことが知られているが、複雑な多環性骨格のため合成供給が困難であり、創薬研究が立ち遅れている。これに対し著者は、ヘテロ五員環を単量体とした反復連結法による合成経路の開発に成功した。三環性ステモアミドに対し、ラクトン選択的な求核付加反応によりヘテロ五員環を連結した。続いて、臭素を導入し、銀塩を用いた立体選択的な脱離反応を経由した全置換型ブテノリド構築法を確立した。脱離反応の際、速度論的な反応条件と熱力学的な反応条件をそれぞれ見出し、生じる二重結合に関し、*E*/*Z* 両方の立体化学を制御し、四環性プロトステモナミド類の全合成を達成した。次に、四環性天然物に対し、Ir 触媒を用いたラクタム選択的な求核付加反応によるヘテロ五員環の連結反応を実現し、五環性化合物を合成した。また、二酸化マンガンを用いたピロリジンの直接的な酸化反応を開発し、様々な種類の五環性プロトステモニン類の全合成に成功した。第三章では、合成したステモアミド類の抗炎症作用について述べている。LPS（リポ多糖）により誘導される iNOS（誘導型一酸化窒素合成酵素）の発現抑制活性試験により抗炎症作用を評価した。その結果、ステモアミド類の構造活性相関を初めて明らかにし、全置換型ブテノリド構造を含んだ五環性化合物が強い抗炎症作用を示すことを見出した。第四章では、第二部の成果をまとめている。

第三部には、多様な生物活性が期待される人工分子、オリゴピロリジン類の合成研究が述べられている。第二部で開発したヘテロ五員環の反復連結法を応用することにより、ピロリジン三量体の立体選択的な構築法を見出した。

総括に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、ヘテロ五員環の反復連結法を基盤とした合成戦略を確立し、多環性二次代謝産物であるステモアミド類の全合成を達成し、合成した化合物を用いて抗炎症作用に関する構造活性相関を明らかにした。また、立体選択的なオリゴピロリジンの反復連結法へと応用した。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5991号	氏　名	番匠　祥奈

主論文題名：

天然物合成への応用を志向した求電子的アミド化反応の開発

アミドは、生物活性天然物や創薬シーズにみられる重要な構造である。アミド基構築には、従来から、縮合反応や遷移金属触媒を用いた求核的カップリングが広く用いられてきた。一方、近年新たな窒素官能基導入法として、求電子性の窒素反応剤を利用した手法が盛んに研究されている。求電子的手法は、温和な条件で進行するため、多官能基化された化合物に対する実用的アミド基導入法となるが、その報告は未だ限られている。本論文では、安定で合成容易なアミド化剤による、温和な求電子的アニリド構築法、及び、エナミド構築法の開発について述べた。さらに、天然物合成への応用を志向したアルキンの迅速なエナミド変換法の開発について述べた。

緒論では、従来の求核的な炭素 - 窒素結合形成反応、及び、求電子的手法によるアミン、アミド構築法の先行研究について述べた。また、エナミド構築法とこれまでのエナミド天然物合成におけるエナミド構築の戦略をまとめた。

本論第一章では、*N*-メトキシアミドを用いた求電子的アニリド合成法、及び、求電子的エナミド合成法の開発について述べた。既存の求電子的アミド化反応の課題として、アミド化剤の安定性と触媒量が挙げられる。これに対し、安定な *N*-メトキシアミドをアミド化剤に利用することで、銅触媒存在下、アリールトリフルオロボレートに対する温和な求電子的アニリド構築を実現した。また、本手法をエナミド合成へ展開した。エナミドは、様々な生物活性天然物に見られる構造だが、縮合反応での構築が困難、かつ、酸や塩基にも不安定なため、実用的な合成手法が限られている。そこで、ビニルトリフルオロボレートを求核剤に用いて、各種条件を精査し、温和な条件下エナミド構築を達成した。また、本求電子的アニリド化、エナミド化反応の基質適用範囲と推定反応機構を示した。

本論第二章では、天然物合成への適用を志向した、アルキンからの迅速なエナミド構築法の開発について述べた。第一章で明らかにした反応機構に基づき、アルキンのヒドロメタル化で生じるビニル金属種と、アミド化剤との反応が進行すれば、アルキンから 1 工程でエナミドを構築できると考えた。各種検討の結果、アルキンのヒドロジルコニウム化で生じるビニルジルコニウム種を求核剤、ジオキサゾロンを求電子剤とし、銅触媒を用いたところ、アルキンの直接的なエナミドへの変換が実現できた。本反応は、ジルコニウム求核剤の高い官能基許容性と、銅触媒の反応促進効果から、様々な官能基を有するジオキサゾロンやアルキンへの適用が可能であった。開発したエナミド合成法を、V-ATPase 阻害活性を示すロバタミド類の部分構造の合成へ適用した。その結果、不安定なβ-ヒドロキシエステルを有するアルキンに対し、ロバタミド類が有するオキシムエーテル構造を含むエナミド構造が導入できた。このように本反応は、複雑な構造を有するエナミドの合成に利用できる高い実用性が明らかとなった。

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 5991 号	氏　名	番匠　祥奈

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	理学博士	山田　徹
		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）	高橋　大介
		慶應義塾大学名誉教授	理学博士	千田　憲孝

学士（工学）、修士（理学）番匠祥奈君提出の学位請求論文は、「天然物合成への応用を志向した求電子的アミド化反応の開発」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。

アミド基は、生物活性天然物や創薬シーズにみられる重要な構造である。元来、アミド基の構築には、縮合反応や遷移金属触媒を用いた求核的カップリング反応が広く用いられてきた。一方、近年新たな窒素官能基導入法として、求電子性の窒素反応剤を利用した手法が盛んに研究されている。穏和な条件で進行する求電子的手法は、多官能基化された化合物に対する実用的なアミド基導入法となるが、その報告はいまだ限られている。著者は本論文において、銅触媒の存在下、安定で合成容易な *N*-メトキシアミドを求電子的アミド化剤として用いる求電子的アミド化法と、天然物合成への応用を志向したアルキンを出発原料とするエナミド合成法の開発について述べている。

緒論では、従来の求核的な炭素-窒素結合形成反応、および、求電子的なアミン・アミド構築法の先行研究についてまとめている。また、エナミン由来のアミド結合をもつエナミド構造について、一般的な合成法と、これまでのエナミド天然物に対するエナミド合成法について記載されている。

本論第一章では、*N*-メトキシアミドを用いた求電子的アミド合成法、および、求電子的エナミド合成法の開発について述べている。既存の求電子的アミド化反応の課題として、アミド化剤の安定性の低さと等量の銅塩を必要とする点が挙げられる。これに対し著者は、安定な *N*-メトキシアミドを求電子的アミド化剤に利用し、銅触媒と塩化リチウム存在下、アリールトリフルオロボレートに対する穏和な求電子的アミド合成法を開発した。また、本求電子的アミド化の基質適用範囲を精査し、本反応の推定反応機構としてトランスメタル化/酸化的付加経由であることを明らかにした。次に、本手法をエナミド合成へと展開した。エナミドは、様々な生物活性天然物に見られる重要な構造だが、一般的にアミド合成に用いられる縮合反応では構築が困難であり、酸や塩基にも不安定なため、実用的な合成手法が限られている。著者は、ビニルトリフルオロボレートを求核剤として用いたところ、温和な反応条件下におけるエナミド合成法の開発に成功した。

本論第二章では、第一章で述べたエナミド化の反応機構に基づき、アルキンを出発原料とする求電子的エナミド構築法の開発について述べている。各種検討の結果、アルキンのヒドロジルコニウム化で生じるビニルジルコニウム種を求核剤、ジオキサゾロンを求電子剤とし、銅触媒を添加すると、アルキンから一工程でエナミド構築が実現できた。本反応は、ジルコニウム求核剤の高い官能基許容性と、銅触媒の反応促進効果から、様々な官能基を有するジオキサゾロンやアルキンへの適用が可能であった。そこで、開発したエナミド合成法を、V-ATPase 阻害活性を示すロバタミド類の部分構造の合成へ適用した。その結果、不安定なβ-ヒドロキシエステルを有するアルキンに対し、ロバタミド類が有するオキシムエーテル構造を含むエナミド構造が導入できることを見出した。このように、複雑な構造を有するエナミドの合成に利用できることから、本反応の高い実用性が明らかとなった。

総括に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、銅触媒を用いる有機ホウ素試薬の求電子的アミド化・エナミド化反応の開発と、アルキンから生じるビニルジルコニウム化合物の銅触媒を用いる求電子的エナミド化反応の開発に成功した。本研究で開発された新規反応は、生物活性天然物や創薬シーズの合成における有用な新規方法論を提示している。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5992号	氏　名	山本　大樹

主 論 文 題 名 ：

去勢抵抗性および低酸素環境下の前立腺がん細胞における
O-グリカンの発現と機能の解析

前立腺がんは、男性において最も罹患数の多い悪性腫瘍である。前立腺がん患者の 5 年生存率は他のがん種と比べると比較的高いが、患者数の増加に伴って治療耐性を示す悪性度の高い前立腺がん患者が増加することが問題となっている。そのため、悪性化した前立腺がんに対する治療法が求められている。現在、前立腺がんの診断には、血中の前立腺特異抗原（PSA）の濃度を測定する PSA 検査が用いられているが、PSA 検査は高確率で偽陽性を示し、患者に対して侵襲的な診断方法が必要になることが多い。よって、より精度の高い診断法が必要である。糖鎖は特定のがん種やがん細胞の表現型によって特徴的な発現パターンを示し、様々な細胞機能に関わることが知られている。そこで本研究では、構造の多様さや獲得の難しさによって十分に研究が行われていない *O*-グリカンに着目し、悪性化した前立腺がん細胞における *O*-グリカンの発現とその機能を解明した。

第 1 章では、がんと糖鎖についての背景を説明し、本研究の意義と目的を述べた。

第 2 章では、前立腺がんで一般的に行われるホルモン療法に対する抵抗性を獲得した前立腺がんである去勢抵抗性前立腺がん（CRPC）細胞における *O*-グリカンの発現と機能を解析した。糖鎖プライマー法を用いて CRPC 細胞に発現する *O*-グリカンの発現解析を行った結果、CRPC 細胞では、core 4 型 *O*-グリカンおよび、その合成酵素遺伝子である *GCNT3* の発現が特徴的に増加することを見出した。さらに、*GCNT3* は、細胞の遊走と上皮間葉転換を抑制し、細胞増殖を促進する機能を有することを明らかにした。

第 3 章では、がん細胞の悪性化の主な要因の 1 つである低酸素環境が前立腺がん細胞の *O*-グリカンの発現に与える影響と、発現した *O*-グリカンの機能を解析した。糖鎖プライマー法を用いて低酸素環境下の前立腺がん細胞における *O*-グリカンの発現を解析した結果、低酸素環境下の前立腺がん細胞では、sTn 抗原および sTn 抗原合成酵素遺伝子である *ST6GalNAc*1 が特徴的に発現増加することを見出した。さらに、*ST6GalNAc*1 は低酸素環境下の前立腺がん細胞の細胞遊走-増殖ダイコトミーと薬剤耐性に関与していることを明らかにした。

第 4 章では、本研究で得られた知見を総括し、本研究の成果が当該分野の基礎研究に与える影響と臨床応用への展望について述べた。

審査の要旨

報告番号	甲　第 5992 号	氏　名	山本　大樹

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	工学博士	佐藤　智典
	副査	慶應義塾大学教授	博士（理学）	宮本　憲二
		慶應義塾大学教授	博士（薬学）	荒井　緑
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	清水　史郎
		慶應義塾大学名誉教授	農学博士	井本　正哉

学士（理学）・修士（工学）山本 大樹君提出の学位請求論文は「去勢抵抗性および低酸素環境下の前立腺がん細胞における *O*-グリカンの発現と機能の解析」と題して、4 章で構成されている。前立腺がんは、男性において最も罹患数の多い悪性腫瘍である。前立腺がん患者の 5 年生存率は他のがんと比べると高いものの、患者数の増加に伴い治療耐性を示す悪性度の高い前立腺がん患者が増加していることが問題となっている。そのため、悪性化した前立腺がんに対する治療法が求められている。また、前立腺がんの診断では、血中の前立腺特異抗原（PSA）を測定する検査が行われているが、PSA 検査は高確率で偽陽性を示すため、その後に侵襲的な検査が必要になることが多い。そこで、精度の高い診断法が求められている。糖鎖は、がんの種類に応じて特徴的な発現パターンを示し、多様な細胞機能に関わることが知られている。そこで本論文の著者は、糖タンパク質に提示されている *O*-グリカンに着目し、悪性化した前立腺がん細胞における *O*-グリカンの発現とその機能の解析を実施している。

第 1 章では、がんと糖鎖についての背景、および本研究の意義と目的が述べられている。

第 2 章では、前立腺がんで一般的に行われるホルモン療法に対して抵抗性を獲得した去勢抵抗性前立腺がん（CRPC）細胞における *O*-グリカンの発現とその機能の解析が行われている。糖鎖プライマー法を用いて CRPC 細胞での *O*-グリカンの発現解析を行うことで、core 4 型 *O*-グリカンおよびその合成酵素遺伝子 *GCNT3* の発現が特徴的に増加することを見出している。さらに、*GCNT3* は細胞の遊走と上皮間葉転換を抑制し、細胞増殖を促進する機能を有していることを明らかにしている。

第 3 章では、がん細胞の悪性化の要因のひとつである低酸素環境下における前立腺がん細胞での *O*-グリカンの発現とその機能の解析が行われている。糖鎖プライマー法を用いて低酸素環境下の前立腺がん細胞における *O*-グリカンの発現を解析することで、sTn 抗原およびその合成酵素遺伝子 *ST6GalNAc1* が特徴的に発現増加することを見出している。さらに、*ST6GalNAc1* は低酸素環境下の前立腺がん細胞の細胞遊走－増殖ダイコトミーと薬剤耐性に関与していることを明らかにしている。

第 4 章では、本研究で得られた知見を総括し、本研究の成果が当該分野の基礎研究に与える影響、さらに臨床応用への展望が述べられている。

本論文では、前立腺がん細胞の悪性化の要因となる去勢抵抗性と低酸素環境により誘導される糖鎖を解析し、その糖鎖の合成酵素遺伝子の役割を解明している。これらの成果は、がん細胞の悪性化における糖鎖の役割を解明するための手法の確立という基礎的な分野だけではなく、創薬ターゲットや医薬品開発にも寄与することが期待される。

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5993号	氏　名	臺信　直人

主 論 文 題 名 :

On ideal class groups of non-abelian extensions defined by Galois representations associated to modular forms

（保型形式に伴う Galois 表現が定める非可換拡大体のイデアル類群について）

整数論において、代数体のイデアル類群は重要な研究対象である。有理数体 Q 上の Abel 拡大のイデアル類群については様々なことが知られている。一方で、Q 上非 Abel な拡大のイデアル類群について知られていることは少ない。申請者は、保型形式に伴う Galois 表現から定義される Q 上の様々な非可換拡大に対し、そのイデアル類群の Galois 加群としての構造を研究した。

以下 p を奇素数とする。まず始めに、Q 上の楕円曲線 E の p-等分体 $Q(E[p])$のイデアル類群 $Cl(Q(E[p]))$を扱う。最近 Prasad と Shekhar は、$Cl(Q(E[p]))$の p 部分の半単純化に、E の p 等分点の群 E[p]が現れる十分条件を E の古典的な Selmer 群を用いて与えた。ここで、半単純化とは Galois 加群としてのある種の既約分解である。本論文では、$Cl(Q(E[p]))$の p 部分の半単純化に E[p]の j 回対称積 $Sym^jE[p]$が現れる十分条件を、$Sym^jE[p]$の Bloch-Kato による Selmer 群を用いて与えている。Prasad と Shekhar が扱ったのは j=1 の場合であり、この結果はその部分的な一般化を与える。

次に、正整数 n に対し E の p^n-等分体 $Q(E[p^n])$のイデアル類群 $Cl(Q(E[p^n]))$を扱う。まず E の Q 有理点の特別な部分群 $E(Q)_{ur}$ を導入し、その性質を考察している。そして、$Cl(Q(E[p^n]))$から E の p^n-等分点の群 $E[p^n]$への Galois 射全体のなす加群について、その長さの下界を $E(Q)_{ur}$ を用いて与えている。特に n=1 で E[p]が既約の場合には、この結果は Prasad と Shekhar の結果を部分的に精密化するものである。

最後に、重さが一般の保型形式に伴う mod p Galois 表現（表現空間を M とする）に対し、それが定める非可換拡大体 K のイデアル類群 Cl(K)を扱う。本論文では、Cl(K)の p 部分の半単純化に M が現れる十分条件を、M の Bloch-Kato による Selmer 群を用いて与えている。この結果は、楕円曲線を扱った Prasad と Shekhar の結果の、重さが 2 以上の保型形式への部分的な一般化を与えている。加えて、この結果の適用例を Bloch-Kato 予想を仮定した上で 2 つ構成している。一つ目の例は、M が Q 上の楕円曲線 E に対し E[p]と同型で、K が Q(E[p])に一致する場合であって、Prasad と Shekhar の結果が適用できない場合である。二つ目の例は、M が Q 上の楕円曲線に由来しない表現の場合である。

審査の要旨

報告番号	甲　第 5993 号	氏　名	臺信　直人

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	博士（理学）	栗原　将人
	副査	慶應義塾大学教授	博士（理学）	井関　裕靖
		慶應義塾大学教授	博士（数理科学）	坂内　健一
		慶應義塾大学准教授	博士（理学）	田中　孝明

学士（理学），修士（理学）　臺信直人君提出の学位請求論文は，「On ideal class groups of non-abelian extensions defined by Galois representations associated to modular forms （保型形式に伴う Galois 表現が定める非可換拡大体のイデアル類群について）」と題し，全 5 章から構成されている．

整数の素因数分解の類似を一般の環で考えた素元分解には一般に一意性がなく，一意性がどれだけ破綻するかを測るイデアル類群は，現代数学の重要な研究対象である．代数体の次数が比較的小さいとき，あるいは有理数体上 Abel 拡大体の場合には，この 200 年の間にこのような体のイデアル類群について，多くの結果が得られている．臺信直人君提出の本学位請求論文で扱うのは，楕円曲線の等分点や保型形式に伴う表現から作られる重要な代数体に対して，そのイデアル類群の研究であり，そのようなイデアル類群と有理数体上の Galois 表現のコホモロジー群（Selmer 群）との関係が詳しく調べられている．Abel 拡大体（もしくはそれに近い拡大体）については，このような関係は今までにも研究されてきたが，Abel 拡大体とはまったく異なる，上記のような非 Abel 拡大体に対して，このような研究は今までほとんどなされていなかった．最近の Prasad と Shekhar の楕円曲線についての結果を出発点として，本論文の著者は楕円曲線の対称積や重さが 2 より大きい保型形式に対して，Prasad と Shekhar の結果を拡張した．そのために著者は古典的な Selmer 群ではなく，比較的最近定義された Bloch Kato の Selmer 群を用いるという工夫をして，イデアル類群の様子を調べることに成功した．特に，Birch Swinnerton-Dyer 予想や Bloch Kato 予想を認めれば，円分体についての有名な Herbrand Ribet の定理の類似が得られることになる．また，本論文で得られた結果は，異なる Galois 表現の Selmer 群を比較した定理であるとみなすこともでき，Bloch Kato 予想のような重要な未解決問題への貢献も将来期待できる．

論文の第 1 章は序論であり，本論文の研究の背景・先行結果と，本論文で得られた主定理が述べられている．第 2 章では Bloch Kato の Selmer 群や Tate Shafarevich 群のような，本論文で用いられる重要な概念が説明されている．

第 3 章では，有理数体上の楕円曲線に対して，その p 等分点の対称積についての Bloch Kato の Selmer 群が十分に大きければ，p 等分体のイデアル類群が十分に大きいこと，より正確には，イデアル類群が p 等分点の対称積を Galois 加群として商に持つことを証明している．これは Prasad と Shekhar の結果を p 等分点の対称積に拡張する結果である．

第 4 章では，楕円曲線の有理点の不分岐部分群というものを定義し，それが大きければ，等分体のイデアル類群が大きいという結果を証明している．

第 5 章は，Prasad と Shekhar の結果の保型形式への拡張である．有理数体上の楕円曲線は Wiles らの定理により，重さ 2 の保型形式と対応していることがわかっている．この章で著者は，重さが 2 より大きな保型形式に対しても，保型形式の Galois 表現に対する Bloch Kato の Selmer 群が十分に大きければ，その Galois 表現の核に対応する代数体のイデアル類群は大きいこと，より正確には，イデアル類群が Galois 加群として保型形式に伴う表現をその商に持つことを証明している．

以上のように本論文において著者は，楕円曲線の等分点を付け加えて得られる体や保型形式に伴う Galois 表現の核に対応する非 Abel 拡大体のイデアル類群を研究し，有理数体上の Bloch Kato の Selmer 群との関係を明らかにすることに成功した．これは代数的整数論の世界に大きな進歩をもたらす結果である．

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る．

内容の要旨

報告番号	甲　第5994号	氏　名	服部　英春

主 論 文 題 名 ：

深層学習に基づく肺腺癌再発予測に関する研究

病理医は，HE（Hematoxylin and Eosin）染色後の病理組織標本（HE染色画像）を顕微鏡下で目視観察し，病理診断を行う．しかし，HE染色画像の人間による形態判断だけでは手術後の再発の有無を十分には予測できず，患者の治療方針を適切に立てることが難しい．特に肺癌は世界で最も罹患率や死亡率が高い癌の１つである．早期肺癌の完全切除後でもしばしば再発することがあり，臨床的に大きな問題となっている．そのため，どのような組織像の肺癌が再発するのかが問題となり，再発する組織像の検討は重要となっている．肺腺癌の中で病理IB期肺腺癌（以後，肺腺癌IBと記載）の術後再発率は約4割であり，病理画像を診断する時点で，AIを用いて将来の再発有無が予測できれば，再発有無に応じて患者の治療方針を適切に立てることに繋がり，患者のQOLを向上することができる．

本研究では，国立がん研究センター東病院にて取得された肺腺癌の手術標本病理画像を使用した．HE染色した標本のデジタル病理画像と畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network：CNN）を用いた機械学習により，肺腺癌IB（早期肺腺癌）の切除後の再発を予測することを試みた．2色空間の特徴を抽出する識別器と，その識別器と1色空間の特徴を抽出する識別器を画像ごとに自動的に切り替えるスイッチング識別器を構築した．そして，これらの識別器を用いて肺腺癌IBの再発の有無を予測する腫瘍識別手法を開発した．提案手法は，細胞核，細胞質や線維芽細胞だけでなく，腺腔構造と管腔構造や空気からなる白い領域内の特徴を解析する．提案手法を評価するために，外科的切除を受けた55人の肺腺癌IB患者を対象にした実験を行った．データセットに含まれる組織学的に優位なサブタイプには，Lepidic，Acinar，Papillary，およびSolidが含まれる．AcinarとPapillaryは，腺腔構造と管腔構造を含む．Lepidicには，空気からなる白い領域が含まれる．一方，Solidには，それらの構造やその白い領域は含まれない．これらのサブタイプに対して，提案手法は，部分画像単位で感度91.7%，特異度90.2%，正解率90.9%で肺腺癌IB再発を判定した．また，提案手法は，画像単位で84.8%の精度で肺腺癌IBの再発を判定した．実験結果から，2色空間の特徴を抽出する識別器は，Acinar，Papillary，Lepidicの肺腺癌IB再発の予測に適していて，スイッチング識別器は，Solidを含むAcinar，Papillary，Lepidicの肺腺癌IB再発の予測に適していることが示唆され，提案手法は，肺腺癌IBの再発有無の予測に有効であることが示された．

さらに，本研究では，色・輝度摂動画像を自動選択して識別器の再作成を繰り返し，識別器の精度向上を検討した．提案手法は色・輝度摂動画像と評価画像を判定しながら，識別器の精度向上に寄与する色・輝度摂動画像を自動で選択して識別器を再作成する．実験結果から，提案手法は段階的に肺腺癌IBの識別器の精度を向上できることを示唆している．デジタルパソロジーと機械学習を用いることで切除後肺腺癌IBの再発を高精度に予測できる可能性があり，提案手法は術後の客観的な経過観察に有効となると期待される．

審査の要旨

報告番号	甲　第 5994 号	氏　名	服部　英春

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）	塚田　孝祐
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	青木　義満
		慶應義塾大学教授	工学博士	池原　雅章

学士（理学）、修士（理学）服部英春君提出の学位請求論文は、「深層学習に基づく肺腺癌再発予測に関する研究」と題し、5 章より成る。

肺癌は世界で最も罹患率や死亡率が高い癌の一つである。早期肺癌の完全切除後でもしばしば再発することがあり、臨床的に大きな問題となっている。肺がんの再発予測は、病理組織を HE（Hematoxylin and Eosin）染色後に顕微鏡下で目視観察により行われる。しかし、HE 染色画像に見られる細胞や組織の形態学的特徴だけでは手術後の再発有無を十分に予測できないため、患者の治療方針を決定することが難しい。肺癌の一種である病理 IB 期肺腺癌（以後、肺腺癌 IB）の術後再発率は約 4 割であり、HE 染色画像による病理診断の時点で将来の再発の有無が予測できれば、患者の術後の治療方針を適切に決定することができ、QoL を向上させることができる。本研究では、深層学習を用いて肺腺癌の HE 染色画像から再発を予測する手法の確立を目的としている。肺腺癌画像では組織学的に優位なサブタイプとして、lepidic, acinar, papillary および solid の 4 種類がある。RGB 画像の特徴を抽出する識別器と、輝度画像の特徴を抽出する識別器、および画像ごとに有効な二つの識別器を自動的に切り替えるスイッチング識別器によりシステムを構築し、肺腺癌 IB の再発有無を予測する手法を提案している。提案手法は、従来の手法よりも肺腺癌の再発予測性能が優れているだけでなく、学習画像の RGB・輝度摂動画像を自動選択することにより、段階的に識別器の性能を向上できることを示している。

第 1 章では、本研究の背景を述べ、本研究の目的および目標を提起している。

第 2 章では、肺癌の種類や転移に関する情報を示し、深層学習を用いた再発予測を扱った関連研究について、これまでに用いられてきた畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network：CNN）や深層学習アルゴリズム、およびそれらの手法の問題点を記述している。

第 3 章では、HE 染色画像に対して CNN を用いた機械学習により、肺腺癌 IB の切除後の再発を予測する手法を提案している。ここでは、2 種類の識別器とそれらを切り替えるスイッチング識別器により構成されるシステムを提案している。提案手法では、細胞核、細胞質、線維芽細胞だけでなく、腺腔構造や管腔構造などの特徴を識別根拠としていることが確認されている。さらに、学習データの RGB・輝度摂動画像を学習データとして自動選択して識別器の再学習を繰り返すことにより、識別器の判別精度を向上させる方法を提案している。

第 4 章では、提案手法による肺腺癌 IB の画像データセットに対する再発予測結果、RGB・輝度摂動画像を用いた Data augmentation による特徴量解析に基づく再発予測結果を示している。提案手法は、感度、特異度、正解率で従来法よりも優れた再発予測性能を示している。スイッチング識別器を用いることにより、提案手法は肺腺癌 IB の 4 つのサブタイプ全ての再発予測に有効であることが示されている。また、提案システムにおいて、識別器の精度向上に寄与する摂動画像を自動選択して再学習することにより、段階的に肺腺癌の識別精度を向上できることが示されている。

第 5 章では、本研究で得られた成果、システムの特徴をまとめ、今後の課題および本システムの発展性についての期待を述べて、本研究の総括を行っている。

以上要するに、本論文は、肺腺癌 IB の HE 染色画像を基に、CNN と深層学習を用いて、将来の再発予測をする手法を提案するとともに、その有効性を実証したものとなっており、画像工学、医用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5995号	氏　名	菅野　翔太

主 論 文 題 名 ：

パラジウム触媒を用いたアルケン類に対するホウ素官能基の新規導入法に関する研究

本学位論文は、炭素–ホウ素結合形成に続けて遠隔位不活性な結合の官能基化を実現する遠隔二官能基化、およびこれに関連するアルケン類へのホウ素官能基の新規触媒的導入法の開発に関するものである。

遷移金属触媒によるアルケン長距離異性化を利用した遠隔官能基化は、従来困難であった分子変換を実現する手法として近年盛んに研究されている。一方、反応開始点であるアルケン部位の官能基化をも実現する遠隔二官能基化の開発は、未だ挑戦的な課題である。例えば最近、パラジウム触媒によるヒドロシランを用いた1,n-ジエンのヒドロシリル化・環化反応においては、炭素–ケイ素結合の形成に続けて、通常反応困難な遠隔位のメチレン炭素の官能基化が達成されている。しかし、特に有機合成上の有用性が高い炭素–ホウ素結合（以下、C–B 結合と記載）の形成を伴う遠隔二官能基化の報告例は少なく、アリル位やベンジル位、ヘテロ原子隣接位などの比較的活性化を受けた遠隔位の官能基化を含むものに限られていた。

第一章では、パラジウム触媒を用いた1,n-ジエン（n = 7-9）のヒドロボランによるチェーンウォーキングを経る遠隔ヒドロホウ素化・環化反応の開発について述べた。本反応は、隣接する官能基により活性化を受けていない遠隔位の官能基化と共に C–B 結合の形成を実現した遠隔二官能基化の初めての例である。

第二章では、パラジウム触媒を用いた 1,6-ジエンのヒドロホウ素化・環化反応の開発について述べた。本反応は、ボリルアルキルシクロペンタン類を 1,6-ジエンとヒドロボランから合成した初めての例である。

第三章では、パラジウム触媒を用いた1,n-ジエン（n = 6-9）のジボロンによるチェーンウォーキングを経る遠隔ジボリル化・環化反応の開発について述べた。本反応は、アルケン類に対して触媒的な遠隔ビスメタル化を達成した初めての例である。加えて、1,6-ジエンのジボリル化・環化反応の開発に成功し、報告例のなかった1,6-ジエン基質のビスメタル化・環化反応も達成した。また、導入された2つのホウ素官能基を活用することで、従来法では達成されていなかった遠隔二官能基化を形式的に実現した。さらに、本反応の重要な過程である遠隔位の不活性 $C(sp^3)$–H 結合の $C(sp^3)$–B 結合への変換は、アルキルパラジウム種とジボロンの形式的σ結合メタセシスという珍しい素過程を含むことを示唆する結果を得た。

第四章では、環化過程を経由しない遠隔ジボリル化として、アリルベンゼン類のベンジル位および末端炭素にボリル基を導入する反応について述べた。

審査の要旨

報告番号	甲　第 5995 号	氏　名	菅野　翔太

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	垣内　史敏
	副査	慶應義塾大学教授	理学博士	山田　徹
		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（理学）	佐藤　隆章

学士（理学）、修士（理学）菅野翔太君提出の学位請求論文は、「パラジウム触媒を用いたアルケン類に対するホウ素官能基の新規導入法に関する研究」と題し、序論、本論４章、結論および実験項より構成されている。

遷移金属触媒によるアルケンの長距離異性化を利用した遠隔位官能基化は、従来困難であった分子変換を実現する手法として近年盛んに研究されている。しかしながら、反応開始点であるアルケン部位の官能基化に続くもう一つのアルケンの遠隔官能基化、すなわちアルケンの遠隔二官能基化の実現は挑戦的な課題である。本著者は本論文において、この課題への取り組みとして、パラジウム触媒を用いるホウ素化合物とアルケンの反応による遠隔位官能基化を進行させる反応系を構築している。特に、有機合成化学において重要な C–B 結合生成を伴う効率的な遠隔二官能基化反応が、チェーンウォーキング（以下 C-W と略記）を利用することで達成できることを述べている。さらに、炭素－パラジウム結合とホウ素化合物間での σ 結合メタセシス反応により、２つ目の官能基の導入と触媒活性種の再生が進行するという興味深い知見を見出したことについて述べている。

序論では、これまで報告されている遠隔位官能基化反応について、それら反応の特徴とこの方法論の重要性について述べている。特に、異なる官能基の遠隔二官能基化は、各々の部位での反応を制御することが必要となり、効率的かつ選択的に反応を進行させることは難しいため、このような官能基化反応を達成できる触媒系の構築が重要であることを述べている。さらに、本遠隔位二官能基化には、金属錯体が炭素鎖上を移動する C-W が効率的に進行することが重要であることも述べている。

第１章では、パラジウム触媒を用いた 1,n-ジエン（n = 7-9）のピナコールボランによる C-W を経る遠隔ヒドロホウ素化・環化反応の開発について述べている。本反応は、最初に末端アルケン部位の末端炭素で C–B 結合生成が進行した後、C-W、五員環形成、パラジウムの末端炭素上への移動、ヒドロホウ素の H–B 結合と C–Pd 結合間で σ 結合メタセシスを起こして C–H 結合が形成されるとともに Pd–B 種が再生して進行する。この反応は、隣接する官能基により活性化を受けていない遠隔位の官能基化と共に、C–B 結合の形成を実現した遠隔二官能基化の初めての例である。しかしながら、環化反応より前に C-W 過程を含む場合には、アルケンのヒドロホウ素化のみが進行する副反応を抑制することが困難であることが明らかになった。

第２章では、第１章での知見を受け、環化前に C-W 過程を含まない 1,6-ジエンのヒドロホウ素化・環化反応の開発について述べている。ジエンの 1,6 位という離れた位置にある同じ構造のアルケン部位に対して、環化反応を伴いながら一方にボリル基を他方に水素を選択的に導入できるのことを明らかにしている。この結果は、ボリルアルキルシクロペンタン類を 1,6-ジエンとピナコールボランから合成した初めての例である。

第３章では、パラジウム触媒を用いた 1,n-ジエン（n = 6-9）のビス（ピナコラート）ジボロンによる C-W を経る遠隔ジボリル化・環化反応の開発について述べている。本反応は、アルケン類に対して触媒的な遠隔位ビスメタル化を達成した初めての例である。加えて、1,6-ジエンのジボリル化・環化反応の開発に成功し、報告例のなかった 1,6-ジエン基質のビスメタル化・環化反応も達成している。また、導入した 2 つのホウ素官能基を他の官能基へと変換することで、２つの官能基の導入を遠隔位で行える新しい形式の分子変換法を開発した。さらに、本反応の重要な過程である遠隔位の不活性 $C(sp^3)$–H 結合の $C(sp^3)$–B 結合への変換は、アルキルパラジウム種とビス（ピナコラート）ジボロンの形式的 σ 結合メタセシスという興味深い素過程を含むことを示唆する結果を得た。

第４章では、第３章の知見を展開させて、環化過程を経由しない遠隔位ジボリル化反応として、アリルベンゼン類の末端炭素およびベンジル位にボリル基を導入する反応について述べている。

このように上記の研究成果は、有機金属化学分野のみならず有機化学分野の発展に貢献し、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。

Thesis Abstract

Registration Number	"KOU" No.5996	Name	Du, Jinglun

Thesis Title

Mechanistic Insight into Electrochemical CO_2 Reduction on Boron-doped Diamond Cathode

Boron-doped diamond (BDD) electrodes possess the advantages of low raw-material cost, non-toxic, long-term stability and strong corrosion resistance. These features are highly competitive especially when compared with conventional metal electrodes. Additionally, in electrochemical CO_2 reduction reaction (eCO_2RR), over 90% Faradaic efficiency have been achieved by BDD-based electrolyzer. However, the mechanistic details of the BDD-based eCO_2RR are still not clear enough. Here, the energy conversion efficiency (chapter 2), reaction pathways (chapter 3) and the possible catalytic sites (chapter 4) were investigated for the BDD-based eCO_2RR. It is hoped that these researches will enrich the understanding of the eCO_2RR process on BDD electrodes.

Chapter 1 describes the purpose and background of this research.

Chapter 2 describes the fabrication of a CO_2 electrolyzer in order to investigate the electrical-to-chemical energy (ECE) conversion efficiency obtained when using BDD as the cathode. The ECE conversion efficiency was investigated at various bias voltages, and it reached 43% at a cell voltage of 3 V for the single product of formic acid. If the secondary products, hydrogen and carbon monoxide, are also considered, the total ECE conversion efficiency was as much as 45%.

Chapter 3 describes the significant improvement of both the reaction current and Faraday efficiency of the eCO_2RR on BDD electrodes by means of an initial eCO_2RR. Here, this effect is referred to as the self-activation of BDD. Generally, the generation of carbon dioxide radical anions ($CO_2^{\bullet-}$) is the most recognized pathway leading to the formation of hydrocarbons and oxygenated products. However, the self-activation process enabled the eCO_2RR to take place at a low potential, i.e., a low energy, where $CO_2^{\bullet-}$ is hardly produced. In this work, unidentate carbonate and carboxylic groups were identified as intermediates during self-activation. Increasing the amount of these intermediates via the self-activation process enhances the performance of eCO_2RR.

Chapter 4 describes the investigation of the possible source of the catalytic site for CO production in the BDD-based eCO_2RR. Undercoordinated site and oxidized metals are generally considered as the most likely sources of catalytic sites in eCO_2RR. However, in the BDD-based CO_2 electrolyzer, when the surface of BDD electrodes is in a stable reduction state, the catalytic activity of eCO_2RR for CO production is the best. The Faradaic efficiency for CO production was increased up to 64%, and the corresponding production rate reached 23 μmol cm^{-2} h^{-1}, which was more than three times than the standard reduction set as comparison.

Chapter 5 summarizes the results of this thesis and presents conclusions with future works.

審査の要旨

報告番号	甲　第 5996 号	氏　名	Du, Jinglun（杜　京倫）

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	工学博士	今井　宏明
		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）DU, Jinglun（杜京倫　ト，キョウリン）君提出の博士学位請求論文は，「Mechanistic Insight into Electrochemical CO_2 Reduction on Boron-doped Diamond Cathode」（ダイヤモンド電極を用いた CO_2 電解還元の機構に関する研究）と題し，5 章から構成されている．

地球環境問題，エネルギー問題に鑑み，二酸化炭素（CO_2）を有用物質に変換する技術が求められている．そのような中，電気化学的に CO_2 を還元する方法も重要なアプローチの一つとして広く研究されてきた．なかでも，ホウ素をドープした導電性のダイヤモンド電極は，耐久性に優れるのみならず，電位窓が広く，水素発生を抑えるため，CO_2 還元用の電極として優位であり，約 100%のファラデー効率でギ酸生成が可能であることから近年注目が高まっている．しかしながら，ダイヤモンド電極における CO_2 還元の反応機構については，まだ十分に解明されていない．そこで本論文では，エネルギー変換効率，反応経路，さらにはダイヤモンド電極上の触媒活性部位等について詳細に調査することで，それらの基礎的な知見を得た．

第 1 章では，序論として，CO_2 の電気化学還元に関する研究について概観し，本論文の目的および概要について述べている．

第 2 章では，二電極システムの CO_2 電解還元装置を構築することで，ダイヤモンド電極を陰極としたときの電気ー化学エネルギー変換効率を調べている．その結果，セル電圧 3.0V のときにギ酸生成のエネルギー変換効率は 43.0%を達成し，他電極によるシステムと遜色ない効率を示すことを明らかにしている．

第 3 章では，ダイヤモンド電極での CO_2 電解還元電極の前処理として，事前に CO_2 還元を短時間行うことで，電極活性化の効果があることを述べている．事前の電極活性化により，ギ酸生成において，電流値，ファラデー効率ともに格段に向上することを見出している．一般的な CO_2 電解還元の反応経路としては，CO_2 が一電子還元により CO_2 アニオンラジカル ($CO_2^{\bullet-}$) を生成することが初めのプロセスであり，この $CO_2^{\bullet-}$の生成には大きなエネルギーを与える必要があるとされている．しかしながら，この電極活性化を行うことにより，$CO_2^{\bullet-}$の生成を経由することなく，低い電位，すなわち低エネルギーでギ酸生成が可能であることを見出している．さらに，理論計算や表面の全反射測定赤外分光計測を行うことで，電極活性化により，反応中間体としての化学種がダイヤモンド電極表面に修飾され，ギ酸生成の触媒として機能することを明らかにしている．

第 4 章では，ダイヤモンド電極での一酸化炭素（CO）生成に関して，その反応活性部位について述べている．一般的には，金属の非共有電子対や金属酸化物等が触媒としての反応活性を示すと考えられているが，ダイヤモンド電極においては，水素終端を主とした還元状態が CO 生成に最も活性であることが示されている．

第 5 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．

以上要するに，本論文の著者は，CO_2 の電気化学的還元における反応機構を明らかにするとともに，有用物質への変換に関する重要な知見を得ており，電気化学分野のみならず，環境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．

内容の要旨

報告番号	甲　第5997号	氏　名	林　孝星

主 論 文 題 名 ：

多孔質シリカのナノ空間を利用した芳香族分子の合成および構造と特性の制御

1 nm 近傍のナノ空間は多様な分子との強い相互作用をもつことから，これを利用することで新奇な分子合成法の開発や分子の特性制御が可能と考えられる．しかし，微小な空間のサイズのコントロールは容易でなく，分子との相互作用の研究は不十分であった．近年，0.7~2.0 nm の間でサイズコントロールが可能な多孔質シリカ（スーパーマイクロポーラスシリカ：SMPS）が開発され，微小なナノ空間のサイズが様々な物質に与える影響が明らかになりつつある．本研究では，約 1 nm の微小空間における分子の反応および分子の特性変化に着目し，SMPS を用いた新たな芳香族分子の合成手法の開発と芳香族分子の特性制御を試みた．ここでは，シリカ細孔内における分子の特異な環化反応を追跡するとともに，特徴的な光学特性をもつ芳香族分子がナノ空間内で示すユニークな構造と機能の変化を調査し，これらの応用の可能性を検討した．

第 1 章に，本研究の背景とこれまでの研究を概説し，本研究の目的と概要を示した．

第 2 章では，SMPS のナノ空間内では，通常は生じない特異な環化反応が進行することを明らかにした．ここでは，クエン酸を原料として蛍光機能を有する環状のピロン誘導体を合成し，その特性を評価し，ナノ空間を利用すると特異な反応による化合物合成が可能になることを示した．

第 3 章では，芳香族カルボニルであるベンズアントロン（BA）の光学特性におよぼすナノ空間の影響を検討し，1 nm サイズのシリカ細孔との相互作用によって発光効率が大幅に増加すること，および発光増強のメカニズムを明らかにした．BA は基本的に非放射性であるが，分子サイズと同等の細孔に内包されると，シリカ壁との水素結合およびマイクロポアフィリングの影響によって分子の振動が抑えられるために強い発光を示すと結論付けた．

第 4 章では，フォトクロミック機能をもつ芳香族分子であるスピロピラン（SP）の構造および光学特性におよぼすナノ空間の影響を検討し，1 nm サイズのシリカ細孔との相互作用による分子構造にともなう色変化およびそのメカニズムを明らかにした．ここでは，SP はナノ空間内での酸性と強力な水素結合によって安定に開環して発色することが確認されるとともに，SMPS と SP の複合体は pH センシングへの応用が可能であることを示した．

第 5 章では，総括として各章で得られた結果をまとめるとともに今後の展望を示した．ナノ空間を利用すると，複雑な構造の分子合成を簡便にする，芳香族カルボニルの蛍光増強を簡単に行うこと，クロミック分子とナノ空間を組み合わせるとセンシング材料への利用といった機能化が可能となる．

審査の要旨

報告番号	甲　第 5997 号	氏　名	林　孝星

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	工学博士	今井　宏明
	副査	慶應義塾大学教授	Dr. sc. nat.	チッテリオ，ダニエル
		慶應義塾大学教授	工学博士	吉岡　直樹
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	緒明　佑哉

学士（工学），修士（工学）林孝星君提出の学位請求論文は「多孔質シリカのナノ空間を利用した芳香族分子の合成および構造と特性の制御」と題し，5 章から構成されている．

1 nm 近傍のナノ空間は多様な分子と強く相互作用することから，ナノ空間の利用により新奇な分子合成法の開発や分子の特性制御が可能になると考えられる．しかし，微小空間のサイズコントロールが困難であることから，ナノ空間と分子の相互作用の研究は不十分であった．近年，0.7~2.0 nm の間でサイズコントロールが可能な多孔質シリカ（スーパーマイクロポーラスシリカ：SMPS）が開発され，微小なナノ空間のサイズが様々な物質に与える影響が明らかになりつつある．本研究は，約 1 nm の微小空間における分子の反応および分子の特性変化に着目し，SMPS を用いた新たな芳香族分子の合成手法の開発と芳香族分子の特性の制御を目指すものである．ここでは，シリカ細孔内における分子の特異な環化反応を解析するとともに，芳香族分子のユニークな構造変化と光学機能の解明を通じて，ナノ空間内の芳香族分子の応用が検討されている．

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，通常は生じない特異な環化反応が SMPS のナノ空間内で進行することを明らかにしている．ここでは，蛍光機能を有する環状のピロン誘導体がクエン酸から合成されるプロセスと得られる分子の特性を解明し，ナノ空間の利用による特異な化合物合成の可能性を示している．

第 3 章では，芳香族カルボニルであるベンズアントロン（BA）の光学特性におよぼすナノ空間の影響を検討し，1 nm サイズのシリカ細孔との相互作用によって発光効率が大幅に増加すること，およびこの発光増強のメカニズムを明らかにしている．ここでは，シリカ壁との水素結合およびマイクロポアフィリングの影響によって分子振動が抑えられるため，分子サイズと同等の細孔に内包された BA は強い発光を示すことが示唆されている．

第 4 章では，フォトクロミック機能をもつ芳香族分子であるスピロピラン（SP）の構造および光学特性におよぼすナノ空間の影響を検討し，1 nm サイズのシリカ細孔との相互作用による分子構造と光学特性の変化，およびそのメカニズムを明らかにしている．ここでは，SP はナノ空間内での酸性と強力な水素結合によって安定に開環して発色することが確認されるとともに，SMPS と SP の複合体は pH センシングへの応用が可能であることが示されている．

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．

以上要するに，本論文では多孔質シリカのナノ空間と分子との相互作用を明らかにするとともに，ナノ空間における芳香族分子の光学機能に関して理論と実験の双方からその有効性を実証しており，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5998号	氏　名	村山　智大

主論文題名：

磁気式アブソリュートエンコーダの高精度化のための
磁気記録シミュレーションと磁極配列に関する研究

工作機械の更なる高度化のために，その位置検出に関して，高信頼性・高効率・高精度が要求されている．信頼性の高い効率的な位置検出の観点から，磁気式アブソリュートエンコーダの高精度化が期待されている．従来の磁気式アブソリュートエンコーダの高精度化のために，信号処理における内挿誤差を低減することが必要である．本論文では，磁気式アブソリュートエンコーダの内挿誤差低減のために，磁気記録条件最適化による磁気信号の高調波低減，磁気記録媒体の磁場出力向上による S/N 比改善，磁気トラック間干渉による磁気信号オフセットの低減，アブソリュート信号の品質改善と磁極間隔および信号波長短縮を試みている．

第 1 章では，本研究の背景と従来技術について概説した．他の検出方式と比較して，磁気式アブソリュートエンコーダが信頼性に優れている理由と，従来技術では高精度が実現されていないという課題を明らかにした．

第 2 章では，磁気記録媒体の磁化と磁場，および磁気センサにより検出される信号のシミュレーション方法を開発した．シミュレーションによって記録電流パルス幅を最適化することにより，第 3 次高調波含有率を低減できることを示した．また，記録電流パルスの最適化によって内挿誤差を低減できることを実験により確認した．

第 3 章では，第 2 章で開発したシミュレーション方法を応用して，磁気記録媒体の磁場出力を算出した．大きな磁場出力が期待される材料である異方性 SmFeN ボンド磁石の磁気記録媒体に開発したシミュレーションを適用し，同媒体により，従来用いられてきた塗布型記録媒体に対して，およそ 2 倍の磁場出力が得られ，S/N 比を改善できる可能性を示した．

第 4 章では，第 2 章で開発したシミュレーション方法を 3 次元に拡張し，磁気式アブソリュートエンコーダの磁気トラック間の磁気干渉を明らかにした．シミュレーションと実験で得られた磁気トラック間干渉を比較し，シミュレーションによって磁気トラック間の磁気干渉を予測可能であることを示した．また，磁気シールドを導入したシミュレーションにより，磁気シールドの効果を計算し，磁気シールドによって磁気トラック間の磁気干渉を大幅に低減できる可能性を示した．

第 5 章では，磁気式アブソリュートエンコーダのスケールに記録される磁極間隔を最適化することにより，信号処理に関する内挿誤差を低減した絶対位置の検出方式を提案した．提案方式の有用性を確認するため，磁極間隔に関する内挿誤差の実験検証を行った．提案した方式で磁極間隔を最適化した場合，安定して絶対位置の検出が可能であり，内挿誤差を低減できることを確認した．

第 6 章では，各章で得られた内容をまとめ，研究の成果として，提案した方式により，磁気式アブソリュートエンコーダの信号処理における内挿誤差を低減し高精度化が可能であることを要約した．

審査の要旨

報告番号	甲　第 5998 号	氏　名	村山　智大

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	青山　英樹
	副査	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）	闇　紀旺
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	竹村　研治郎
		カリフォルニア大学教授	工学博士	山崎　和雄

学士（工学），修士（工学）村山智大君提出の学位請求論文は，「磁気式アブソリュートエンコーダの高精度化のための磁気記録シミュレーションと磁極配列に関する研究」と題し，6 章から構成されている．

工作機械のテーブル位置制御に関して，高信頼性・高精度化が要求されており，磁気式アブソリュートエンコーダの性能向上が期待されている．その向上のために，磁気式アブソリュートエンコーダの信号処理における内挿誤差の低減，および，位置検出の高分解能化が必要である．本論文では，磁気記録条件最適化による磁気信号高調波の低減，磁気記録媒体の磁場出力改善による検出信号 S/N 比の向上，磁気トラック間の磁場干渉低減による磁気信号の安定化により，磁気式アブソリュートエンコーダの内挿誤差を低減するとともに，独自の磁極配列によりアブソリュート位置検出信号の高分解能化を試みている．

第 1 章では，本研究の背景と従来技術について概説している．他のエンコーダ方式と比較して，磁気式アブソリュートエンコーダの信頼性が高い理由と，従来技術ではエンコーダの高精度化が実現されていない課題を明らかにしている．

第 2 章では，磁気記録媒体の磁化，および，磁気センサにより検出される磁場のシミュレーションシステムを構築している．磁気記録シミュレーションにより記録電流パルス幅を最適化し，高調波の含有率を低減している．また，記録電流パルスの最適化によって内挿誤差を低減できることを実験により確認している．

第 3 章では，磁場出力の向上が期待される異方性サマリウム-鉄-窒素（SmFeN）ボンド磁石の磁気記録媒体に対して磁気記録シミュレーションを適用し，同媒体により，従来用いられてきた塗布型記録媒体に対して 2 倍の磁場出力が得られ，S/N 比を向上できることを明らかにしている．

第 4 章では，3 次元磁気記録シミュレーションにより，磁気式アブソリュートエンコーダのトラック間の磁気干渉を明らかにし，磁気トラック間の磁気干渉を予測できることを示している．また，同シミュレーションにより，磁気シールドの効果を明らかにし，磁気トラック間の磁気干渉を大幅に低減できることを示している．

第 5 章では，磁気式アブソリュートエンコーダのスケールに記録される磁極間隔を最適化することにより，信号処理に関する内挿誤差を低減した絶対位置の検出方式を提案している．また，提案方式の有用性を確認するため，磁極間隔に関する内挿誤差の実験検証を行っている．提案した方式で磁極間隔を最適化した場合，安定して絶対位置の検出が可能であり，内挿誤差を低減できることを確認している．

第 6 章では，各章で得られた内容をまとめ，研究の成果として，提案した方式により，磁気式アブソリュートエンコーダの信号処理における内挿誤差を低減し，高精度化が可能であることを要約している．

以上要するに，本論文では，磁気記録シミュレーションにより信号処理における内挿誤差を低減するとともに，独自に提案した磁極配列により磁気式アブソリュートエンコーダの高精度化を実現しており，生産工学分野において，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5999号	氏　名	中山　牧水

主論文題名：

アクティブコロイド系への相変化誘起フェロモン相互作用の実装と集団運動相の制御

アリの群れは蒸発性フェロモンを介した間接的なコミュニケーションによって様々なタスクをこなす。このような合目的的な集団の振る舞いは群知能と呼ばれ、知性の起源を理解し、アルゴリズム化することは実問題への応用を目指す上で重要である。知的行動の創発を理解する手法として、自己推進能を有するアクティブコロイドを用いて集団運動を模倣する研究が広く行われている。適度な揺らぎの下、物理的・化学的パラメータを通してコロイド粒子間の相互作用を調整することにより、多様な集団運動を発現させ、群知能の理解、活用のための着想を得る。しかしこれまでのところ、粒子間の相互作用は直接的なものに限定され、フェロモン相互作用のようにプラットフォームを経由した間接的な相互作用は未だ実装されていない。本研究ではアリ群知能の素過程である間接的なフェロモン相互作用をアクティブコロイド系に実装し、個別粒子さらに粒子集団の挙動を詳細に調査することを目的とした。フェロモン状態を反映させるため、プラットフォームとして相変化する固体材料ならびにソフトマターを導入した。とりわけ相変化固体材料を利用したフェロモン相互作用においては、コロイド粒子の自己推進能とフェロモン誘引能をパラメータとして、集団運動の中に複数の運動相が現れることを明らかにした。また相変化ソフトマターの体積相変化を用いたフェロモン蒸発機構実装の提案を行った上で、それに向けた局所相変化過程の観察および測定法の実証を行った。

第１章では、本研究の背景と目的を述べた。

第２章では、相変化固体材料、相変化ソフトマターを利用したフェロモンプラットフォーム導入に関する理論について述べた。具体的には、交流電界によるヤヌス粒子の自己推進、コロイド粒子のレンズ効果、相変化固体材料 GeSbTe (GST)の相変化、交流電気浸透流、相変化ソフトマターポリ *N*-イソプロピルアクリルアミド (PNIPAM)の相変化、金属ナノ粒子のプラズモン、また光の干渉効果による発色変化、以上の現象のメカニズムについて述べた。

第３章では、GST 相変化によるフェロモン相互作用実装の実証を行った。交流電界印加時に自己推進するヤヌス粒子にパルスレーザ光を照射することでプラットフォームのアモルファス GST が局所的に結晶化することを示した。また結晶化に伴う抵抗値低下により、電界集中が起こる。これにより交流電気浸透流が発生し、間接的な誘引相互作用として利用できることを示した。交流電気浸透流の周波数依存性を利用することで、集団ヤヌス粒子に多様な運動相(点秩序、面秩序、線秩序)を発現させ、それらを制御できることを明らかにした。

第４章では、PNIPAM の局所相変化過程の観察法を提案し実証を行った。局所的な体積相変化を観察するために、固液界面における反射光および金ナノ粒子による散乱光の干渉効果を利用した。PNIPAM が体積相変化する際に、内部に含まれる粒子と基板の間の距離が変化する。これにより干渉の位相差が変わり粒子の発色が変化する。本章ではこの発色変化を最大化する観察条件を示し、粒子の発色変化を通じた PNIPAM 相変化過程の観察および測定を行った。

第５章では、本研究を総括したうえで今後の展望を述べた。

審査の要旨

報告番号	甲　第 5999 号	氏　名	中山　牧水

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	斎木　敏治
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	野田　啓
		慶應義塾大学教授	Ph. D.	フォンス，ポール J.
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	木下　岳司
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	嘉副　裕
		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）中山牧水君提出の学位請求論文は「アクティブコロイド系への相変化誘起フェロモン相互作用の実装と集団運動相の制御」と題し，５章から構成されている．

アリの群れはフェロモンを介した間接的情報共有によって様々なタスクをこなす．このような知的集団行動は群知能と呼ばれ，知的行動の起源を理解し，アルゴリズム化することにより，最適化問題などの実問題の解法として利用されている．知性をもった集団的振る舞いを理解する手法として，自己推進能を有するアクティブコロイドを用い，集団運動を模倣する研究が広く行われている．しかしこれまでのところ，コロイド粒子間の相互作用は直接的なものに限定され，フェロモン相互作用のようにプラットフォームを経由した間接的な相互作用は未だ実装されていない．本研究では，相変化する固体材料ならびにソフトマターを用いてフェロモン相互作用を物理実装し，コロイド粒子集団の挙動を詳細に調査することを目的としている．コロイド粒子の自己推進能とフェロモン誘引能をパラメータとすることにより，集団運動において多様な運動相が発現し，複数種の生物を模倣できることを見出している．

第１章では，研究背景としてアクティブコロイドの先行研究について述べ，コロイド粒子間の間接的な情報共有の重要性を指摘した上で，その物理的実装手段として相変化材料の利用を提案している．最後に本研究の目的を述べている．

第２章では，相変化固体材料として GeSbTe（GST）ならびに相変化ソフトマターとしてポリ（*N*-イソプロピルアクリルアミド）（PNIPAM）を利用したフェロモンプラットフォーム導入に関する理論について述べている．

第３章では，GST 相変化によるフェロモン相互作用実装について述べている．交流電界下で自己推進するヤヌス粒子にパルスレーザー光を照射することにより，プラットフォームのアモルファス GST が局所的に結晶化（低抵抗化）することを示している．低抵抗化にともなう電界集中により交流電気浸透流が発生し，これを間接的なフェロモン誘引相互作用として利用可能であることを実証している．交流電気浸透流の周波数依存性によってフェロモン誘引能が制御でき，その結果ヤヌス粒子集団において多様な運動相（点状→面状→線状）が発現することを明らかにしている．

第４章では，PNIPAM の局所相変化過程の観察方法について述べている．局所的な体積相変化を観察するために，基板界面における反射光と金ナノ粒子による散乱光の干渉を利用している．PNIPAM が相変化する際に，内部に含まれる金ナノ粒子と基板間の距離，すなわち干渉の位相差が変わり，粒子の発色が変化する．この発色変化を最大化する条件を示し，発色変化を通じた PNIPAM 相変化過程の観察を行っている．

第５章では，本研究を総括し，工学的応用の提案など今後の展望を述べている．

以上要するに，本論文はアクティブコロイド粒子系に対し，記憶材料の導入によって間接的相互作用を実装し，多様な集団運動相の発現を実証したものであり，光工学，熱流体工学分野において，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6000号	氏　名	荻野　幹人

主 論 文 題 名 :

半教師あり学習と経験ベイズ線形判別法による
複数音同時聴覚刺激型ブレインコンピュータインタフェースの構築

筋萎縮性側索硬化症（ALS: Amyotrophic lateral sclerosis）は，全身の筋肉が徐々に動かなくなる神経難病であり，本病状の最終段階は意識が明確であっても意思を表現することが出来ない「閉じ込め状態」と呼ばれる．こうした状態における意思伝達手段として，聴覚刺激により誘発される事象関連電位（ERP: Event-related potential）を用いたブレインコンピュータインタフェース（BCI: Brain-computer interface）が研究されている．聴覚刺激を用いた ERP 型 BCI の既存研究は，刺激音の判別性を高め，ERP の時系列的な重複を軽減するために，刺激を時系列に 1 つずつ提示するのが主流であり，選択肢を選ぶまでの時間が他の BCI と比較して長くなる．そこで，本研究では複数音を同時に与えることによって，選択肢が選ばれる時間を短縮し，精度良く情報伝達率（ITR: Information transfer rate）を向上させる BCI システムを構築した．判別が容易な音刺激を音刺激選定実験によって選定し，同時刺激による ERP を半教師あり学習（SSL: Semi-supervised learning）と拡張経験分布を基盤とした経験ベイズ線形判別法によって分類することで，ITR を向上させた．

第 1 章では，本研究の背景と位置付けを概説し，本研究の目的を述べた．

第 2 章では，本研究を理解する上で必要となる基礎的な生物学的な知識として，脳や聴覚系に着目した脳波の発生機序を記した．

第 3 章では，BCI に関する基礎的な工学的知識として，既存の聴覚性 ERP 型 BCI と信号処理手法について述べた．

第 4 章では，聴覚性 ERP 型 BCI に対する SSL の適用可能性について述べた．複数のデータセットに対するシミュレーションを実施し，SSL の効果を ERP 特性と BCI の選択肢検出精度から評価した．SSL が聴覚性 ERP 型 BCI に有効であることを明らかにし，SSL と相乗効果の高い機械学習法や計算効率を示した．

第 5 章では， SSL を用いた BCI システムを構築し，健常者と ALS 患者を対象にコマンドを選択する実験を行った．ALS 患者をユーザとした条件を含む実環境の中で，構築した BCI システムの有効性を検証し，健常者情報を SSL の共学習として使用することで，ALS 患者の BCI 精度を高めた．

第 6 章では，複数音同時刺激を用いた聴覚性 ERP 型 BCI を構築し，性能を検証した．聴覚刺激選定実験により同時刺激に用いる聴覚刺激を選定し，選択肢を増やしても試行時間が増加しないシステムを構築した．また，SSL と拡張経験分布を基盤としたベイズ線形判別法を適用する事で，より高精度な複数音同時刺激を用いた聴覚性 ERP 型 BCI の実現可能性を示した．

第 7 章では，本研究で得られた成果を総括し，結論と今後の展望を記した．

審査の要旨

報告番号	甲　第 6000 号	氏　名	荻野　幹人

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）・博士（医学）	満倉　靖恵
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	村上　俊之
		慶應義塾大学教授	工学博士	岡　浩太郎
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	牛場　潤一

学士（工学），修士（工学）荻野幹人君提出の学位請求論文は「半教師あり学習と経験ベイズ線形判別法による複数音同時聴覚刺激型ブレインコンピュータインタフェースの構築」と題し，7 章から構成されている．筋萎縮性側索硬化症（ALS: Amyotrophic lateral sclerosis）は，全身の筋肉が徐々に動かなくなる神経難病であり，本病状の最終段階は「閉じ込め状態」と呼ばれ，意識が明確であっても意思を表現することが出来ない状態となる．こうした状態における意思伝達手段として，聴覚刺激により誘発される事象関連電位（ERP: Event-related potential）を用いたブレインコンピュータインタフェース（BCI: Brain-computer interface）が研究されている．聴覚刺激を用いた ERP 型 BCI の既存研究は，刺激音の判別性を高め，ERP の時系列的な重複を軽減するために，刺激を時系列に 1 つずつ提示するのが主流であり，選択肢を選ぶまでの時間が他の BCI と比較して長くなる．そこで，本研究では複数音を同時に与えることによって，選択肢が選ばれる時間を短縮し，精度良く情報伝達率（ITR: Information transfer rate）を向上させる BCI システムを構築している．特に，判別が容易な音刺激を音刺激選定実験によって選定し，同時刺激による ERP を半教師あり学習（SSL: Semi-supervised learning）と拡張経験分布を基盤とした経験ベイズ線形判別法によって分類することで，ITR を向上させている．

第 1 章では，本研究の背景と位置付けを概説し，本研究の目的を述べている．

第 2 章では，本研究で必要となる生物学的な基礎事項として，脳や聴覚系に着目した脳波の発生機序を記している．

第 3 章では，BCI に関する工学的な基礎事項として，既存の聴覚性 ERP 型 BCI と信号処理手法について述べている．

第 4 章では，聴覚性 ERP 型 BCI に対する SSL の適用可能性について述べている．複数のデータセットに対するシミュレーションを実施し，SSL の効果を ERP 特性と BCI の選択肢検出精度から評価している．また，SSL が聴覚性 ERP 型 BCI に有効であることを明らかにし，SSL と相乗効果の高い機械学習法や計算効率を示している．

第 5 章では， SSL を用いた BCI システムを構築し，健常者と ALS 患者を対象にコマンドを選択する実験を行っている．これにより，ALS 患者をユーザとした条件を含む実環境の中で，構築した BCI システムの有効性を検証し，また健常者情報を SSL の共学習として使用することで，ALS 患者の BCI 精度が高められることを示している．

第 6 章では，複数音同時刺激を用いた聴覚性 ERP 型 BCI システムを新たに提案しつつ，聴覚刺激選定実験により同時刺激に用いる聴覚刺激を選定し，選択肢を増やしても試行時間が増加しないシステム構築法を示している．また，SSL と拡張経験分布を基盤としたベイズ線形判別法を適用する事で，その性能検証からより高精度な聴覚性 ERP 型 BCI の実現可能性を示している．

第 7 章では，本研究で得られた成果を総括し，結論と今後の展望を記している．

以上要するに，本研究では複数音同時刺激により情報伝達率 ITR を向上させる新たな聴覚性 ERP 型 BCI システムの構築法を示し，さらに音刺激選定実験によって予め選定された判別し易い音刺激を用いることで，同時刺激による ERP において SSL と拡張経験分布を基盤とした経験ベイズ線形判別法を用いた分類により ITR が向上できることを実証したものである．これらの研究は，ブレインコンピュータインタフェースを含む生体信号計測分野の発展において工学上，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6001号	氏　名	遠藤　康司

主論文題名：

A Study on Human Target Detection using Array Radar

（アレーレーダを用いた人物目標検出に関する研究）

MIMO（Multiple-Input Multiple-Output）FMCW（Frequency-Modulated Continuous Wave）レーダは，様々な研究で非接触での生体信号検出等に使用されている．これらの用途において性能向上を図るために，人物目標の位置推定性能を向上させることが重要である．一般的に，MIMO FMCW レーダを用いた位置推定では，距離と角度で区切られた領域の信号強度を表すレンジアングルマップを生成する．これにCFAR（Constant False Alarm Rate）のような閾値設定アルゴリズムを適用し，閾値を超える信号を検出することで，目標の位置を検出できる．しかし，生成されたレンジアングルマップ上には雑音やマルチパス成分，クラッタ成分等が生じ，閾値の設定次第で，目標の存在しない位置に誤警報が発生する可能性がある．それに伴う性能低下を改善するため，人物からの反射信号の特徴に基づく目標検出手法が提案されているが，なお課題が残る．そこで本論文では，これら誤警報となりうる信号を低減するための手法について提案する．まず，信号積分時間が短く，相対的に雑音の強度が高くなる状況において，深層学習を用いた雑音除去手法によりレンジアングルマップ上の雑音を低減する手法を提案する．加えて，クラッタ等の強力な不要波成分を低減するために，人物とその他の反射波の相関に基づく人物位置推定法について提案する．そして，各提案法について実験によりその効果を示す．

1章では，まず研究背景を述べ，従来法とその問題点，解決のための提案法の概要を紹介する．続いて，本研究の位置づけについて述べた後，本論文の構成を紹介する．2章では，MIMO FMCWレーダの原理を示す．また，MIMO FMCWレーダを用いた従来の目標検出法として，IQ信号の軌跡長を用いた手法とCFARについて詳述するとともに，その問題点を述べる．3章では，提案法として，レンジアングルマップに対する雑音除去手法について詳述する．まず，深層学習を用いた雑音除去手法として2つのアルゴリズムについて述べ，その適用方法について述べる．4章では，提案法としてIQ信号の相関を用いた人物位置推定法について詳述する．また，3章及び4章の実験評価の節において，実験による特性評価を通して，各提案法が雑音やクラッタ等を除去することができ，目標検出性能を向上させることを示す．最後に，5章で結論と将来の研究について示す．

審査の要旨

報告番号	甲　第6001号	氏　名	遠藤　康司

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	大槻　知明
	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）	重野　寛
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	眞田　幸俊

学士（工学），修士（工学），遠藤康司君提出の学位請求論文は，「A Study on Human Target Detection using Array Radar（アレーレーダを用いた人物目標検出に関する研究）」と題し，全5章から構成されている．

MIMO（Multiple-Input Multiple-Output）FMCW（Frequency-Modulated Continuous Wave）レーダは，非接触での生体信号検出等，様々な用途に対して研究されている．これらの用途において性能向上を図るために，人物目標の位置推定性能を向上させることが重要である．MIMO FMCW レーダを用いた位置推定では，距離と角度で区切られた領域の信号強度を表すレンジアングルマップを生成し，これにCFAR（Constant False Alarm Rate）のような閾値設定アルゴリズムを適用し，閾値を超える信号を検出することで，目標の位置を検出できる．しかし，生成されたレンジアングルマップ上には雑音やマルチパス成分，クラッタ成分等が生じ，閾値の設定次第で，目標の存在しない位置に誤警報が発生する可能性がある．

本論文では，これら誤警報となりうる信号を低減するための手法について提案している．まず，人物の信号積分時間が短く，相対的に雑音の強度が高くなる状況において，深層学習を用いた雑音除去手法によりレンジアングルマップ上の雑音を低減する手法を提案している．加えて，クラッタ等の強力な不要波成分を低減するために，人物とその他の反射波の相関に基づく人物位置推定法について提案している．

第1章は，序論であり，研究背景として，各種レーダとそれを用いた従来の人物目標検出法の概要及びその問題点について述べた後，提案法の概要と本研究の位置づけについて述べている．

第2章では，MIMO FMCW レーダの原理，MIMO FMCW レーダを用いた従来の目標検出法として，IQ信号の軌跡長を用いた手法とCFARについて詳述するとともにその問題点について述べている．

第3章では，提案法として，レンジアングルマップに対する雑音除去手法について詳述している．まず，深層学習を用いた雑音除去手法として2つのアルゴリズムについて述べ，その適用方法について述べている．続いて，実験による特性評価を通して，提案法が雑音を除去することができ，それに伴いCFARの閾値設定が容易となり，さらに目標検出性能を向上させることを示している．

第4章では，提案法としてIQ信号の相関を用いた人物位置推定法について詳述している．人物位置のIQ信号は周辺のIQ信号と相関が低く，壁のようなクラッタ位置のIQ信号は周辺のIQ信号と相関が高くなる点に着目し，効果的にクラッタを除去する手法を提案している．続いて，実験による特性評価を通して，提案法がクラッタを除去することができ，目標検出性能を向上させることを示している．

第5章は結論であり，本研究の総括を述べている．

以上，本論文の著者は，深層学習を用いた雑音除去手法と，IQ信号の相関を用いた人物位置推定法を提案し，その有効性を確認しており，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6002号	氏　名	福地　庸介

主論文題名：

AIエージェントの挙動に関する共通認識の構築に向けた人との
コミュニケーションモデルの研究

機械学習によって行動を学習する自律エージェント（AIエージェント）が、技術の発展にともなって複雑な挙動を扱えるようになっている。しかし、既存のAIエージェントの設計では、エージェントと共存するユーザや周囲の人とのコミュニケーションが十分に考慮されていない。AIエージェントの多くは事前に与えられた価値基準を最大化することに特化しており、それをもとに学習した行動方策は、実際の場面で人が持っている評価基準や期待とは必ずしも一致しない。真に人に利する存在となるためにAIエージェントは、学習した方策に固定的に従うのではなく、ユーザが期待する挙動を適宜認識できるようにすることが重要である。また、AIエージェントが人の期待を認識するだけでなく、人もAIエージェントの挙動を正しく把握できるようにする必要がある。エージェントの挙動を人が把握できなければ、エージェントが予測不能となり、意図せぬ動作や思わぬ事故に繋がる。しかし、特に深層強化学習モデルは大量の数値パラメータで表現され、多くの場合で人が直接理解できる表現を持たない。こうした学習モデルブラックボックス化の問題は、モデルの複雑化や大規模化とともに深刻さを増している。

本論文の目標は、人とAIエージェントの共存に向けて、AIエージェントの挙動に関する相互理解を構築する挙動アライメントを達成することである。そして、コミュニケーションを通じて挙動アライメントを達成するための2つのモデルを提案する。2つのモデルに共通するのは、AIエージェントと人との間で、目標や信念といった心的状態を帰属し合う〈心〉の読みあいの中で、両者の間に存在する情報の差異（非対称性）を明示的に組み込むことで、効果的なコミュニケーションを実現している点である。

第1に提案する「期待されるエージェント」モデルは、人がAIエージェントに達成を期待する目標を推測しながらコミュニケーションを行う過程をモデル化したものである。このモデルには、人の目標はAIエージェントの目標と必ずしも一致しないという目標の非対称性の存在が組み込まれている。目標の非対称性を考慮することでAIエージェントは、人から与えられる指示を正しく解釈することができる。さらに、解釈した指示の語彙を流用することで、AIエージェントがどのように動こうとしているかを人に伝達できるようになる。評価実験の結果、「期待されるエージェント」モデルが、指示の背後にある目標を正しく推定できること、推定した目標を元に解釈した指示の語彙をAIエージェントの動きの伝達に利用することで、人がAIエージェントの挙動を精度よく予測できるようになることが示された。

第2に提案する「推測されるエージェント」モデルは、AIエージェントの動きを見た人がエージェントに対して帰属する目標を、エージェントの側から推測しながらコミュニケーションを行う過程をモデル化している。この時、人とAIエージェントが異なる視界から環境を観測しているという観測の非対称性を考慮することで、人がAIエージェントに帰属する目標を正しく推測できる。　さらに、このモデルを応用することで、AIエージェントの目標を伝達する動き（表意動作）を生成できる。評価実験の結果、「推測されるエージェント」モデルが生成する表意動作によって、人がAIエージェントの目標をより早く、正しく推測できるようになることがわかった。

審査の要旨

報告番号	甲　第 6002 号	氏　名	福地　庸介

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	慶應義塾大学准教授	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）福地庸介君提出の学位請求論文は、「AI エージェントの挙動に関する共通認識の構築に向けた人とのコミュニケーションモデルの研究」と題し、全 6 章で構成される。

本論文は、機械学習を用いて行動を学習する自律エージェント（AI エージェント）と人の挙動アライメントについて論じている。挙動アライメントとは、AI エージェントの挙動に関する共通認識を人と構築することを指す。人の期待する挙動を AI エージェントが正しく認識し、また AI エージェントの取ろうとする挙動を人が正しく認識できるようにすることは、AI エージェントが人と共存し、真に役立つ存在となるために解決すべき重要な課題である。本論文は、AI エージェントの媒介として挙動アライメントのためのコミュニケーションをおこなうモデルとして、「期待されるエージェント」モデルと「推測されるエージェント」モデルの 2 つを提案している。また、シミュレーションとユーザスタディによる両モデルの検証結果を報告している。

第 1 章では、AI エージェントが持つ学習器のブラックボックス化や、ユーザの意図しない挙動の発生という問題を挙げ、挙動アライメントの重要性を論じている。また、人同士のコミュニケーションを論じる上で重要とされる心の理論と類比する形で、挙動アライメントを定式化している。

第 2 章では、本論文の前提となる知識を説明した上で、挙動アライメントに関連する従来手法を紹介している。また、人と AI エージェントの間に存在する目標と観測の非対称性という観点から従来手法の問題点を整理し、本研究の位置づけを明確化している。

第 3 章では、「期待されるエージェント」モデルを提案している。これは、人が AI エージェントに達成を期待する目標を推測しながらコミュニケーションする過程をモデル化したものである。さらに本章ではモデルの検証結果を報告し、人と AI エージェントの間に存在する目標の非対称性を考慮することで、人の指示を適切に解釈できるようになると結論づけている。さらに、指示の語彙を用いて AI エージェントの動きを人に伝達することで、人が AI エージェントの将来の位置を精度良く予測できるようになることを実証している。

第 4 章では、「推測されるエージェント」モデルを提案している。これは、AI エージェントの動きを見た人が AI エージェントに対して帰属する目標を、AI エージェントの側から推測しながらコミュニケーションする過程をモデル化したものである。また、このモデルをもとに、AI エージェントの目標を人に伝達する動き（表意動作）を生成する手法を提案している。提案モデルの観測の非対称性を考慮した表意動作が、考慮しない従来の場合と比べ、人にエージェントの目標をより早く推測させられることを明らかにしている。

第 5 章では、提案する 2 モデルの検証で得られた結果を総合し、将来の展望に関して述べている。

最後に第 6 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、人と AI エージェントの間の非対称性を組み込んだコミュニケーションモデルを提案・設計・実装し、挙動アライメントにおけ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6003号	氏　名	竹川　昇志

主論文題名：

表面処理粉体の化粧品原料としての能力を最大限に引き出す因子の解析

本研究では、表面処理技術を粉体に対して適用し、その塗布層における粉体配列をコントロールしてこれを平滑化させ、粉体の化粧品原料としての性能を最大限に引き出すことを目的とした。表面処理プロセスの前後では、表面処理剤の化学構造が変化するため、表面処理剤の本来の構造や性質のみに注目するのではなく、変化後の構造や性質について議論することが重要である。親水基と親油基の分子量バランスを HLB（Hydrophilic Lipophilic Balance）と呼ぶが、具体的には、各表面処理剤の表面処理後に変化した構造から考えられるHLBを擬似HLBと定義し、この擬似HLBを指標に、分散溶媒が変化した時や塗布先の素材が変化した時に塗布状態がどのように変化するのかを、表面処理二酸化チタンを利用し紫外線吸光度を塗布状態の指標として測定することとした。

第1章では、本論文の背景および目的を述べた。

第2章では、粉体の表面処理の状態に対して擬似HLBという指標を提案して、その値が粉体塗布層の構造および紫外線遮蔽能に対する影響を調査した。異なる種類と組み合わせの表面処理二酸化チタンの擬似 HLB 値を算出すると共に、各表面処理二酸化チタンの塗布層の紫外線遮蔽能との関係を検討し、どのような擬似 HLB を持つ表面処理粉体が規則正しく配列して、平滑な塗布層を形成するか調査した。その結果、特定の擬似 HLB の値の表面処理二酸化チタンにおいて、高い平滑性と紫外線遮蔽能を示す塗布層が形成されることが確認できた。

3章では、化粧品は通常は多成分混合系であることから、表面処理二酸化チタンを分散させる異なる混合溶媒が粉体配列に与える影響を調査した。溶媒の表面張力を一つの指標として一定に保ちつつ、異なる溶媒を組み合わせた液体を表面処理二酸化チタンの分散媒として利用し、塗布層の平滑性と紫外線遮蔽能を測定し擬似 HLB との関係を調べた結果、溶媒が変化しても特定の範囲の擬似 HLB の値を示す表面処理二酸化チタンを使用した場合に、良好な結果が得られる傾向が確認された。

4章では、化粧品の塗布対象物質が肌、毛髪、爪といったように一つに限らないことから、塗布対象物質の違いが粉体配列にどのような影響を与えるか調査した。塗布対象物質の表面自由エネルギーに注目し、表面自由エネルギーと擬似HLBとの関係を紫外線遮蔽能を測定することで検討した結果、表面自由エネルギーの成分が塗布層の紫外線遮蔽能に影響を与える可能性が示唆されたと共に、特定の擬似HLB値近傍で、高い紫外線遮蔽能が得られる傾向が確認された。

5章では、本研究で得られた知見をもとに総括を述べた。

審査の要旨

報告番号	甲　第 6003 号	氏　名	竹川　昇志

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	工学博士	朝倉　浩一
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士	鈴木　哲也
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	藤岡　沙都子
		慶應義塾大学教授	Dr. sc. na.	チッテリオ，ダニエル

工学士，工学修士 竹川昇志君提出の学位請求論文は「表面処理粉体の化粧品原料としての能力を最大限に引き出す因子の解析」と題し，5 章から構成されている．

紫外線による人への影響として最も知られているのは日焼けであり，それを防御するサンスクリーン剤に含まれる紫外線防御剤には有機系と無機系の 2 種がある．無機系紫外線防御剤としては二酸化チタンと酸化亜鉛の使用が世界的に認められており，本論文では，様々な表面処理を施した二酸化チタン粉体について，その塗布層における粉体配列が整いこれを平滑化させ，粉体の化粧品原料としての性能を最大限に引き出す因子を解析している．親水基と親油基の分子量のバランスを HLB（Hydrophilic Lipophilic Balance）と呼ぶが，各表面処理剤の表面処理後に変化した分子構造から考えられる HLB を擬似 HLB と定義し，この擬似 HLB の値が粉体の塗布層の平滑性を高める因子となることを見出している．

第 1 章は序論であり，本研究の背景と従来の研究が概説され，目的が述べられている．サンスクリーン剤を構成する成分と機能について説明し，その中でも無機系紫外線防御剤である粉体に関し，化粧品原料として開発が待ち望まれている技術を紹介し，本研究の立ち位置を明示している．

第 2 章では，粉体の表面処理の状態に対して擬似 HLB という指標を提案して，その値の粉体塗布層の構造および紫外線遮蔽能に対する影響を検討している．異なる種類と組み合わせの表面処理二酸化チタンの擬似 HLB 値を算出すると共に，各表面処理二酸化チタンの塗布層の紫外線遮蔽能との関係を検討し，どのような擬似 HLB を持つ表面処理粉体が規則正しく配列して，平滑な塗布層を形成するか調査している．その結果，特定の擬似 HLB の値の表面処理二酸化チタンについて，高い平滑性と紫外線遮蔽能を示す塗布層が形成されることを見出している．

第 3 章では，化粧品は通常は多成分混合系であることから，表面処理二酸化チタンを分散させる異なる混合溶媒が粉体配列に与える影響を検討している．溶媒の表面張力を一つの指標として一定に保ちつつ，異なる溶媒を組み合わせた液体を表面処理二酸化チタンの分散媒として利用し，塗布層の平滑性と紫外線遮蔽能を測定し擬似 HLB との関係を調査している．その結果，溶媒が変化しても，特定の範囲の擬似 HLB の値を示す表面処理二酸化チタンを使用した場合に，良好な結果が得られる傾向を見出している．

第 4 章では，化粧品の塗布対象物質が肌，毛髪，爪といったように一つに限らないことから，塗布対象物質の違いが粉体配列にどのような影響を与えるか検討している．塗布対象物質の表面自由エネルギーに注目し，表面自由エネルギーおよび表面処理二酸化チタンの擬似 HLB と紫外線遮蔽能との関係を調査している．その結果，表面自由エネルギーの成分が塗布層の紫外線遮蔽能に影響を与える可能性が示唆されたと共に，特定の擬似 HLB 値近傍で，高い紫外線遮蔽能が得られる傾向を見出している．

第 5 章では，各章で得られた知見をまとめ，本研究の成果を総括している．

以上要するに，本研究は無機系紫外線防御剤である二酸化チタン粉体の表面処理の状態を表す指標として擬似 HLB という概念を提案し，その値ならびに分散媒の表面張力および塗布対象物質の表面自由エネルギーが，粉体塗布層の平滑性を高め表面処理粉体の化粧品原料としての能力を最大限に引き出す因子であることを示したものであり，非平衡物理化学ならびにコロイド・界面科学の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．

Thesis Abstract

Registration Number	"KOU" No.6004	Name	Wang, Ting

Thesis Title

Optimal Product Platform Configuration Decision in Mass Customization

Platform-based product development (PPD) is a cost-efficient approach to achieve mass customization. Through PPD, manufacturers can develop various products to meet diverse customer preferences and requirements while maintaining production efficiency without compromising cost, quality, and delivery. One important problem in PPD is product platform configuration (PPC), which aims to identify and configure modules, components, or design variables on the product platform that can be shared across a product family. Two pertinent problems are: (1) how many and which type of product platform should be developed for a product family; (2) which product platform will be assigned to develop the product. The PPC decisions are endogenously linked to supply chain-related activities and will affect all the stages and sectors throughout the supply chain. Studying PPC problem from a supply chain management perspective is significant for manufacturers implementing the PPD approach. In this study, a modular platform configuration model is targeted, and various optimization methods are applied to determine the optimal platform configuration decision. More specifically, the following aspects will be targeted in this study.

In chapter 3, we study a modular platform configuration model. Modular design is recognized as the most important underlying architecture to support the product family design and product platform design. Two types of modular design approaches can be found, i.e., module selection and module integration. The platform configuration based on more module selections provides a broader solution space of possible platform configurations to meet the customer requirements exactly. However, it will increase the complexity of production process due to the proliferation of module types and part numbers. Module integration in the platform configuration facilitates the platform commonality to gain economic benefits. Traditional platform research focuses more on platform configuration based on module selection without considering the module integration simultaneously. A new model is developed to determine the optimal platform configuration for a product family while considering both module selection and integration. A hybrid-search method (HSM) combining simulated annealing (SA) and variable neighbourhood search (VNS) is developed to solve the proposed model.

In chapter 4, we examine the optimal platform configuration decision considering platform design strategy and supplier selection. Different types of platform design strategies can be found to satisfy product requirements, i.e., matching-designed, over-designed, under-designed, and hybrid-designed platforms. The matching-designed platform has a higher platform development cost and a lower customization cost while the over-designed or under-designed platform contributes different performances in these two types of costs. Traditional research balances the cost trade-off within the design domain, and few studies include the relative procurement cost from suppliers. Involving the

supplier selection problem at the earliest design stage has proven beneficial to companies. However, little attention has been paid to integrating supplier selection into the PPC problem. In this chapter, we propose a non-linear mixed-integer programming model to determine the optimal platform configuration decision while considering platform design strategy and supplier selection. A cost model including development cost, sourcing cost and customization cost is developed to illustrate the cost trade-off between platform development and customization. A solution method applying the linearization method with Gurobi solver is proposed to solve this model.

In chapter 5, we study the platform configuration problem considering demand uncertainty. Demand uncertainty is a huge challenge for supply chain management and product platform configuration. Generally, the development of product platform is ahead of new product introduction (NPI), which makes it difficult to forecast demand. Most existing research on platform configuration assumes that the demand is deterministic so that the problem can be easily dealt with. However, when considering the uncertain demand, the platform configuration decision may be changed, and the optimization problem will become more complex. How to determine the optimal PPC decision under demand uncertainty is highly important for manufacturers to develop product platform. This research gap will be filled in chapter 5. The platform configuration problem under demand uncertainty is formulated as a two-stage stochastic programming model, including the platform configuration stage and platform customization stage. A cost model including the development cost of platform, production cost and material cost for two stages, customization cost, and penalty cost of excessive platforms is developed. A linear programming embedded genetic algorithm is developed to solve the proposed model. The proposed algorithm searches the binary variables for platform configuration by using GA and determines the integer variables by solving a linear programming subproblem using Gurobi solver. Numerical experiments are conducted to illustrate the proposed model and algorithm.

Keywords: platform-based product development, product platform configuration, supply chain cost model, mass customization, modular design, platform commonality, demand uncertainty, stochastic programming

審査の要旨

報告番号	甲　第6004号	氏　名	Wang, Ting（王 挺）

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	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	稲田　周平
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	志田　敬介
		慶應義塾大学ＳＤＭ研究所顧問	博士（工学）	中野　冠
		上智大学教授	博士（工学）	伊呂原　隆

上記の Ting WANG（オウ・テイ）君の学位請求論文では、「Optimal Product Platform Configuration Decision in Mass Customization（マスカスタマイゼーションにおける最適な製品プラットフォーム構成に関する研究)」との題目のもとで、新製品開発におけるプラットフォーム構成の最適化モデルを提案・考察している。

近年、新製品開発における時間競争が注目を浴びている。例えば、自動車の新製品開発においてはMILS、HILS、VILSなどのシミュレーションソフトウエアを用いて試作が行われ、開発時間とコストを顕著に削減している。一方、市場における需要は「個」を対象にするマスカスタマイゼーションが進行しており、これをサポートするために製品のモジュール化、プラットフォーム化に関する研究が注目を浴びている。しかし、今までの研究では機械、電気、制御などの固有技術をベースとしたエンジニアリング・チェーンに着目した研究が多く、モノの流れの効率も取り入れた研究はほとんど行われていない。

このような背景の下で、本研究では既存のPPD（platform based product development）問題を拡張し、サプライチェーンマネジメント（SCM）に関連する要因も取り入れた最適な製品プラットフォーム構成に関する研究を行っている。SCMに関連する効率においては、需要の変動と不確実性、製造コスト、調達コスト、在庫コスト、および欠品コストを取り入れながら、最適な製品プラットフォーム構成がこれらの要因に依存することを示し、どのように関連しているかを解明したことが主な貢献である。本論文は第1章の序論から始まり、6章で構成されている。

第2章では、製品プラットフォーム構成に関する文献研究を行い、モジュールオプションの統合を行わないときに発生する非効率の問題点など既存研究における問題点を指摘し、需要変動およびその不確実性が製品プラットフォーム構成に与える影響について述べている。

第3章では、開発コストをモデルに含めながら、製品ライフサイクルを通しての生産コストと調達コストを取り入れた製品プラットフォーム構成モデルを提案している。提案モデルではモジュールを統合することも可能にすることで、製品ライフサイクルを通して効率の高い新製品開発戦略を立てられることを示している。また、提案モデルを解くためにSA（simulated annealing)とVNS（variable neighborhood search)を融合したヒューリスティクス解法を開発し、数値実験を通じて提案モデルの有効性を示している。

第4章では、サプライヤーの選択も含めたモデルを提案し、新製品開発戦略をマッチング、冗長、スリム、および混合の4種類に分け、異なる需要のシナリオでは異なる戦略に基づいて製品開発を行うことがより効率的であることを示している。

第5章では、需要予測が困難であるときの新製品開発モデルを提案している。需要の不確実性については複数のシナリオを生成し、確率計画モデルとして定式化を行い、GA（genetic algorithm）アルゴリズムを開発して数値実験を行っている。解法はプラットフォームの構成とマスカスタマイゼーションの2段階で構成されており、それぞれ各シナリオに対応したプラットフォーム構成の最適化、および各製品とプラットフォームの対応関係の最適化が行われている。

第6章では、本研究の成果をまとめ、将来の展望と課題を述べている。

以上を要するに、本論文は需要の変動と不確実性などSCM関連要因を取り入れた最適な製品プラットフォーム構成に関する研究であり、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。

Thesis Abstract

Registration Number	"KOU" No.6005	Name	Yang, Siyuan

Thesis Title

A Study on Intelligent Inter-User Distance Estimation and Antenna Beamforming for HAPS in mmWave mMIMO Communication Systems

The objective of this research is to develop advanced Deep Learning (DL) and Deep Reinforcement Learning (DRL) approaches for improving the accuracy of Inter-User Distance (IUD) estimation and reducing the number of low-throughput users caused by the High Altitude Platform Station (HAPS) movement. To this end, this dissertation first investigates the DL-based approach for solving the IUD estimation problem. Next, this dissertation implements several computational intelligent algorithms and proposes two novel DRL-based approaches for reducing the number of low-throughput users in the HAPS communication system. In addition, considering location information can effectively assist in providing high throughput, we propose a K-Means clustering-based method and a novel Equal Clustering (EC)-aided Deep Q-Network (DQN) to reduce the number of low-throughput users.

In Chapter 1, we introduce the background of MillimeterWave (mmWave) massive Multiple-Input Multiple-Output (mMIMO) communication systems. We discuss two challenge topics: localization and HAPS. In Sec. 1.2 we present several existing works dealing with IUD estimation, an application of localization. In Sec. 1.3, we focus on dynamic antenna control in the HAPS communication system for improving the throughput of users. The relevant works will be presented as well. This chapter also summarizes the scope and contribution of this dissertation.

Chapter 2 tackles a challenging localization task that is very important to enhance the quality of communication and communication services. We use DL and propose a novel fingerprint to address this problem. This novel fingerprint is easily obtained by beam sweeping and includes rich angular information of both two users. Nonetheless, we investigate the possibility of using a super-resolution network to reduce the involved beam sweeping overhead. We evaluate the proposed DNN-based IUD estimation method by using original beam images of resolution 4 × 4, 8 × 8, and 16 × 16. Simulation results show that our method can achieve an average distance estimation error equal to 0.13 m for a coverage area of 60 × 30 m2. Moreover, our method outperforms the state-of-the-art IUD estimation methods that rely on each user's location information.

Chapters 3 and 4 are focuses on the same task: antenna beamforming in the HAPS communication system to reduce the number of low-throughput users. In Chapter 3, we first present the antenna beamforming problem as a Markov Decision Process (MDP) problem. To tackle this MDP problem, we use three conventional RL-based approaches. Besides, we use an Evolutionary Algorithm named Particle Swarm Optimization (PSO) to find the optimal antenna parameters for reducing the number of low-throughput users. However, due to the huge search space and different user distribution scenarios, these approaches are difficult to obtain the optimal solutions. Motivated by this, we develop two novel DRL-based methods: Mean Field DQN (MFDQN) and DRL Evolutionary Algorithm (DRLEA) to search for the optimal solution as much as possible in the limited number of training. We do the simulation under four different user distribution scenarios and consider both HAPS rotation and HAPS shift cases. The simulation results show that the proposed MFDQN and DRLEA have better Cumulative Distribution Function (CDF) of users' throughput than that of conventional RL-based approaches and PSO algorithm under all the user distribution scenarios in HAPS rotation case. In the HAPS shift case, the proposed methods without retraining achieve a CDF of throughput performance comparable to that of the conventional methods. Besides, we compare the convergence between MFDQN and the conventional RL-based methods. The MFDQN shows that it reduces the complexity of the interactions among agents and converges faster than the conventional RL-based methods.

In Chapter 4 we study user location information for assisting in tackling the antenna beamforming problem. Our idea is to first cluster users into several high-density clusters according to the number of antenna arrays. Next, we design antenna parameters based on the geometric model to control beams toward the center of each cluster and cover each cluster separately.
We use a classical K-Means clustering method and design an interesting EC method for clustering users. Moreover, to get a better throughput performance, we use DQN to fine-tune antenna parameters after designing the antenna parameters according to the clustering result of using EC. Under the same simulation settings in Chapter 3, the simulation results show that K-Means, EC, and EC-aided DQN are effective in improving the CDF performance of throughput over the RL-based approach in HAPS with both rotation and shift scenarios. Besides, we evaluate the clustering-based methods in a user movement scenario, we show that the clustering-based approaches can still maintain a high CDF of throughput performance, while the RL-based approach cannot.

Chapter 5 summarizes the thesis, highlighting its key points and contributions therein, and suggesting possible applications of DL and DRL in more complex localization and HAPS scenarios, to revisit the topic of DL and DRL techniques for localization and antenna control in the future.

With the rapid increase of high-quality communication services for a large number of users, deep learning (DL) and deep reinforcement learning (DRL) have been investigated in Millimeter Wave (mmWave) massive Multiple-Input Multiple-Output (mMIMO) communication systems in order to meet the needs of a large number of users. In this dissertation, two challenge topics in fifth-generation (5G) networks are considered: localization and antenna beamforming.

In the first topic, we propose a Deep Neural Network (DNN)-based approach as well as the Super Resolution (SR) techniques to solve the challenging Inter-User Distance (IUD) estimation problem, as the location information of user devices (UEs) plays an increasingly important role in the 5G, 5G and beyond (B5G), and 6G mobile networks. The simulation results show that our method outperforms the state-of-the-art IUD estimation methods that rely on each user's location information.

In the second topic, we discuss the antenna beamforming in the High Altitude Platform Station (HAPS) communication system to reduce the number of low-throughput users whose throughput decreases due to HAPS movement and rotation.

We consider both non-user location information-assisted and user location information-assisted antenna control methods. We first implement four traditional Computational Intelligence (CI) algorithms including an evolutionary algorithm and three Reinforcement Learning (RL) approaches for addressing antenna beamforing problem in the HAPS system: Particle Swarm Optimization (PSO), Q-learning, fuzzy Q-learning, and deep Q-learning (DQN), respectively. Then, we propose two novel DRL-based methods: Mean-Field DQN (MFDQN) and DRL Evolutionary Algorithm (DRLEA).

MFDQN transforms the multiple antenna arrays beamforming problem into a Mean Field Equilibrium (MFE) problem to find solutions that optimize the throughput of all the antenna arrays' coverage.
It uses multiple DQN agents to control each antenna array in a HAPS separately instead of using only a single DQN agent to control multiple antenna arrays to reduce the action search space for each DQN agent.

DRLEA is motivated by an evolutionary algorithm (EA) to overcome the suboptimal solution problem in reinforcement learning when the search space is huge. Simulation results show that both of proposed two DRL-based methods can achieve better Cumulative Distribution Function (CDF) of users' throughput performance than that of the conventional methods in the HAPS rotation cases. In the HAPS shift case, the proposed methods without retraining achieve a CDF of throughput performance comparable to that of the conventional methods.

In addition, we consider using user location information to assist in solving the antenna beamforming problem in HAPS. Based on the number of antenna arrays, we first cluster the users into several clusters with high density, and then we can design the antenna parameters according to the geometric model to make the main lobe towards the center of each cluster to improve the user throughput. In addition to using the classical K-Means clustering method, we also propose a novel Equal Clustering (EC) algorithm. Moreover, to obtain better throughput performance, after EC, we use DQN to fine-tune the antenna parameters to improve the throughput of users. The simulation results show that K-Means, EC and EC-aided DQN are effective in improving the CDF performance of throughput over the RL-based approach in HAPS with both rotation and shift scenarios.

審査の要旨

報告番号	甲　第 6005 号	氏　名	Yang, Siyuan（楊 思源）

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	大槻　知明
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	重野　寛
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	眞田　幸俊
		Nanjing University of Posts and Telecommunications, Ph.D. Guan Gui		

Bachelor (Engineering), Master (Engineering), Yang Siyuan 君提出の学位請求論文は，「A Study on Intelligent Inter-User Distance Estimation and Antenna Beamforming for HAPS in mmWave mMIMO Communication Systems（ミリ波 mMIMO 通信システムにおける知的ユーザ間距離推定と HAPS のためのアンテナビームフォーミングに関する検討)」と題し，全 5 章から構成されている．

ユーザ間距離（IUD ： Inter-User Distance）推定とアンテナビームフォーミングは，ミリ波（mmWave）mMIMO（massive Multiple-Input Multiple-Output)通信システムの 2 つの重要な技術である．本論文では， ミリ波 mMIMO 通信システムにおける IUD 推定と HAPS システムにおけるアンテナビームフォーミングの諸問題を解決するために，深層学習（DL：Deep Learning）に基づく手法を提案している．まず，少ないオーバーヘッドで IUD 推定精度を改善する方法として，超解像（SR：Super Resolution）技術を用いた深層ニューラルネットワーク（DNN：Deep Neural Network）アプローチを提案している．また，HAPS（High Altitude Platform Station）システムにおけるアンテナビームフォーミングの計算量低減と精度改善を達成するために，2 つの新しい深層強化学習（DRL ： Deep Reinforcement Learning）法とイコールクラスタリング（EC ： Equal Clustering）法を提案している．

第 1 章は，序論であり，研究背景として，第 5 世代（5G）mmWave mMIMO 通信システム，位置推定，IUD 推定，HAPS システムにおけるアンテナビームフォーミングの背景と課題について紹介している．

第 2 章では，mmWave mMIMO 通信システムを用いた IUD 推定法として，ビームスイープによって得られるビーム画像を特徴としたフィンガープリントに基づく DNN を用いた IUD 推定法を提案している．提案 IUD 推定法を解像度の異なるビーム画像を用いて評価し，従来 IUD 法よりも小さいオーバーヘッドで高い推定精度を得られることを示している．

第 3 章と第 4 章では，HAPS 通信システムにおけるアンテナビームフォーミングに焦点を当てている．第 3 章では，アンテナビームフォーミング問題をマルコフ決定過程（MDP: Markov Decision Process）問題として定式化している．そして，低スループットユーザ数を低減するためのアンテナビームフォーミングの最適解の探索法として,2 つの新しい DRL ベースの手法，MFDQN（Mean Field DQN)と DRLEA（DRL Evolutionary Algorithm)を提案している．実際のユーザ分布を用いた計算機シミュレーションの結果，提案した DRL ベースの手法は，従来法よりも低スループットユーザ数を低減できることを示している．

第 4 章では，アンテナビームフォーミングの前段階の処理として使用可能な，ユーザの位置情報を用いたクラスタリング法である EC 法を提案している．提案 EC 法は，各セクタのユーザ数ができるだけ等しくなるように，低演算量でクラスタリングできる．計算機シミュレーションの結果，提案 EC 法を前処理として用いたビームフォーミング法は，ユーザが移動するシナリオにおいても，RL ベースの従来法と比較して，スループット特性を改善できることを示している．

第 5 章は結論であり，本研究の総括を述べている．

以上，本論文の著者は，深層学習に基づく IUD 推定法と，深層強化学習に基づくアンテナビームフォーミング法並びにユーザクラスタリング法を提案し，その有効性を確認しており，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6006号	氏　名	川崎　陽祐

主論文題名：

サービスロボットの行動の時空間表現に基づくタスク・モーションプランニング

本論文では，人の生活空間における活躍が期待されるサービスロボットによる円滑なタスク遂行を実現するため，ロボットの機能や環境を有効活用する実行しやすい行動列の計画手法を提案する．実空間を考慮してロボットが現在・未来に実行可能な行動を理解するため，行動に関する記号的な知識や，ロボットのサブシステムの性質や物体集合の幾何情報に基づき，実行可能な行動の時空間的関係を記述する環境表現手法を提案する．そして，タスクをロボットが実現可能な行動の範囲で解釈するため，環境表現と実空間における指標に基づき行動列の内容や順番，実行場所を同時に最適化する手法を提案する．具体的には，実行可能な行動を実空間に埋め込む方法として，実行場所に着目し，エッジを行動の実行，ノードを行動の実行場所とした環境表現であるアクショングラフと，それに基づくロボットナビゲーション手法を提案する．さらに，ロボットと環境の状態から構成される世界状態と実行可能な行動の相互作用を計画問題へ落とし込むため，シーングラフを用いた知識表現に基づく，再帰的多層構造有する世界状態依存アクショングラフと，それに基づくモバイルマニピュレーション計画手法を提案する．また，Human Robot Interaction（HRI）のための人への接近行動に着目し，HRI 行動に重要なセンサ情報とセンサ特性に基づき行動を実空間へ落とし込むためのアクションモデリング手法を提案し，経路計画手法とアクショングラフへの適用方法を提案する．本研究では，移動タスクや物体運搬タスクに提案手法を適用し，実機を用いた実験を通じて有効性を検証する．

第 1 章では，本研究全体の背景と目的，また課題解決の指針を述べた．

第2 章では，ロボットのナビゲーションタスクを対象に，複数の実行可能な行動の時空間的な関係性を記述するアクショングラフの構築アルゴリズムとそれを用いた計画手法について述べ，提案手法の有効性を検証した．

第3 章では，ロボットのモバイルマニピュレーションタスクを対象に，世界状態と行動可能性の相互作用を表現するため，アクショングラフを時間方向へ拡張した世界状態依存アクショングラフの構築アルゴリズムとそれを用いた計画手法について述べ，提案手法の有効性を検証した．

第4 章では，ロボットの HRI 行動のための人への接近行動を対象に，搭載されたセンサを有効活用し HRI 行動を促進する接近行動を実空間に埋め込むためのアクションモデリング手法を述べた．さらに，得たアクションモデルに基づく経路計画手法とアクショングラフの構築手法について述べ，提案手法の有効性を検証した．

第5 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 6006 号	氏　名	川崎　陽祐

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	髙橋　正樹
	副査	慶應義塾大学准教授	工学博士	中澤　和夫
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	今井　倫太
		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）川崎陽祐君提出の学位論文は「サービスロボットの行動の時空間表現に基づくタスク・モーションプランニング」と題し、全 5 章から構成されている。

本論文では、人の生活空間における活躍が期待されるサービスロボットによる円滑なタスク遂行を実現するため、ロボットの機能や環境を有効活用する行動列の計画手法を提案している。実空間を考慮してロボットが現在・未来に実行可能な行動を理解するため、行動に関する記号的な知識や、ロボットのサブシステムの性質や物体集合の幾何情報を実環境中に適度な離散情報として表現し、実行可能な行動の時空間的関係を記述する環境表現手法を提案している。そして、タスクをロボットが実現可能な行動の範囲で解釈するため、環境表現と実空間における指標に基づき行動列の内容や順番、実行場所を同時に最適化する手法を提案している。具体的には、実行可能な行動を実空間に埋め込む方法として、エッジを行動の実行、ノードを行動の実行場所とした環境表現であるアクショングラフと、それに基づくロボットナビゲーション手法を提案している。さらに、ロボットと環境の状態から構成される世界状態と実行可能な行動の相互作用を計画問題へ落とし込むため、シーングラフを用いた知識表現に基づく、再帰的多層構造を有する世界状態依存アクショングラフと、それに基づくモバイルマニピュレーション計画手法を提案している。また、Human Robot Interaction（HRI）のための人への能動的な接近行動に着目し､HRI 行動に重要なセンサ情報とセンサ特性に基づき行動を実空間へ落とし込むためのアクションモデリング手法を提案し、経路計画手法とアクショングラフへの適用方法を提案している。本論文では、移動タスクや物体運搬タスクに提案手法を適用し、移動コストを評価関数とした具体的な設計例を示し，実機を用いた実験を通じて有効性を検証している。

第 1 章では、本研究全体の背景と目的、また課題解決の指針を述べている。

第 2 章では、ロボットのナビゲーションタスクを対象に、複数の実行可能な行動の時空間的な関係性を記述するアクショングラフの構築アルゴリズムとそれを用いた計画手法について述べ、提案手法の有効性を検証している。

第 3 章では、ロボットのモバイルマニピュレーションタスクを対象に、世界状態と行動可能性の相互作用を表現するため、アクショングラフを時間方向へ拡張した世界状態依存アクショングラフの構築アルゴリズムとそれを用いた計画手法について述べ、提案手法の有効性を検証している。

第 4 章では、ロボットの HRI 行動のための人への接近行動を対象に、搭載されたセンサを有効活用し、 HRI 行動を促進する接近行動を実空間に埋め込むためのアクションモデリング手法を述べている。さらに、得たアクションモデルに基づく経路計画手法とアクショングラフの構築手法について述べ、提案手法の有効性を検証している。

第 5 章では結論を示し、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。

以上のように、本論文は、実環境で動作するサービスロボットにおいて、ロボットの機能を最大限に活用し、環境中の人や物体に能動的に働きかけ、ロボットが行動することによる環境の状態の変化を予測しながらロボットの行動を決定する手法を提案し、ナビゲーションタスクに適用し、提案アルゴリズムの有用性を検証している。その成果は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6007号	氏　名	塚田　峰登

主論文題名：

An On-Device Learning-Based Anomaly Detection Approach
for Resource-Limited Edge Devices
（リソースの限られたエッジデバイスのためのオンデバイス学習型異常検知手法）

半教師無し異常検知は，正常データの分布のみを学習し，異常データを検出する手法である。特に誤差逆伝播法（Backpropagation 法）を用いたニューラルネットワーク（以降，BP-NN）ベースの半教師無し異常検知手法は，その高い異常検知精度と頑健性からますます注目を集めている。

典型的なエッジ-クラウドシステムにおいて，BP-NN ベースのモデルは，エッジデバイスから集められた大量のデータを用いてクラウドサーバ上でバッチ学習される。学習処理が終わったらエッジデバイスに重みを送信し，エッジデバイス上では推論処理のみを実行する。しかし，上記システムには次の二点の問題が存在する：（1）BP-NN のバッチ学習にはしばしば長い時間がかかり，コンセプト・ドリフトと呼ばれる正常データの分布の時系列変化への追従が困難であり，（2）クラウド-エッジ間の通信が不可避なため，追加的なエネルギー消費と潜在的なデータ漏えいの危険性を抱える。

上記の問題に対処するため，本論文では ONLAD（ON-device Learning semi-supervised Anomaly Detection）と呼ばれる新しい半教師無し異常検知手法を提案する。ONLAD では，クラウドサーバ上でなく，エッジデバイス上で入力データをオンライン学習することで，瞬時にコンセプト・ドリフトへの追従を実現し，かつクラウドサーバとの通信が不必要なスタンドアロン実行を可能にする。また，本論文では ONLAD を IP コアとして実装した ONLAD Core を提案する。ONLAD Core はリソースの限られたエッジデバイス上で高速な推論処理と学習処理を実現する。

本論文の評価では，ONLAD はコンセプト・ドリフトが発生する環境において，その他の BP-NN を用いたモデルと比較してより高い異常検知精度を有することを示す。また，小規模な FPGA-CPU ボードである PYNQ-Z1 を用いて，ONLAD Core の実機評価を行う。単精度浮動小数点で実装されたソフトウェア実装と比較した結果，ONLAD Core は最大 7.1 倍高速であり，かつ最大 8.1 倍電力効率が高いことを示す。また，ONLAD Core は速度が必要でない場合，PYNQ-Z1 のおよそ 3 分の 1 のサイズである Cora Z7 に実装可能であることを示す。

審査の要旨

報告番号	甲　第 6007 号	氏　名	塚田　峰登

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	松谷　宏紀
	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）	近藤　正章
		慶應義塾大学准教授	博士（理学）	成島　康史

学士（工学）、修士（工学）塚田峰登君の学位請求論文は、「An On-Device Learning-Based Anomaly Detection Approach for Resource-Limited Edge Devices（リソースの限られたエッジデバイスのためのオンデバイス学習型異常検知手法)」と題し、8 章から構成されている。

情報通信技術やセンシング技術の発展によって、身の回りの様々なデバイスがネットワークに繋がるようになっている。そのようなエッジ側デバイスで行う高度な知的処理は、近年、エッジ AI と呼ばれ、盛んに研究されている。一般的なエッジ AI は推論処理に特化し、訓練データの収集や計算に要するコストが大きい学習処理はサーバ上で行うことが多い。一方で、本論文ではエッジ AI における周囲の環境変化に着目し、計算リソースが制限されたエッジデバイス上でニューラルネットワークの学習を行う技術を探求した。本論文ではこれをオンデバイス学習技術と称し、主としてエッジデバイス向けの異常検知タスクに応用した。本論文で提案しているオンデバイス学習技術は、従来のニューラルネットワークの逐次学習アルゴリズム、教師無し異常検知手法、軽量な忘却機構を組み合わせたものである。また、本論文ではオンデバイス学習の計算コストを低く抑えることによって、小規模 FPGA（Field-Programmable Gate Array）を対象にオンデバイス学習アルゴリズムを専用回路モジュールとして実現している。オンデバイス学習技術の拡張として、データの多峰性への対処や固定小数点形式を想定したデータフォーマットの最適化も行っている。さらに、オンデバイス学習技術を Raspberry Pi Pico と呼ばれるシングルボードコンピュータで構成される無線センサノードに応用し、異常検知タスクを対象に従来技術と比較し、オンデバイス学習技術の優位性を検証している。本論文は上記の内容をまとめたものである。

具体的には 1 章では、まず、本論文の背景や本論文の構成を述べている。2 章ではオンデバイス学習の前提技術として、ニューラルネットワークの逐次学習アルゴリズムや教師無し異常検知手法を紹介したうえで、オンデバイス学習アルゴリズム ONLAD（ON-device Learning semi-supervised Anomaly Detection）を提案している。一般的な深層ニューラルネットワークなど従来手法と計算コストや異常検知精度の点で比較し、とくに入力データの傾向が変化するような状況において優位性があることを確認している。3 章ではデータの多峰性に対処するために ONLAD による異常検知器を複数個用いた手法を提案している。4 章では小規模 FPGA を対象に ONLAD アルゴリズムを専用回路モジュール（ONLAD コア）として実装し、ONLAD アルゴリズムはハードウェア化に向いていることを実証している。5 章では ONLAD コアの更なる高効率化のために、回路内部で使用している固定小数点フォーマットの最適化手法を提案している。6 章では ONLAD アルゴリズムを Raspberry Pi Pico をベースとする無線センサノードに応用し、実際のアプリケーションとして回転機械の異常検知に応用している。エッジ側で学習することによる通信エネルギーの削減効果についても確認している。7 章ではエッジ AI に関する関連研究を広く調査し、エッジ AI に関する研究分野におけるオンデバイス学習の立ち位置を再確認している。8 章では本論文で提案した各種要素技術とその貢献についてまとめている。

以上、要約すると、塚田君の博士論文は、計算リソースの限られたエッジデバイスにおいて、周囲の環境変化に応じてエッジ側で学習するうえで重要となるいくつかの問題を解決し、その実用化に貢献した点で、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6008号	氏　名	森　康祐

主論文題名：

Tracking and Fast Handover Mechanisms Using Station Identification for Ground-to-Train Free-Space Optical Communication
（地上列車間自由空間光通信における装置識別を用いた追尾と高速ハンドオーバ手法）

近年，高速列車の車内でインターネットを利用する要望が高まっている．列車内では携帯電話などのモバイル端末が利用可能だが，高速列車では Wi-Fi 通信によるインターネットへのブロードバンド通信回線を乗客に提供することが望ましい．漏えい同軸ケーブル，Wi-Fi，WiMAX，LTE-R など既存の地上列車間通信技術のスループットが数十 Mbps であるのに対し，高速列車への要求スループットは 2030 年には 11～35Gbps に達すると言われている．移動体との通信にミリ波を利用する研究でも，現状ではスループットが 10Gbps 以下である．

このような高スループットの地上列車間通信の要求に応えるため，自由空間光通信技術が注目されている．地上列車間光通信では，列車に搭載された移動局は鉄道沿線に設置された地上局を追尾しながら通信を行い，移動局が対応する地上局を切り替え（ハンドオーバ）ながら列車を走らせる．既存研究として LaserTrainComm2012（LTC12）と呼ばれるシステムが提案されている．LTC12 ではビーコン光とミラーアクチュエータを用いて通信相手を追尾する．時速 60km で L2 ハンドオーバー時間は約 40s であった．

本論文の主な貢献は 4 つである．1 つ目は LaserTrainComm2014（LTC14）と呼ばれる改良されたシステムにおける追尾時間の短縮である．LTC14 ではカメラの画像認識による粗追尾と QPD（Quadrant Photo Diode）による精追尾を組み合わせることで高速かつ高精度なトラッキングを実現する．その結果，時速 60km での L2 ハンドオーバー時間は約 21ms となった．しかし LTC14 はミラーアクチュエータのアナログ制御による不安定なトラッキング，大型ミラーの慣性によるオーバーシュート，基地局ごとに識別ができないなどの課題があった．そこで 100Mbps の通信装置を搭載した LaserTrainComm2022（LTC22）という新しいシステムを開発した．2 つ目の貢献はミラーアクチュエータをデジタル制御することで追尾精度とハンドオーバー速度を向上させたことである．3 つ目の貢献は大型ミラーを送信用と受信用の小型ミラーに分離することでハンドオーバー直後の通信品質を安定化させたことである．最後の貢献として 2PPM（Pulse position modulation）により装置 ID をビーコン光に符号化し基地局を識別している．広視野と狭視野の画像を同時に取得できるデュアルポートカメラを用いて粗追尾と精追尾を行った．ビーコン光の点滅は広視野画像でビーコン光の強度を，狭視野画像で装置 ID を検出できるように制御されている．

車両用テストコースで L2 ハンドオーバー時間とハンドオーバー時の TCP スループットを測定した．移動局として LTC22 を 1 台車に搭載し，2 台の LTC を地上局として 30m 離れた道路上に設置した．時速 40km で走行した場合，L2 ハンドオーバー時間は約 1ms だった．TCP スループットはハンドオーバー前後で約 94Mbps，ハンドオーバー時のみ 75～77Mbps に低下した．解析の結果，時速 300km や 500km の速度でも追尾とハンドオーバーが可能であることが示された．ハンドオーバー時間は通信装置のスループットに影響されないため，通信装置のスループットが 10Gbps 以上であっても L2 ハンドオーバー時間は 1ms である．

審査の要旨

報告番号	甲　第 6008 号	氏　名	森　康祐

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	寺岡　文男
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	重野　寛
		慶應義塾大学准教授	博士（情報理工学）	金子　晋丈
		慶應義塾大学教授	Ph. D.	春山　真一郎

修士（工学）森康祐君提出の学位請求論文は「Tracking and Fast Handover Mechanisms Using Station Identification for Ground-to-Train Free-Space Optical Communication（地上列車間自由空間光通信における装置識別を用いた追尾と高速ハンドオーバ手法)」と題し全 6 章から構成される．

近年，高速列車内でのインターネット利用への要望が高まっている．列車内では携帯電話などが利用可能だが，高速列車内に設置した Wi-Fi 通信によるインターネットへのブロードバンド通信を乗客に提供することが望ましい．漏洩同軸ケーブル，Wi-Fi，WiMAX，LTE-R など既存の地上列車間通信技術のスループットが数十 Mbps であるのに対し，新幹線 1 編成あたりに必要なスループットは 2030 年には 11〜35 Gbps に達すると推測される．移動体との通信にミリ波を利用する研究でも，現状ではスループットが 10 Gbps 以下である．このような高スループットの地上列車間通信の要求に応えるため，自由空間光通信技術が注目されている．地上列車間光通信では，列車に搭載された移動局と線路沿いに設置された地上局は互いを追尾しながら通信し，列車の走行により移動局は通信相手となる地上局を切り替える（ハンドオーバ）ことが要求される．

第 1 章は本論文の序章であり，本研究の背景，目的，貢献についてまとめている．

第 2 章は自由空間光通信の関連研究と地上列車間光通信システムの既存研究である LaserTrainComm2012 (LTC12)についてまとめている．LTC12 はビーコン光とミラーアクチュエータを用いて通信相手を追尾する．時速 60 km で Layer-2 ハンドオーバ時間は約 40 ms であった．

第 3 章は LaserTrainComm2014(LTC14)のシステム開発について述べている．LTC14 はカメラの画像認識による粗追尾と QPD (Quadrant Photo Diode)による精追尾で高速かつ高精度なトラッキングを実現する．その結果，時速 60 km でのハンドオーバー時間は約 21 ms となった．しかし LTC14 はミラーアクチュエータのアナログ制御による不安定なトラッキング，大型ミラーの慣性によるハンドオーバ時のオーバシュート，基地局ごとの識別ができないなどの課題があった．

第 4 章は 100 Mbps の通信装置を搭載した LaserTrainComm2022 (LTC22)のシステム開発について述べている．LTC22 ではミラーアクチュエータをデジタル制御することで追尾精度とハンドオーバ速度を向上させた．また大型ミラーを送信用と受信用の小型ミラーに分離することでハンドオーバ直後の通信品質を安定化させた．基地局を識別するために 2PPM (Pulse Position Modulation)により装置 ID をビーコン光に符号化した．広視野と狭視野の画像を同時に取得できるデュアルポートカメラを用いて粗追尾と精追尾を行った．車両用テストコースで基地局を 30 m 間隔で設置し，Layer-2 ハンドオーバ時間とハンドオーバ時の TCP スループットを測定した．時速 40 km で走行した場合，ハンドオーバ時間は約 1 ms だった．TCP スループットはハンドオーバ前後で約 94 Mbps，ハンドオーバ時のみ 75〜77 Mbps に低下した．

第 5 章は将来 10 Gbps の通信装置を採用し，基地局を 300 m 間隔で設置する前提で LTC22 の実際の列車環境への適性について検討している．ハンドオーバ間隔は実環境と本論文の実験でほぼ変わらないことを示している．またハンドオーバ前に装置 ID の復調に要する時間，追尾が停止するが，リニアモータカーの速度 500 km/h であっても通信切断が発生しないことを示している．

第 6 章は本論文の結論であり，論文を総括するとともに地上列車間自由空間光通信システムの必要要件と本論文での貢献について述べている．

以上，本論文は地上列車間光通信システムの開発と屋外での計測を通して LTC22 が安定した追尾，高速ハンドオーバ，通信装置の識別が可能であることを明らかにした．以上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6009号	氏　名	村上　正樹

主論文題名：

Reconfigurable hardware slice network architecture
for service transport and data center network
（サービストランスポートネットワークとデータセンターネットワークに向けた
再構成可能ハードウェアスライスネットワークアーキテクチャ）

Beyond 5G 時代では今まで以上に多様なサービスが、それぞれの要件に応じた品質のネットワークを要求することが想定される。従来はエッジルーターのハードウェアを多機能にすることで、多様なサービスを収容していた。しかし、半導体性能の限界やサービス専用のネットワークをそれぞれ構築した場合においては設備コストが問題となった。

そこで、我々は再構成可能ハードウェアを光ネットワークにより接続し、ネットワークスライスを構築する VPON (Virtual Packet Optical Node)の実現を目指している。VPON はリソースプールとして保持しているハードウェアをサービスに割り当て、要件に応じてハードウェアの機能を再構成する。そのため、ハードウェアはサービスに必要な機能のみを提供するため、リソースを効率よく利用でき、さらに、同一の物理ネットワーク上でハードウェアにより分離された論理ネットワークを構築するため、設備コストの課題も解決できる。

VPON 実現に向けた主な課題として再構成可能ハードウェアスライスを構築するためのアーキテクチャの検討がある。サービスに適したハードウェア資源を確保するためには、物理的位置・ハードウェア性能・提供中のサービスと機能を識別する必要がある。そこで本論文では、VPON に流入したパケットに、これらを識別可能なアドレスを格納した SRv6 (Segment Routing IPv6) ヘッダを付与し、ネットワーク内でサービスに必要な機能を自律的に提供する方式を提案する。更に、サービス要求やネットワーク状態に応じてリアルタイムに資源を調停するために生体制御アルゴリズムに基づいて準最適解を導出する生物学的手法を導入した資源調停手法を提案する。

また、再構成可能ハードウェアスライスの活用は DCN (Data Center Network)にも期待される。我々は OCS (Optical Circuit Switching)スライス、OSS (Optical Slot Switching)スライス、EPS (Electrical Packet Switching)スライスから構成される省電力 DCN を提案している。OSS や OCS はスイッチング消費電力がトラヒック量に依存しないため、高い省電力効果を得るためにはフローサイズや継続時間に応じて適切なスライスに収容するがある。従来のフロー分類手法では特定の時間帯に合わせてフロー分類を調整すると、トラヒック特性が変化した場合に、適切なスライスに収容できないフローが増加する問題が存在した。そこで、本論文では高い省電力効果を維持するために、フロー分類をトラヒックの動的な状況に応じて調整する手法を提案する。

本論文では以下のように構成される。第１章では Beyond 5G 時代のサービスに触れながら、本論文の目的を明確化する。第２章では VPON のコンセプトを述べ、関連研究を紹介する。第３章では再構成可能ハードウェアスライスを構築するアーキテクチャと資源調停手法の提案を行う。提案手法により 1000 以上のスライスをリアルタイムに調停可能であることをシミュレーションで示す。更に、提案アーキテクチャに従って VPON プロトタイプシステムを構築し、実現可能性を検証する。第４章では再構成可能ハードウェアスライシング技術を省電力 DCN に適用し、フロー特性の変化に対応可能なフロー分類手法の提案とシミュレーション結果を示す。最後に、第 5 章において本アーキテクチャは次世代の多様なサービスを提供可能であることを結論として述べる。

審査の要旨

報告番号	甲　第 6009 号	氏　名	村上　正樹

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	工学博士	山中　直明
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	重野　寛
		慶應義塾大学教授	工学博士	天野　英晴
		京都大学教授	博士（工学）	大木　英司
		University of Texas at Dallas	Ph.D. in Electrical Engineering	Andrea Fumagalli

学士（工学），修士（工学）村上正樹君の学位請求論文は，「Reconfigurable hardware slice network architecture for service transport and data center network（サービストランスポートネットワークとデータセンターネットワークに向けた再構成可能ハードウェアスライスネットワークアーキテクチャ）」と題し，全 5 章から構成される．

Beyond 5G 時代では今まで以上に多様なサービスが，それぞれの要件に応じた品質のネットワークを要求することが想定される．従来はエッジルーターのハードウェアを多機能にすることで，多様なサービスを収容していた．しかし，半導体性能の限界やサービス専用のネットワークをそれぞれ構築した場合においては設備コストが問題となっていた．

本論文では上記の問題を解決するため，再構成可能ハードウェアを光ネットワークにより接続し，ネットワークスライスを構築する VPON (Virtual Packet Optical Node)を提案した．VPON では光ネットワークにより帯域や距離の制限を減らし，ネットワーク内の計算リソースをリソースプールとして保持する．要求されたサービスに応じてハードウェアをサービスに割り当て，要件に応じてハードウェアの機能を再構成する．そのため，ハードウェアはサービスに必要な機能のみを提供することによりリソースを効率よく利用でき，さらに，同一の物理ネットワーク上でハードウェアにより分離された論理ネットワークを構築することで設備コストの課題も解決できる．本論文では VPON アーキテクチャの提案のみでなく，応用としてサービストランスポートネットワークと DCN (Data Center Network) への適用を示した．

VPON アーキテクチャでは，ハードウェアに付与するアドレスフォーマットの定義とハードウェア間の接続方式に関する提案が行われており，サービスに特化した性能を持つスライスの構築を可能にした．更に，他企業・他大学と連携して構築した VPON のプロトタイプを利用した実験を行うことにより，VPON アーキテクチャの実現可能性を示した．

VPON のサービストランスポートネットワークへの適用においては，サービスが競争的に VPON の資源を獲得するため，収容可能の高い資源管理が重要である．そこで本論文では生体制御アルゴリズムに基づく資源調停手法を提案することにより，サービス要求やネットワーク状態に応じた動的な資源管理を可能にしている．コンピューターシミュレーションでは，資源調停手法導入によりサービス収容能力の向上を示している．更に，提案手法を導入した PoC (Proof of Concept) を構築し，スライス構築に関する実験を行うことで，提案手法の VPON への適用可能性を示している．

VPON の DCN への適用においては，省電力なネットワーク構築が重要である．しかし，既存の DCN における省電力化機能は DCN のトラヒック特性が変化すると省電力効果が劣化する課題が存在した．そこで本論文では動的機能調整手法を導入した省電力なスライス構築を提案している．本手法は，実際の DCN で収集したトラヒックの分析を行い，トラヒックの特性と最大限に省電力な機能設定の関係性を明らかにした上で提案されており，DCN におけるトラヒック特性の変化に対して動的な機能調整を可能にしている．コンピューターシミュレーションではトラヒック特性が変化しても高い省電力効果を維持できる DCN の実現性を示した．

以上要するに，本論文は独自の要件を持つ多様なサービスの収容が可能なスライシング技術の確立のために，再構成可能ハードウェアスライスネットワークアーキテクチャの提案をし，さらに，応用としてサービストランスポートネットワークにおける高効率なサービス収容を可能にする資源調停手法および省電力 DCN を実現する動的機能調整手法の提案を行っている．これらの研究内容は，継続的に発展し続けるネットワークサービスを提供可能な，将来の社会インフラストラクチャとしてのネットワークを実現する上で，工学上寄与する所が大きいと評価される．

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6010号	氏　名	小澤　岳大

主論文題名：

Motion Estimation Algorithms Adaptive to the Sparse and Asynchronous Nature of Event Camera Outputs
（イベントカメラ出力の疎性・非同期性に適応したモーション推定アルゴリズム）

カメラやセンサによる自己モーション推定は、ロボットや自動車等のシステムが自律的に動くために重要な技術である。特に、イベントカメラと呼ばれる高い時間分解能を持つカメラは、これまでのカメラで不可能であった状況におけるモーション推定を可能にするとして注目されている。しかし、既存の手法の一つである Contrast Maximization（CMax）には、2 つの重大な問題が存在する：（1）目的関数が複数の極値を持ち、推定に失敗する“Event collapse”を起こしてしまう。（2）計算量が多く、高頻度なモーション推定が難しい。

本論文ではまず、CMax において大きな問題となる“Event collapse”を防ぎ、車載イベントカメラのモーション推定における精度と速度を向上させる手法を提案する。Event collapse とは、CMax を用いた 3 次元モーション推定時、目的関数が複数の極値を持ち、正しい推定が難しくなってしまうという問題である。この問題を解決するため、提案手法では、イベントカメラの設置位置から計算されるホモグラフィを用いてイベントデータを変換することで、3 次元のモーション推定問題を 2 次元のモーション推定問題へ落とし込む。実験を通して、提案手法は目的関数を凸関数へ変換し、車両運動推定の精度と速度を向上できることを実証した。

本論文ではさらに、再帰的な推定によって 2 次元モーション推定時の計算量を削減する手法、R-CMax を提案する。CMax を用いたモーション推定は計算量が大きく、特に高頻度な推定が難しくなってしまうという問題がある。そこで提案手法では、再帰的に更新可能な「圧縮イベント」を導入することで、この問題を解決する。複数のイベントを 2 つの「圧縮イベント」のみで近似することで、効率的にモーション推定を更新することができる。実験により、提案手法は既存手法と同等の精度を維持しつつ、計算量を削減できることを示した。また、実際のイベントカメラを用いた実験により、提案手法は従来のカメラでは不可能であった高速な運動推定が可能であることを示した。

審査の要旨

報告番号	甲　第 6010 号	氏　名	小澤　岳大

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
	慶應義塾大学専任講師	博士（工学）	五十川　麻理子
	奈良先端科学技術大学院大学准教授	博士（工学）	内山　英昭

学士（工学）、修士（工学）小澤　岳大君提出の学位請求論文は、「Motion Estimation Algorithms Adaptive to the Sparse and Asynchronous Nature of Event Camera Outputs（イベントカメラ出力の疎性・非同期性に適応したモーション推定アルゴリズム）」と題し、5 章で構成されている。

イベントカメラは、一定間隔の時刻毎に全画素値を同時に出力する通常のカメラとは異なり、画素値に変動があった時刻とその画素位置をイベントデータとして出力するため、超高速現象をセンシングできる次世代のカメラとして注目されている。イベントデータからの動き推定法としてコントラスト最大化法（CMax 法）が知られているが、目的関数が複数の極値を持つことに起因する「イベント崩壊現象」により動き推定に誤りが生じてしまう問題と、動き推定に必要な過去のイベントデータによる計算量が膨大になるという問題があった。本論文では、これらの課題を解決するための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、イベントカメラの概要とそれを用いた動き推定法である CMax 法の原理と問題点について述べ、本論文の目的を述べている。

第 2 章では、イベントカメラによる動き推定法や SLAM（環境マップとカメラ位置同時推定法）に関する関連研究と、特に本論文で扱う動き推定法である CMax 法やその拡張手法の関連研究についてのサーベイが示されている。

第 3 章では、CMax に基づく動き推定手法における問題点である「イベント崩壊現象」を防止し、動き推定の頑健性と高速性を向上させる手法を提案している。本手法では、車載カメラのようにイベントカメラが走行路面に対して一定の位置と姿勢となっている状況を想定し、この位置姿勢から計算されるホモグラフィを用いてイベントデータの画像中の位置を鳥観変換することで、3 次元動き推定問題を 2 次元動き推定問題に帰着させることにより、目的関数が持つ複数の極値を低減するものである。これによって、車載イベントカメラを模擬したデータの動き推定を行った結果、提案手法により動き推定の精度と計算速度を向上できることを示している。

第 4 章では、再帰的動き推定により計算量を削減した CMax 法として、再帰的 CMax (R-CMax) 法を提案している。提案手法は、複数のイベントを近似した「圧縮イベント」を導入し、動き推定に圧縮イベントを再利用することで再帰的動作推定を可能とし、既存手法の課題であった計算量の削減を実現している。提案手法を用いた実験により、既存手法と比較して計算量が削減可能であり、さらに動き推定精度も向上できることを確認した。また、実際のイベントカメラを用いた実験により、従来のカメラでは不可能であった高速な運動推定が可能であることを示している。

最後に第 5 章では本論文で得られた成果と結論をまとめ、本論文で提案したイベントカメラ出力データの疎性・非同期性に適応した動き推定技術に関する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、イベントカメラによる動き推定のための新たな方法を提案し、提案手法が従来の CMax 法の問題点であった「イベント崩壊現象」による動き推定の誤りや、動き推定のための計算量を削減することが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。