

2021（令和3）年度 秋 学 期

博 士 （工 学） 学 位 論 文
博 士 （理 学）

論文の内容の要旨および論文審査の結果の要旨

慶應義塾大学理工学部

目 次

岩本 大輝	人的資本マネジメントの評価と効果に関する研究	1
谷 智行	ナノ多孔対中ヘリウム4の超流動転移における4次元XY量子臨界性	3
鈴木 哲平	Convolutional Neural Networks with Superpixels : Toward Detail-Preserving Image Segmentation (スーパーピクセルを利用した畳み込みニューラルネットワーク: 詳細情報を保持した画像分割に向けて)	6
銅冶 祐司	非自航作業船に用いられる矩形船体の横転・安定性・強度に関する研究	8
安部 義隆	Mechanical Motion Oscillator Based on Energy/Phase Control for Legged Robots (脚式ロボットのためのエネルギー／位相制御に基づく機械運動発振器)	10
加藤 広野	A Study on Machine Learning Based Detection of Android Malware and Stego Images (機械学習に基づいたAndroidマルウェアとステゴ画像の検知に関する研究)	12
橋本 悠香	Krylov Subspace Methods for Functions of Operators and Action of Operators on Vectors (作用素の関数及びベクトルへの作用に関するKrylov部分空間法)	14
川原 遼太	ヒトがん細胞の血管擬態における細胞表面受容体の役割解析	16
森 研人	糖転移酵素を介したタンパク質糖鎖修飾の新規機能解析	18
真辺 幸喜	異核Feshbach共鳴を有するBose-Fermi混合原子気体における強相関量子多体現象の理論研究	20
洞口 泰輔	ホモダイン検波法によるスピントルク検出の高精度化に関する研究	22
西村 健太郎	回転するバリオン物質におけるトポロジカル項と π^0 中間子と η' 中間子のカイラルソリトン格子状態	24
板井 駿	Self-standing in vitro multi-layered blood vessel model reproducing immunological tissue deformation (免疫応答による組織変形を再現した自立型多層人工血管モデル)	26
柵木 光	陽極酸化ナノチューブアレイと半導体ナノ粒子との複合体形成および気相光触媒水素生成	28
長友 竜帆	触対象の物理特性とヒトの触覚認知情報統合のための触覚データマイニング	30
松村 善洋	次世代高速鉄道のための無線通信システムに関する研究	32
霧生 拓也	フォワードルッキングなリターン分布の資産運用への応用	34
本田 裕	深層学習を用いた一階述語論理による推論に関する研究	36
Xu, Kangqian (徐 康乾)	Identification of Maximum Inter-Story Drift of Multi-Degree-of-Freedom Shear Structures Using Only One Accelerometer (1つの加速度計のみを使用した多自由度せん断構造物の最大層間変形角の同定)	38
角 晴美子	Proposal and Verification of Improvement Measures to Raise Operational Efficiency in Distribution Centers (物流センターの作業効率の向上に向けた改善方策の提示とその性能検証)	41
赤星 太一	網羅的Ca ²⁺ イメージングから明らかにされたホヤ初期発生における運動神経細胞の役割	43

田中 智樹	ノイズがある量子振幅推定法の解析と実験	45
森本 圭彦	キノリノフラトロジウム触媒を用いたアルキン類のアミンとの新規カップリング反応の開発に関する研究	47
北村 貴士	次世代型光線力学療法を指向した刺激応答型光感受性分子の創製	49
中路 紘平	Noisy intermediate-scale quantum computation and its application (ノイズあり中規模量子計算とその応用)	51
秋山 真那斗	Development of RNA informatics for RNA sequence and structure analysis (RNA配列と構造解析のためのRNAインフォマティクスの構築)	53
Rathnayake Mudiyansele, Maheshi Ruwanthika (ラタナヤカ ムディヤンセラゲ, マヘシ ルワンティカ)	Excess Force Reduction in Bilateral Control for Precise and Safe Operation (精密かつ安全な操作のためのバイラテラル制御における超過力低減)	55
長南 友太	Investigation of the Mechanism for Emergence of Spatial Heterogeneity of Invading Glioblastoma Cells in the Presence of Perivascular Factors (浸潤するグリオブラストーマ細胞の空間的な不均一性が血管周辺要素の存在下で出現するメカニズムの研究)	57
Triana, Yunita (トゥリアナ, ユニタ)	Application of Boron Doped Diamond Electrodes to Electrochemical Gas Sensors (ホウ素ドーパダイヤモンド電極の電気化学ガスセンサーへの応用)	59
幡井 亮介	大容量光信号伝送に向けたポリマー導波路型光結合デバイスの設計と作製	61
森倉 峻	変動する機械的圧縮刺激に対するメラノーマ細胞の応答性に関する研究	63
田脇 裕太	Modeling and Analysis for Stability Evaluation of Quiet Standing Posture (静止立位姿勢の安定性評価のためのモデリングと解析)	65
渡邊 大記	Separating Transport Policy and Mechanism in Network Protocol Layering by Inserting New Layer-5 (ネットワークプロトコルレイヤリングにおいてLayer-5挿入による通信の転送ポリシーと転送メカニズムの分離)	67
近藤 賢郎	ZINK: A Scalable and Secure Information Centric Networking Mechanism Utilizing Layered Network Architecture (ZINK: 階層型アーキテクチャに基づくスケーラブルで安全なInformation Centric Networking機構)	69
鶏内 朋也	Human Motion Capture Based on Geometric Consistency Using Visual and Inertial Sensors (視覚センサと慣性センサを用いた幾何学的整合性に基づく人体動作推定)	71
富所 拓哉	Propagation of Laminar Premixed Flames with Equivalence Ratio Gradient across the Flame Front (火炎面に垂直な当量比勾配を伴う層流予混合火炎の伝播)	73
中村 文彦	Embedded Facial Surface Sensing and Stimulation: Toward Facial Surface Interaction in Virtual Environment (バーチャル環境におけるフェイシャルサーフェスインタラクションに向けた組込型顔表面計測・刺激に関する研究)	75
澤田 大智	刺激応答性部位を有する両親媒性化合物が形成する超分子集合体の相転移	77
難波江 佑介	Drag Reduction Effect by Traveling Wave-Like Wall Deformation in Turbulent Channel Flow (チャネル乱流における進行波状壁面変形による抵抗低減効果)	79
寺島 康平	自然環境に調和した太陽エネルギー利用を可能とするPV/Tソーラーパネルに関する研究	81
Trabelsi, Abir (トラベルシ, アビル)	Risk Management in Supply Chain Contracts (サプライチェーン契約におけるリスクマネジメント)	83
遠藤 克浩	機械学習と量子コンピュータによる分子シミュレーションを用いた研究開発の高効率化	85

論文の要旨および審査結果の要旨

本報は、学位規則(昭和28年4月1日文部省令第9号)第8条による公表を目的として、本大学において2021(令和3)年度秋学期に博士の学位を授与した者の論文内容の要旨および論文審査の結果の要旨である。収録したものは次のとおり。

慶應義塾大学理工学部

学位の種類	学位記号・番号	授与年月日	氏 名
博士(工学)	甲 第 5656 号	令和 3 年 10 月 13 日	岩本 大輝
博士(理学)	甲 第 5665 号	令和 3 年 12 月 8 日	谷 智行
博士(工学)	甲 第 5666 号	令和 4 年 3 月 23 日	鈴木 哲平
博士(工学)	甲 第 5675 号	令和 4 年 3 月 23 日	銅冶 祐司
博士(工学)	甲 第 5676 号	令和 4 年 3 月 23 日	安部 義隆
博士(工学)	甲 第 5677 号	令和 4 年 3 月 23 日	加藤 広野
博士(理学)	甲 第 5692 号	令和 4 年 3 月 23 日	橋本 悠香
博士(理学)	甲 第 5693 号	令和 4 年 3 月 23 日	川原 遼太
博士(理学)	甲 第 5694 号	令和 4 年 3 月 23 日	森 研人
博士(理学)	甲 第 5695 号	令和 4 年 3 月 23 日	真辺 幸喜
博士(理学)	甲 第 5696 号	令和 4 年 3 月 23 日	洞口 泰輔
博士(理学)	甲 第 5697 号	令和 4 年 3 月 23 日	西村 健太郎
博士(工学)	甲 第 5698 号	令和 4 年 3 月 23 日	板井 駿
博士(工学)	甲 第 5699 号	令和 4 年 3 月 23 日	柵木 光
博士(工学)	甲 第 5700 号	令和 4 年 3 月 23 日	長友 竜帆
博士(工学)	甲 第 5701 号	令和 4 年 3 月 23 日	松村 善洋
博士(工学)	甲 第 5702 号	令和 4 年 3 月 23 日	霧生 拓也
博士(工学)	甲 第 5703 号	令和 4 年 3 月 23 日	本田 裕
博士(工学)	甲 第 5704 号	令和 4 年 3 月 23 日	Xu, Kangqian (徐 康乾)
博士(工学)	甲 第 5705 号	令和 4 年 3 月 23 日	角 晴美子
博士(理学)	甲 第 5738 号	令和 4 年 3 月 23 日	赤星 太一
博士(工学)	甲 第 5739 号	令和 4 年 3 月 23 日	田中 智樹
博士(理学)	甲 第 5740 号	令和 4 年 3 月 23 日	森本 圭彦
博士(工学)	甲 第 5741 号	令和 4 年 3 月 23 日	北村 貴士
博士(工学)	甲 第 5742 号	令和 4 年 3 月 23 日	中路 紘平
博士(理学)	甲 第 5743 号	令和 4 年 3 月 23 日	秋山 真那斗

学位の種類	学位記号・番号	授与年月日	氏 名
博士(工学)	甲 第 5744 号	令和 4 年 3 月 23 日	Rathnayake Mudiyanseleage, Maheshi Ruwanthika (ラタナヤカ ムディヤンセラゲ, マヘシ ルワンティカ)
博士(工学)	甲 第 5745 号	令和 4 年 3 月 23 日	長南 友太
博士(工学)	甲 第 5746 号	令和 4 年 3 月 23 日	Triana, Yunita (トゥリアナ, ユニタ)
博士(工学)	甲 第 5747 号	令和 4 年 3 月 23 日	幡井 亮介
博士(工学)	甲 第 5748 号	令和 4 年 3 月 23 日	森倉 峻
博士(工学)	甲 第 5749 号	令和 4 年 3 月 23 日	田脇 裕太
博士(工学)	甲 第 5750 号	令和 4 年 3 月 23 日	渡邊 大記
博士(工学)	甲 第 5751 号	令和 4 年 3 月 23 日	近藤 賢郎
博士(工学)	甲 第 5752 号	令和 4 年 3 月 23 日	鶏内 朋也
博士(工学)	甲 第 5753 号	令和 4 年 3 月 23 日	富所 拓哉
博士(工学)	甲 第 5754 号	令和 4 年 3 月 23 日	中村 文彦
博士(工学)	甲 第 5755 号	令和 4 年 3 月 23 日	澤田 大智
博士(工学)	甲 第 5756 号	令和 4 年 3 月 23 日	難波江 佑介
博士(工学)	甲 第 5757 号	令和 4 年 3 月 23 日	寺島 康平
博士(工学)	甲 第 5758 号	令和 4 年 3 月 23 日	Trabelsi, Abir (トラベルシ, アビル)
博士(工学)	甲 第 5759 号	令和 4 年 3 月 23 日	遠藤 克浩

内容の要旨

報告番号	甲 第 5656 号	氏 名	岩本 大輝
主 論 文 題 名：			
人的資本マネジメントの評価と効果に関する研究			
21 世紀に入り、先進諸国の収益源は、有形資産から目には見えない無形資産へ移行している。それにより、無形資産の中で最も重要な要素の 1 つである人的資本も重要となった。人的資本マネジメントに関しては、労働時間・働き方改革・労働生産性などの観点から、昨今ニュースで多く取り上げられており、元来、人的資本マネジメントが評価しづらい点と混合し経営上の大きな課題となっている。したがって、本論は、人的資本の評価と効果について提案・実証を行い、人的資本マネジメント戦略意思決定の一助となる知見の獲得を目指す。 本論では、まず、人的資本マネジメントの貢献を含む評価指標として人的調整済み付加価値(Personnel adjusted added value :PAV)を提案・検証する、次に、人的資本が企業に与える影響や人的資本の活躍を促す施策など人的資本にまつわる効果・影響関係を調査する。 PAV の提案・検証では、付加価値の考え方をを用いて、人的資本マネジメントを含むマネジメントの定量的な評価指標 (PAV) を提案する。また、PAV に重回帰分析を行うことで企業のマネジメント効率を明らかにする。管理指標が、将来の業績と関連がみられるかどうかは重要である。そこで、階層線形モデリングによって将来業績と PAV の関係性を確認し、一般的な付加価値と比較することで、PAV が管理指標として有効であるかの評価を行う。 人的資本にまつわる効果・影響関係調査では、まず、人的資本・社会的責任活動・財務業績の関係を検証する。企業の経営戦略において、人的資本と企業の社会的責任 (CSR) の重要性が高まっている。そこで、人的資本・CSR 活動・企業業績の 3 要素の影響関係を分析する。これらの要素を計量心理的アンケートでなく、客観的に与えることができる指標のみから構成すると、分析における尺度の問題が発生するが、ベジアン SEM を用いることで解決する。 最後に、マネジメント施策が人的資本に与える影響を調査するため、ワーク・ライフ・バランス施策と女性活躍の関係を検証する。日本における人的資本・人的資本マネジメントの課題として女性管理的職業従事者割合が世界と比して極めて低い点がある。この課題の要因としてワーク・ライフ・バランス(WLB)問題がある。企業は WLB 支援施策の採用を検討しているが、施策が階級別女性比率に与える影響や施策間の影響関係が不明瞭であり、検討困難な現状がある。そこで、WLB 施策の組合せ効果や施策間関係が女性活躍に与える影響に注目し、ベジアンネットワーク分析を行い施策の有効化につながる示唆を与える。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5656 号	氏 名	岩本 大輝
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 鈴木 秀男
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 山田 秀
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 山本 零
		慶應義塾大学教授	博士（経済学） 山本 勲
学士（工学）、修士（工学）、岩本大輝君の学位請求論文は「人的資本マネジメントの評価と効果に関する研究」と題し、全6章からなる。 近年、先進諸国の収益源は、有形資産から無形資産へ移行している。さらに、無形資産の中で最も重要な要素の1つである人的資本が重要となっている。労働時間・働き方改革・労働生産性などが注目されている中で、人的資本マネジメントの評価が経営上の大きな課題となっている。本論文は、人的資本の評価の提案と効果の実証を行い、また、人的資産が企業に与える影響や人的資産の活躍を促す施策など人的資産の影響関係に関する実証研究を行っている。本論文は以下のように構成されている。 第1章は序論であり、本研究の背景および課題を明らかにし、論文の概要を説明している。 第2章では、従来よく用いられている付加価値（Added Value：AV）に基づき、人的資本マネジメントの貢献を含む評価指標として人的調整済付加価値（Personnel adjusted Added Value：PAV）を提案している。また、重回帰分析を用いて PAV に関する自社のマネジメントの効率性を明らかにしている。 第3章では、PAV の有効性を確認するため将来収益との関係性を検証している。階層線形回帰によってパネルデータを分析することにより、PAV が将来の利益と関連性があること、PAV が AV よりも将来の利益により強く関連していることを示している。これにより、AV を内部管理に用いるよりも PAV を用いた方が有効であることを示唆している。 第4章では、人的資産、CSRA（Corporate Social Responsibility Activities）、企業業績の3要素の影響関係を分析している。ベジアン構造方程式モデリングを行うことで、順序尺度のデータにより主観を排除した実証分析を可能としている。これにより、人的資本の影響の経路として、人的資本が CSRA を通して企業業績に正の影響を与えていることを示している。 第5章では、マネジメント施策が人的資本に与える影響の実証研究として、ワーク・ライフ・バランス（Work-Life Balance：WLB）施策と女性活躍の関係を検証している。日本における人的資本・人的資本マネジメントの課題として女性管理的職業従事者割合が世界と比して極めて低い点がある。この課題の要因として WLB 問題がある。企業は WLB 支援施策の採用を検討しているが、施策が階級別女性比率に与える影響や施策間の影響関係が不明瞭であり、検討困難な現状がある。本章では、ベジアンネットワーク分析を行い、WLB 施策の組合せ効果や施策間関係が女性活躍に与える影響を検証し、施策の有効化につながる示唆を与えている。 第6章は、本論文のまとめと今後の課題と展望について述べている。 以上要するに、本論文では、人材の育成・投資の促進を意図した評価指標である PAV を提案し、人的資本の業績への影響経路や貢献を明らかにした。また、人的資本施策として、裁量のある働き方を促進する施策（WLB 施策）を取り上げ、それを有効にするための方策の効果を明らかにした。人的資本マネジメントの体系的実証研究はまだ少なく、本論文の成果は人的資本マネジメントの評価方法の研究の発展、さらに、労働時間・働き方改革・労働生産性の向上に寄与していくものと期待される。 よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 5665 号	氏 名	谷 智行
主論文題名：			
ナノ多孔体中ヘリウム 4 の超流動転移における 4 次元 XY 量子臨界性			
本研究は、量子相転移を示すボース粒子系であるナノ多孔体中ヘリウム 4(^4He)の有限温度超流動転移が、4 次元 XY の普遍性(ユニバーサリティ)クラスに属することを実験的に示したものである。 量子相転移は絶対零度で圧力などの外部パラメタの変化により起こる相転移であり、有限温度で生じる通常の相転移とは異なり、系の量子ゆらぎが重要な役割を演じる。量子相転移は重い電子系や銅酸化物高温超伝導体などの強相関フェルミ粒子系を中心に、物性物理学の主要な問題として興味を持たれてきた。一方、ボース粒子系で量子相転移を示す系は少ないが、ボース系は内部自由度や励起の複雑さを伴うフェルミ系よりも単純で、ボースハバード模型による理論的解析が可能である。 ナノ多孔体に閉じ込めた ^4He は、圧力により量子相転移を示すボース粒子系の典型例として重要な研究対象である。この系では、絶対零度で圧力変化により超流動相と局在ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)状態と名付けられた非自明な非超流動状態の間で量子相転移が起こることが知られている。捻れ振動子を用いた実験から圧力-温度相図と超流動密度が調べられ、理論研究によってこの量子相転移は 4 次元 XY の臨界性(普遍性クラス)を有することが示されている。この量子臨界性は有限温度にまで及ぶことが示唆されていたが、一般に量子相転移系の有限温度の相転移は古典的な臨界現象、すなわち本系では 3 次元 XY 普遍性、を示すと考えられる。この不一致の原因を探る鍵は有限温度の相転移点の臨界挙動を調べることであるが、過去の実験では臨界指数を評価できていなかった。 本研究では直径 3.0nm のナノ細孔を有する多孔質 Gelsil ガラスを用いて、多孔体中 ^4He を挟んだ 2 つのバルク液体間の超流動流を、ヘルムホルツ共鳴実験技術を用いて測定した。複数のヘルムホルツ共鳴モードの測定から、多孔体中 ^4He の超流動密度の温度依存性を精密かつ詳細に調べた。超流動密度の臨界指数を見積もると、実験を行った全圧力において臨界指数 ζ は 1.0 ± 0.1 の値を取ることがわかった。これは 3 次元 XY 普遍性クラスに属するバルク超流動 ^4He の $\zeta = 0.67$ と全く異なり、4 次元 XY モデルに期待される臨界指数と正確に一致する。従って、ナノ多孔体中 ^4He の超流動転移は、有限温度の相転移点でも 4 次元量子臨界性を示すことが明らかになった。			

次に量子臨界性が有限温度で発現することの解釈として、局在 BEC の相関長がナノ細孔の有限サイズ効果によって強く抑制され、それらが最近接の局在 BEC 間で重なり合うことにより超流動性を発現するという描像を提案した。この描像より、乱雑な局在 BEC の位相が超流動転移点で相関を持って揃うことに起因するエネルギー散逸が期待される。本実験では、ヘルムホルツ共鳴の散逸(共鳴線幅)が超流動転移温度直下で異常な増大を示すことがわかった。この散逸の異常を上記の描像に基づいて解析し、いくつかのデータに対して定量的な説明を与えることに成功した。このことはナノ多孔体中 ^4He の超流動転移の微視的な機構を明らかにするとともに、局在 BEC の描像の妥当性を支持する実験事実が得られたことを意味する。

以上まとめると、本論文ではナノ多孔体中 ^4He の有限温度超流動転移が 4 次元 XY 普遍性クラスに属することを、ヘルムホルツ共鳴を用いた精密な超流動密度測定により示した。4 次元相転移は理論的には単純だが実現は困難であり、ナノ多孔体中ヘリウム 4 はそのユニークな例であることが、本研究により初めて明らかになった。

審査の要旨

報告番号	甲 第 5665 号	氏 名	谷 智行
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	理学博士 白濱 圭也
	副査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 渡邊 紳一
		慶應義塾大学専任講師	博士（理学） 古川 俊輔
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 荒井 規允
学士（理学）、修士（理学） 谷智行君提出の学位請求論文は、「ナノ多孔体中ヘリウム 4 の超流動転移における 4 次元 XY 量子臨界性」と題し、全 7 章より構成されている。 量子相転移は通常の相転移とは異なり、絶対零度で系の量子ゆらぎにより起こる相転移現象である。量子相転移は銅酸化物超伝導体や重い電子系物質などの強相関フェルミ粒子系を中心に、物性物理学の重要な問題として研究されている。一方、ボース粒子系で量子相転移を示す系は少ないが、ボース系は内部自由度や励起の複雑さを伴うフェルミ系よりも単純で、ボースハバード模型による理論的解析が可能である。本研究の対象であるナノ多孔体に閉じ込めたヘリウム 4(^4He)は、圧力制御で量子相転移を示すボース粒子系のユニークな例である。この系では、絶対零度で加圧により超流動相と局在ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)状態と呼ばれる非超流動状態の間で量子相転移が起こる。理論研究によって、この相転移は 4 次元 XY の臨界性を持つことが示されているが、超流動転移温度の圧力依存性から有限温度の相転移にも 4 次元量子臨界性が存在することが示唆されてきた。これは量子相転移系の有限温度相転移が古典的であるという一般論と整合しない。この不一致の原因を調べるため、本論文ではナノ多孔体中 ^4He の超流動転移を新しい超流動共鳴装置を開発して詳細に調べ、臨界指数の値より 4 次元 XY 量子臨界性の存在を初めて明らかにした。 第 1 章は序論であり、バルク及び制限空間中ヘリウムの超流動と、臨界現象の諸性質について述べられている。第 2 章では量子相転移の一般論に続きナノ多孔体中 ^4He が示す量子相転移の性質と、本研究の目的が述べられる。第 3 章では本実験で用いた多孔質ガラス試料の特性と、開発した超流動共鳴装置およびこれを用いた実験方法について詳述している。本実験装置の開発により、過去の実験ではできなかった超流動密度に対する臨界指数の正確な決定が初めて可能となった。 第 4 章では実験結果について述べている。超流動共鳴器で観測された複数の共鳴に対するモード同定を行い、低周波側から数えて 2 番目の共鳴の周波数および線幅の温度依存性に最低次のヘルムホルツ共鳴モードの解析結果を併用することで、本研究の主要な情報である超流動密度とエネルギー散逸が求められる。これらのデータを、第 5 章と第 6 章で解析し詳細に考察している。第 5 章では超流動密度の臨界指数を 1.0 と求めた。この指数値はバルクな超流動ヘリウムが属する 3 次元 XY 普遍性クラスに期待される 0.67 と異なり、本系の臨界現象が 4 次元 XY 普遍性クラスに属することの証拠である。4 次元 XY 臨界性が有限温度で表れる機構として、局在 BEC 状態における量子揺らぎの効果を議論している。また各圧力における超流動密度の温度依存性が単一の関数形でスケールされることを見だし、4 次元 XY 臨界性に対する実験的証拠として提案している。更に第 6 章で、転移点直下のエネルギー散逸に付加的な寄与が生じることを発見し、この余剰散逸が局在 BEC の秩序変数の位相が超流動転移に伴い整合するプロセスで生じるという解釈を述べている。この解釈から散逸を定量的に計算し、低圧力の実験結果と良く一致する結果を得た。また高圧での不一致に対する解釈も提案している。第 7 章では結論として、本研究の成果がまとめられている。 以上、著者は本論文でナノ多孔体中 ^4He の有限温度超流動転移が 4 次元 XY 量子臨界性を有することを、自ら開発した超流動共鳴装置を用いた精密な超流動密度測定により示した。4 次元相転移は理論的には最も単純な相転移だが、現実の 3 次元物質における実現は困難であった。ナノ多孔体中ヘリウムはその稀有な例であることが、本研究により初めて明らかになった。従って本研究は物質の相転移現象に新たな理解をもたらす重要な成果であり、広く物理学の関連分野で学術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 5666 号	氏 名	鈴木 哲平
主 論 文 題 名 :			
Convolutional Neural Networks with Superpixels: Toward Detail-Preserving Image Segmentation (スーパーピクセルを利用した畳み込みニューラルネットワーク : 詳細情報を保持した画像分割に向けて)			
画像の認識及び理解はコンピュータビジョンの分野において主要課題の一つである。中でも、画像分割や深度推定といった画像を画素単位で認識する課題は画像編集や自動運転における環境認識などの高度なシステムにおいて重要な課題である。そのような課題は、近年、Fully Convolutional Networks (FCNs) と呼ばれる、畳み込みニューラルネットワーク (CNNs) によって実現されている。FCNs は従来の画像分割手法の精度を大きく上回り、分野に大きな影響を及ぼした。一方で、計算効率化と受容野拡大のために利用されるダウンサンプリング処理により、画像エッジなどの空間の詳細な情報の損失を招き、認識精度の低下の原因となっている。本論文では、画像処理で古くから利用されているスーパーピクセルを利用することで、ダウンサンプリング時の情報損失を防ぐ枠組みを提案する。提案手法を従来の FCNs に組み込むことで、詳細情報の損失を防げることを示す。 第 1 章では画像分割の問題設定とその応用、本論文の研究課題について述べた。 第 2 章ではマルコフ確率場を用いた画像分割手法から、近年研究されている CNNs による画像分割手法について述べた。また、スーパーピクセル分割に関する従来研究について述べた。 第 3 章では相互情報量最大化に基づくクラスタリング問題としてスーパーピクセル分割を定式化し、CNNs を利用して学習データを用いることなくスーパーピクセルを生成する枠組みを提案した。代表的なスーパーピクセル分割手法と比較することで、CNNs がスーパーピクセル分割において強い事前分布を持つことを示した。 第 4 章ではグラフ畳み込みネットワークについて述べた後、スーパーピクセルのためのグラフ畳み込み演算を定義する。一般的な CNNs と、提案した畳み込みを利用したモデルを比較することで、CNNs でスーパーピクセルを処理することによる利点を示した。 第 5 章では既存の FCNs にスーパーピクセルの枠組みを暗黙的に組み込む手法を提案した。様々な課題において、既存モデルに提案法を組み込むことで、画像エッジなどの詳細情報を保持した画像分割が可能となることを示した。また、既存の手法に比べ計算速度が向上することを確認した。 第 6 章では本論文のまとめを述べた後、今後の展望について議論した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5666 号	氏 名	鈴木 哲平
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	青木 義満
副査	慶應義塾大学教授	工学博士	池原 雅章
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	斎藤 英雄
	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	湯川 正裕
学士（工学）、修士（工学）鈴木哲平君提出の学位請求論文は「Convolutional Neural Networks with Superpixels: Toward Detail-Preserving Image Segmentation」（スーパーピクセルを利用した畳み込みニューラルネットワーク：詳細情報を保持した画像分割に向けて）と題し、6 章から構成されている。 画像の認識及び理解はコンピュータビジョンの分野において主要課題の一つである。中でも、画像分割や深度推定といった画像を画素単位で認識する課題は画像編集や自動運転における環境認識などの高度なシステムにおいて重要な課題である。近年、Fully Convolutional Networks (FCNs) と呼ばれる、畳み込みニューラルネットワーク (CNNs) がこの課題の解決方法として利用されている。FCNs は従来の画像分割手法の精度を大きく上回り、当該分野に大きな影響を及ぼした。一方で、計算効率化と受容野拡大のために利用されるダウンサンプリング処理により、画像エッジなどの空間の詳細な情報の損失を招き、認識精度の低下につながっていた。 本論文では、画像処理で古くから利用されているスーパーピクセルを利用することで、ダウンサンプリング時の情報損失を防ぎつつ、高精度に画像分割を実現する手法を提案している。提案手法を従来の FCNs に組み込むことで、画像の詳細な情報の損失を防げることを示している。 第 1 章では、画像分割の問題設定とその応用、本論文における研究課題について概説している。 第 2 章では、マルコフ確率場を用いた画像分割手法から、近年研究されている CNNs による画像分割手法について述べている。また、スーパーピクセル分割に関する従来研究を紹介している。 第 3 章では、相互情報量最大化に基づくクラスタリング問題としてスーパーピクセル分割を定式化し、CNNs を利用して学習データを用いることなくスーパーピクセルを生成する枠組みを提案している。代表的なスーパーピクセル分割手法と比較することで、CNNs がスーパーピクセル分割において強い事前分布を持つことを示している。 第 4 章では、グラフ畳み込みネットワークについて述べた後、スーパーピクセルのためのグラフ畳み込み演算を定義している。一般的な CNNs と提案した畳み込みを利用したモデルを比較することで、CNNs でスーパーピクセルを処理することによる利点を示している。 第 5 章では、既存の FCNs にスーパーピクセルの枠組みを暗黙的に組み込む手法を提案している。様々な課題において、既存モデルに提案法を組み込むことで、画像エッジなどの詳細情報を保持した画像分割が可能となることを示している。また、既存の手法に比べ計算速度が向上することを確認している。 第 6 章では、本論文のまとめを述べた後、今後の展望について議論している。 以上要するに、本論文では既存の FCNs にスーパーピクセル分割を組み込むことで、画像エッジなどの詳細情報を保持した画像分割が可能となることを示しており、画像工学分野において、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5675号	氏 名	銅冶 祐司
主論文題名：			
非自航作業船に用いられる矩形船体の横転・安定性・強度に関する研究			
本論文は、非自航作業船に用いられる矩形船体が有する技術的課題を解決するために、新たな力学的アプローチを試みたものである。水上土木工事では、効率化と安全性向上が求められている。土砂運搬・投下作業において、船体の横転を利用して土砂を投下する土運船を用いれば、工事費の縮減と作業時間の短縮が可能となり、施工の効率化が期待できる。現場の複雑な施工条件に応じて運用するためには、横転に関わる力学的メカニズムを明確にする必要があるが、これまでに十分に明らかになっていない。工事現場において、船体の安定性および強度に関わる事故がいまだに少なからず発生している。その原因の1つは、船体の安定性および強度の判定において、力学的根拠が不十分なまま、現場の工事担当者の経験に頼っていることにあると考えられる。本研究では、矩形船体の横転、安定性、強度に関する上述の課題に着目し、それらの諸特性を力学的に明確にすることを目的とした。 第1章では、本研究が必要とされる社会的背景を概説し、本研究の目的を述べた。 第2章では、土運船の横転挙動の力学的解析について述べた。土運船は、船体のバランスをとるための船内貯留水であるバラスト水を移動することにより、自ら横転し、土砂を投下する。この自己投下式土運船を用いた新工法を採用するためには、そのメカニズムを解明し、必ず横転するための設計条件、施工条件を明らかにする必要がある。振り子理論に基づく数値解析により、種々の条件での船体横転の可否を調べた結果、実験結果と概ね一致したことから、解析手法の妥当性が確認できた。 第3章では、矩形船体の浮体としての安定性に対する適正な評価法を検討した。自航船では、メタセンター高さは安定性の基本的な指標である。しかし、非自航作業船の場合、メタセンター高さが自航船より1桁以上大きいため、安定性を過大評価する可能性がある。このリスクを回避するため、非自航作業船の安定性評価の新たな指標として、復原モーメント率を提案した。非自航作業船と自航船をモデル化し、両船体の安定性における特性の違いを明らかにした。さらに、復原モーメント率とメタセンター高さの相関関係を確認し、非自航作業船の安定性の指標として、復原モーメント率を使用することの妥当性を明らかにした。 第4章では、補強された組立式台船の船体強度に関して、簡便で実務に有効な評価手法を検討した。組立式台船の船体は、本体と本体同士を連結する連結継手とで構成される。連結継手の強度は、本体より小さいため、船体の曲げモーメントが増加すると、先に連結継手が損傷する。この損傷に起因した船体の切断事故を防ぐためには、船体の強度を評価して、必要な仕様の補強材で補強することが必要である。モデル化した分割荷重と集中荷重の船体強度を、連結部の曲げモーメント解析によって評価した。その結果から、分割荷重の評価結果とは対照的に、集中荷重では、補強材の重量が過大で補強不可能となり、船体折損のリスクが高まることを明らかにした。 第5章では、本研究の成果を要約し、さらに今後の課題について述べた。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5675 号	氏 名	銅冶 祐司
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学教授	工学博士	杉浦 壽彦
副査	慶應義塾大学名誉教授	工学博士	澤田 達男
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	大宮 正毅
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	竹村 研治郎
学士（工学）銅冶祐司君提出の学位請求論文は「非自航作業船に用いられる矩形船体の横転・安定性・強度に関する研究」と題し、5章から構成されている。 本論文は、非自航作業船に用いられる矩形船体が有する技術的課題を解決するために、新たな力学的アプローチを試みたものである。水上土木工事では、効率化と安全性向上が求められている。土砂運搬・投下作業において、船体の横転を利用して土砂を投下する土運船を用いれば、工事費の縮減と作業時間の短縮が可能となり、施工の効率化が期待できるが、現場の複雑な施工条件に応じた運用には、横転に関わる力学的メカニズムを明確にする必要がある。また、工事現場において、船体の安定性および強度に関わる事故がいまだに少なからず発生している。その原因の1つは、船体の安定性と強度の判定において、力学的根拠が不十分なまま、現場の工事担当者の経験に頼ることにあると考えられる。本研究では、矩形船体の横転、安定性、強度に関する上述の課題に着目し、それらの諸特性を力学的に明確にすることを目的としている。 第1章は序論であり、本研究が必要とされる社会的背景と目的を述べている。 第2章では、非自航土運船の横転を利用した効率的作業に対する動力学解析を説明している。この土運船は、船体のバランスをとるための船内貯留水（バラスト水）の移動により、自ら横転して土砂を投下する。この自己投下式の新工法採用のためには、そのメカニズムを解明し、船体横転の設計条件、施工条件を明らかにする必要がある。振り子理論に基づく数値解析により、種々の条件での船体横転の可否を調べ、実験結果との一致から、解析手法の妥当性を確認している。 第3章では、矩形船体の浮体としての安定性に対する適正な評価法を検討している。自航船の安定性評価指標であるメタセンター高さをを用いると、非自航作業船では安定性を過大評価する可能性がある。このリスク回避のため、新たな指標として、復原モーメント率を提案している。非自航作業船と自航船の安定性における特性の違いを明らかにし、復原モーメント率とメタセンター高さの相関関係を確認したうえで、非自航作業船の安定性指標としての復原モーメント率使用の妥当性を明らかにしている。 第4章では、補強された組立式台船の船体強度に関する実務的簡易評価手法を提案している。組立式台船船体で、強度の低い連結継手で生じうる損傷に対し、船体の曲げモーメント解析に基づく強度評価法を用いれば、連結部補強により船体切断を防止しうる。異なる荷重分布モデルでの強度評価の結果、特に集中荷重では、補強材の重量が過大で補強不可能となり、船体折損のリスクが高まることを明らかにしている。 第5章は結言であり、各章で得られた内容を総括し、本研究の成果を要約している。 以上要するに、本論文は、非自航作業船の矩形船体が有する技術的課題に着目し、それらの諸特性を力学的に明確にしたうえで、そこで導入した力学的解析および評価の手法の妥当性を示したものであり、船舶工学分野において、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 5676 号	氏 名	安部 義隆
主論文題名：			
Mechanical Motion Oscillator Based on Energy/Phase Control for Legged Robots (脚式ロボットのためのエネルギー／位相制御に基づく機械運動発振器)			
ロボットは労働力不足に対する解決策の一つとして期待されている。脚式ロボットの特長は不整地上の移動が可能であることであり、特に二足ロボットは人間と同様の機構を有していることから、生活空間への親和性が高いことが挙げられる。開環境での動作のためには電源系統の自立化、エネルギー効率が重要となる。具体的には、ロボットの普及によるエネルギー消費の増加、バッテリー駆動によるエネルギーの制限といった課題である。これらを軽減する一つのアプローチとして、エネルギー効率性の向上が有効である。しかし、エネルギー効率性を陽に考慮した制御手法は脚ロボットに限らずあまり議論されていなかった。 本研究の目的は、エネルギー効率性を制御する手法を構築し、それを脚ロボットへ応用することである。脚ロボットは水平方向の移動に加えて、垂直方向の跳躍機能を有する。水平方向への速度制御と跳躍高さ制御はそれぞれ、線形倒立振子と調和振動子のエネルギー制御とモデル化が可能である。本研究では、これらの発振器の特性を前提とし、エネルギー効率性を考慮したエネルギーの制御を取り扱う手法を提案した。 第1章では、本研究の背景および目的について関連研究を交えて説明した。 第2章では、本研究の骨子となる調和振動子におけるエネルギー／位相制御を述べた。調和振動子におけるエネルギーと位相を定義し、運動方程式をこれらで記述した。エネルギー／位相制御において、位相制御は振動位相に同期するよう駆動位相を決定し、エネルギー制御はエネルギーのフィードバック制御により駆動振幅を決定する。従来法と各性能を比較し、エネルギー効率性において提案法が優位であることを示した。外乱オブザーバを導入することにより、効率性を犠牲にするがロバスト性を改善できることを確認した。 第3章では、骨子を多自由度脚ロボットに応用するための機構と制御の統合設計を述べた。パラレルリンク機構と線形ばねを用いて調和振動子に近い動特性を機構的に実現し、残りの動特性の誤差を外乱オブザーバに基づく制御系により補償した。 第4章では、1足ロボットでの跳躍高さ制御を扱った。第3章で述べたシステムをベースとし、接地相ではエネルギー／位相制御を実装し、滞空相では姿勢を固定する位置制御を実装した。エネルギー指令に応じて、一定高さ、可変高さの跳躍が可能であることを実験により確認した。 第5章では、上記の理論を2足ロボットの歩行速度制御に適用した。調和振動子のエネルギー／位相制御を線形倒立振子へ拡張し、それらの双対性を整理した。シミュレーションにおいて、一定速および可変速の制御が可能であることを確認した。さらに、実機検証も行い、従来法に比べてエネルギー消費が少なくなることを確認した。 第6章では、本研究の成果を要約し、展望とともに結論を述べた。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5676 号	氏 名	安部 義隆
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	桂 誠一郎
副査	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	石上 玄也
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	高橋 正樹
	ラトガーズ大学教授	Ph. D.	Jingang Yi
学士(工学), 修士(工学), 修士(経済学) 安部義隆君提出の学位請求論文は「Mechanical Motion Oscillator Based on Energy/Phase Control for Legged Robots」(脚式ロボットのためのエネルギー／位相制御に基づく機械運動発振器)と題し, 6 章から構成されている. 脚式ロボットは不整地での移動を可能にしていることから, 人間の代替として作業範囲の拡大が期待されている. 視覚情報に基づく環境認識や運動計画に関しては, これまでに多くの研究がなされてきた. また, 歩行継続のための安定化制御に関しても様々な手法が提案されている. ロボットが開環境で動作を行うためには, 電源システムの自立化が不可欠であり, エネルギー消費量を考慮した運動計画と安定化制御をつなぐ制御系設計が必要になる. 以上に鑑み, 本研究はエネルギー効率を考慮した脚式ロボットの制御系を構築することを目的として行われた. 具体的には, 脚式ロボットの運動を線形倒立振子と調和振動子としてモデル化し, 発振器の特性を活用した制御設計手法を示している. 第 1 章では, 研究の背景と目的を述べ, 従来の研究を概説している. 第 2 章では, 論文の骨子となる調和振動子のエネルギー／位相制御を述べている. 調和振動子のエネルギー, 位相に関して, 運動方程式で表されるモデルと対応付けを行い, 振幅と位相をそれぞれ制御する手法を示している. 従来法との性能比較により, エネルギー効率の面で提案手法が優れていることを確認している. さらに, ロバスト性の獲得とエネルギー消費はトレードオフの関係となるが, 外乱オブザーバの導入により, ロバスト性を改善できることを確認している. 第 3 章では, 提案手法を多自由度脚ロボットに応用するための機構と制御の統合設計について述べている. パラレルリンク機構と線形ばねを用いて調和振動子に近い動特性を機構的に実現した上で, モデル化誤差を外乱オブザーバに基づく制御系により補償し, その性能を確認している. 第 4 章では, 第 3 章で述べた制御系を 1 足ロボットでの跳躍高さ制御に適用し, 効果の検証を行っている. ロボットの接地期間におけるエネルギー／位相制御と滞空期間における姿勢制御を切り替えて実装することで, エネルギー指令に応じて跳躍高さを制御できることを実験により確認している. 第 5 章では, 提案手法を 2 足ロボットの歩行制御に適用するため, 線形倒立振子のためのエネルギー／位相制御を示している. シミュレーションならびに実機検証により, 従来法に比べてエネルギー消費を低減した歩行が可能になることを確認している. 第 6 章では, 各章で得られた成果をまとめ, 本論文全体の結論を述べている. 以上要するに, 本論文ではエネルギー消費を考慮した脚式ロボットのエネルギー／位相制御を提案し, 各種実験を通してその有効性を実証しており, ロボット工学分野において, 工学上, 工業上寄与するところが少なくない. よって, 本論文の著者は博士(工学)の学位を受ける資格があるものと認める.			

内容の要旨

報告番号	甲 第 5677 号	氏 名	加藤 広野
主論文題名：			
A Study on Machine Learning Based Detection of Android Malware and Stego Images (機械学習に基づいた Android マルウェアとステゴ画像の検知に関する研究)			
インターネット技術の向上に伴い、非常に便利な生活が実現しつつある一方で、電子ファイルやスマートフォンアプリなどのデジタルメディアを悪用した攻撃が重大なサイバーセキュリティ脅威となっている。既存のウイルス対策ソフトにより、既知の攻撃の検出は実用化されているが、多様化した全ての脅威に対処できるわけではない。攻撃の存在を確認することで、ユーザは被害を防ぐことができ、攻撃への対処や分析が行われやすいことから、デジタルメディアにおける脅威の検知技術は、サイバーセキュリティ分野において、最も重要な研究領域の一つになっている。 本論文では、検知技術が活躍する領域の中でも、利用者や被害の多さの観点から、Android マルウェアと、画像に悪性プログラムなどを人間の目には知覚できない微細なシグナルとして埋め込み、密かに攻撃を行うことが可能なステゴ画像の検知について扱う。これらの検知対象に対し、効果的な機械学習に基づいた検知法や未解決の課題への対策を提案する。実データを用いた分析や計算機シミュレーションを通して、提案方式の有効性や欠点および今後の展望を示す。 本論文の構成を以下に示す。 第1章では、デジタルメディアにおけるサイバーセキュリティ脅威の検知の重要性および、当該技術が用いられる領域を概観し、本研究の目的と位置付けを明確にする。 第2章では、本研究で想定する攻撃モデルや関連する従来研究について述べ、その問題点を述べる。 第3章では、SSL (Secure Sockets Layer) サーバ証明書の認証レベルに着目した Android マルウェア検知法を提案する。実データセットを用いた評価を行い、提案方式は、従来方式が検知できないマルウェアを検知し、検知精度を向上できることを示す。 第4章では、パーミッションペアの構成比に着目した Android マルウェア検知法を提案する。実データセットを用いた評価を行い、提案方式は、従来方式と比較して、検知結果の解釈を容易にし、学習時間および検知精度に関して優れているため、より実運用に向いていることを示す。 第5章では、シグナル埋め込み前に縮小リサイズが施されたステゴ画像への対策を提案する。本提案では、近年のシグナルの埋め込み手法を画像に複数回適用した場合、連続して同様の箇所埋め込む傾向を利用し、シグナルを強調することで、学習を促進する。実データセットを用いたシミュレーションを行い、提案方式は、従来方式と比較して、縮小リサイズ後に作成されたステゴ画像の検知精度を向上可能であることを示す。 第6章は結論であり、本論文の内容を総括している。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5677 号	氏 名	加藤 広野
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士 笹瀬 巖
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士 山中 直明
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 大槻 知明
		慶應義塾大学教授	工学博士 池原 雅章
工学士，修士（工学），加藤広野君提出の学位請求論文は，「A Study on Machine Learning Based Detection of Android Malware and Stego Images（機械学習に基づいた Android マルウェアとステゴ画像の検知に関する研究）」と題し，全 6 章から構成される。 インターネット技術の向上に伴い，非常に便利な生活が実現しつつある一方で，電子ファイルやスマートフォンアプリなどのデジタルメディアを悪用した攻撃が，重大なサイバーセキュリティ脅威となっている．ウイルス対策ソフトにより，既知の攻撃に対する検知はなされているが，多様化した全ての脅威に対処できるわけではない．攻撃の存在を確認することにより，攻撃内容の分析や対処方法の検討が可能となるため，デジタルメディアにおける攻撃検知は，サイバーセキュリティ分野において，最も重要な研究領域の一つになっている．攻撃検知技術は，適用する場面によって，検知の対象や扱うことが可能なデータ形式等が大きく異なるため，それぞれに特化した対応策を講じることが喫緊の課題となっている． 本論文では，利用者や被害の多さの観点から，Android マルウェアと，画像に悪性プログラムなどを人間の目には知覚できない微細なシグナルとして埋め込み，密かに攻撃を行うことが可能なステゴ画像に注目し，これらに対して，機械学習に基づいた効率的な検知方式を提案し，データ分析や計算機シミュレーションにより，提案方式の有効性を示している． 第 1 章では，デジタルメディアにおけるサイバーセキュリティ脅威と攻撃検知の重要性，および，当該技術が用いられる領域を概観し，本研究の目的と位置付けを述べている． 第 2 章では，システムモデルと攻撃者モデルの定義を行なったのち，本研究に関連する従来研究について述べ，実データセットの分析を通して，それらの問題点を明らかにしている． 第 3 章では，SSL（Secure Sockets Layer）サーバ証明書の認証レベルに着目した．Android マルウェア検知法を提案している．実データセットを用いた評価を行い，提案方式は，従来方式が検知できないマルウェアを検知し，検知精度が向上することを示している． 第 4 章では，パーミッションペアの構成比に着目した，Android マルウェア検知法を提案している．実データセットを用いた評価を行い，提案方式は従来方式と比較して，検知結果の解釈を容易にし，学習時間および検知精度に関して優れていることを示し，実運用に適していることを明らかにしている． 第 5 章では，シグナル埋め込み前に縮小リサイズが施されたステゴ画像への対策として，近年のシグナルの埋め込み手法では，画像に複数回適用した場合は連続して同様の箇所に埋め込む傾向があることに着目し，シグナルを強調して学習を促進する検知方式を提案している．実データセットを用いたシミュレーションを行い，提案方式は従来方式と比較して，縮小リサイズ後に作成されたステゴ画像の検知精度を向上できることを示している． 第 6 章は結論であり，本論文の内容および今後の課題を総括している． 以上，本論文の著者は，デジタルメディアにおける脅威である Android マルウェアとステゴ画像に対して，機械学習に基づいた効率的な検知方式を提案し，データ分析や計算機シミュレーションにより，提案方式の有効性を明らかにしており，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 5692 号	氏 名	橋本 悠香
主 論 文 題 名 :			
Krylov Subspace Methods for Functions of Operators and Action of Operators on Vectors (作用素の関数及びベクトルへの作用に関する Krylov 部分空間法)			
Krylov 部分空間法は、微分作用素などの有限次元または無限次元空間上の線形作用素の振る舞いを近似するために研究されてきた。そして、与えられた線形作用素の固有値や与えられた線形方程式の解を近似するために用いられ、これにより自然界の現象を理解することが可能となる。この枠組みでは対象となる作用素が与えられているため、モデル駆動型の方法が適用できる。一方で、転送作用素と呼ばれる、非線形な力学系の時間発展を記述する線形作用素が、機械学習、物理学、分子動力学、制御工学など様々な分野との関連で研究されている。この枠組みにおいては、未知の力学系から生成されたデータを用いて、未知の転送作用素が推定できる。よって、適用される方法はデータ駆動型である。一般に、対象となる力学系が非線形でも転送作用素は線形であるため、非線形な力学系においても Krylov 部分空間法を用いることができる。 本稿では、モデル駆動型、データ駆動型両方の方法を扱う。モデル駆動型の方法に対しては、与えられた微分方程式の離散化において現れる行列に関する関数を計算するための Krylov 部分空間法について考える。最初に、不正確な計算を行うことで効率的に計算を進める <i>inexact rational Krylov</i> 法を提案する。行列の成分に関する減衰性を用いることで、Krylov 部分空間法の反復が進むにつれて計算を不正確に行っても問題ないことを示す。これにより、行列に関する関数を効率良く計算することが可能となる。データ駆動型の方法に対しては、作用素のベクトルへの作用を与えられたデータのみから推定する Krylov 部分空間法について考える。このような Krylov 部分空間法の収束性を与え、さらにデータの前処理を考える。推定された解の残差が、残差の最小値を達成するベクトルに収束することを示す。収束性に関しては、推定されたベクトルにおいて現れる関数が極を持つため、直接的な方法で証明を与えることは難しい。そこで、残差の中に現れる逆作用素を用いることで、この問題を解決する。さらに、データの前処理を行うことは、モデル駆動型の Krylov 部分空間法において高速化のために提案されてきた前処理法を適用することに対応することを示す。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5692 号	氏 名	橋本 悠香
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	理学博士 田村 明久
	副査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 井口 達雄
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 眞田 幸俊
		慶應義塾大学准教授	博士（情報理工学） 小林 景
		慶應義塾大学名誉教授	工学博士 野寺 隆
学士（理学）修士（理学）橋本悠香君提出の学位申請論文は「Krylov Subspace Methods for Functions of Operators and Action of Operators on Vectors（作用素の関数及びベクトルへの作用に関する Krylov 部分空間法）」と題し、全 7 章より構成されている。 科学技術計算における Krylov 部分空間法は、微分作用素などの線形作用素の振る舞いを近似するために研究されてきた算法であり広く利用されている。自然現象を微分方程式としてモデル化し、解を求めることで現象を理解する枠組みでは、対象となる作用素が与えられているためモデル駆動型の方法が適用できる。一方、転送作用素と呼ばれる非線形な力学系の時間発展を記述する線形作用素が、機械学習、物理学、分子動力学、制御工学など様々な分野との関連で研究されている。この枠組みにおいては、未知の力学系から生成されたデータを用いて、未知の転送作用素を推定するため、データ駆動型の方法が適用できる。本論文では、モデル駆動型とデータ駆動型の両方の Krylov 部分空間法を扱い、計算効率に基づく新たな実装法を提案し、高速計算機による提案手法の有効性を数値解析的な理論と共に実証したものである。 第 1 章は研究動機、問題設定、研究の目的、本論文の構成を述べ、第 2 章は数学的準備を与えている。第 3 章は作用素の関数に関する既存の Krylov 部分空間法およびベクトルへの作用に関する既知の Krylov 部分空間法を紹介している。 第 4 章では、与えられた微分方程式の離散化において現れる行列に関する関数を計算するためのモデル駆動型の Krylov 部分空間法を扱っている。不正確な計算を行うことで効率的に計算を進める Inexact Rational Krylov 法を提案し、反復が進むにつれて計算を不正確に行っても最終的な計算結果の精度が保証されることを理論的に示している。また、高速計算機による数値実験により提案手法の計算精度の有効性と効率性を確認し、並列化による計算速度向上の可能性を与えている。 第 5 章では、作用素のベクトルへの作用を与えられたデータのみから推定するデータ駆動型の Krylov 部分空間法を扱っている。Arnoldi 法および修正を加えた Shift-invert Arnoldi 法について、推定された解の残差が残差の最小値を達成するベクトルに収束することを理論的に示している。収束性に関しては、推定されたベクトルにおいて現れる関数が極を持つため直接的な方法で証明できないため、残差の中に現れる逆作用素を用いるというアイデアを用いて問題解決を行っている。 第 6 章では、データ駆動型の枠組みでのデータの前処理が、モデル駆動型の Krylov 部分空間法の高速化のために提案されてきた前処理に対応することを示している。 第 7 章は本論文の成果を総括している。 以上、著者は Krylov 部分空間法を用いた新たな高速計算法を提案し、その収束性の理論的な証明を与えたものであり、当該分野に寄与するところは少なくない。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 5693 号	氏 名	川原 遼太
主論文題名：			
ヒトがん細胞の血管擬態における細胞表面受容体の役割解析			
血管擬態 (vasculogenic mimicry: VM) とは、がん細胞自身が血管様のネットワーク構造を作り出す現象である。VM の形成により腫瘍の成長や転移が促進すると考えられており、多くの悪性腫瘍でその存在が確認されている。そのため、VM はがん治療の有効な標的になる可能性を秘めているが、そのメカニズムは不明な点が多い。本論文では 2 種類の細胞表面受容体に焦点を当て、VM 形成におけるそれらの役割を評価した。 (1) Integrin $\beta 1$ がヒトがん細胞の VM 形成に与える影響の解析 ヒト線維肉腫由来の HT1080 細胞において、ゲノム編集技術である CRISPR/Cas9 システムにより integrin $\beta 1$ (ITGB1) をノックアウト (KO) し、VM 形成が完全に抑制されることを示した。また、その細胞に ITGB1 を再発現させることで VM 形成能が回復することを明らかにした。さらに、ヒト乳がんおよびヒトメラノーマ細胞においても、ITGB1 の KO により VM 形成能が完全に失われた。これらの結果から、ヒトがん細胞の VM 形成機構に ITGB1 が必要不可欠であることを明らかにした。 (2) ErbB4 がヒト乳がん細胞の VM 形成に与える影響の解析 ヒト乳がん由来の MDA-MB-231 細胞において、ErbB4 の過剰発現により VM 形成能が著しく低下し、ヒト乳がん由来の MCF-7 細胞および T47D 細胞において、ErbB4 を KO すると VM 形成が促進した。その一方で、ErbB4 のリガンド依存的な活性化は、VM 形成を促進させることを明らかにした。また、複数の腫瘍において報告例がある ErbB4 の E872K 変異について VM に与える影響を検討した結果、この変異により ErbB4 は恒常的に活性化し、リガンド刺激無しで VM 形成能が強められることを見出した。さらに、pan ErbB 阻害剤である afatinib が、ErbB4 を介した VM 形成を効果的に抑制することを明らかにした。まとめると、ヒト乳がん細胞の VM において ErbB4 は重要な制御因子であることが明らかになった。 本論文により、ヒトがん細胞の VM 形成における細胞表面受容体の重要性が明らかになり、これらの受容体分子ががん治療標的になり得ることが示唆された。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5693 号	氏 名	川原 遼太
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	工学博士 戸嶋 一敦
		慶應義塾大学教授	博士（薬学） 荒井 緑
		慶應義塾大学准教授	医学博士 松本 緑
学士（工学）、修士（理学）の川原遼太君の学位請求論文は、「ヒトがん細胞の血管擬態における細胞表面受容体の役割解析」と題し、全4章から構成されている。血管擬態 (vasculogenic mimicry: VM) は腫瘍の成長や転移を促進させる現象であり、多くの種類のがんでその存在が報告されている。近年の包括的な研究により、VM はがん患者の予後不良と密接に関わることが示されており、がんの新たな治療標的として注目されている。VM 形成を制御することができれば、効果的ながん治療を行うことができると考えられているが、その形成機構には未解明な点が多く存在する。本論文では、がん細胞表面に発現する受容体である integrin $\beta 1$ (ITGB1) と ErbB4 に注目し、それぞれのタンパク質が VM 形成に与える影響について記述している。 第1章は序論であり、VM の概念や本論文で注目した2つのタンパク質について概説している。また、本研究の目的や意義について記述している。 第2章では、ITGB1 が VM 形成に与える影響について記述している。先行研究により、細胞外マトリックス (ECM) は VM 形成に重要であることが示唆されていたが、ECM 受容体の必要性は明らかになっていなかった。そこで著者は、ゲノム編集技術である CRISPR/Cas9 システムを用いることで、がん細胞表面の ECM 受容体である ITGB1 遺伝子を欠損させ、それによりがん細胞の VM 形成能が失われることを初めて明らかにした。この結果は線維肉腫、乳がん、メラノーマという由来の異なる3種類のヒトがん細胞で再現されたため、VM の普遍的な形成メカニズムとして ITGB1 が必須であることが示唆された。さらに、ITGB1 の発現と FAK の活性化に相関があることや、ITGB1 の中和抗体を処理することで VM 形成が抑制できることを証明している。まとめると、VM 形成において ITGB1 が必要不可欠な因子であることを明らかにしている。 第3章では、ErbB4 がヒト乳がん細胞の VM 形成に与える影響について記述している。ErbB4 を含む上皮成長因子受容体群はよく知られているがん遺伝子であるが、VM 形成における機能は殆ど知られていない。著者は初めに、3種類のヒト乳がん細胞株における内在的な ErbB4 発現量と VM 形成能を評価し、ErbB4 が VM 形成を負に制御する可能性を見出した。それを立証するため、ErbB4 が発現していない細胞に ErbB4 を過剰発現させ、VM 形成が抑制されることを示した。さらに、ErbB4 が高発現している細胞において ErbB4 遺伝子を欠損させ、VM 形成能が上昇することを示した。すなわち、ErbB4 が VM 形成を負に制御するという仮説を証明した。また、ErbB4 の活性化状態と VM 形成能の関係についても詳細な検討を行っている。ErbB4 のリガンドである neuregulin 1 を処理することで ErbB4 の活性化を誘導し、その活性化が VM 形成の促進に寄与することを示した。さらに、実際のがん患者で報告されている ErbB4 の活性化型変異が、VM 形成を促進させる変異であることを明らかにした。以上の結果に加えて、既存の低分子医薬品であるアフアチニブが、ErbB4 を介した VM 形成を効果的に抑制することを見出した。まとめると、ErbB4 が自身の活性化状態に応じて VM 形成を正にも負にも調節するという、複雑な機構を明らかにしている。 第4章の総括では、各章で得られた成果をまとめ、がん細胞表面の受容体と VM 形成に関する知見と展望を記述している。 本論文の成果は、がんの悪性化を促す現象である VM が、細胞表面の受容体分子によって緻密に制御されることを明らかにしている。さらに、ITGB1 や ErbB4 等の細胞表面受容体を阻害することにより、VM 形成が制御可能であることを示しており、学術的に極めて意義深いものである。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 5694 号	氏 名	森 研人
主論文題名： 糖転移酵素を介した タンパク質糖鎖修飾の新規機能解析			
糖鎖は核酸、タンパク質に続く第 3 の生命鎖として注目が高まっている。糖鎖がタンパク質に付加する糖鎖修飾は、タンパク質の分泌、フォールディング、安定性などに寄与している。そして、タンパク質への糖鎖付加を触媒するのが糖転移酵素である。糖タンパク質の機能や、生体および疾患などに及ぼす影響を解明するには、糖鎖修飾および糖転移酵素についての解析が不可欠である。本論文では、2 種類の糖鎖修飾とそれを触媒する 3 種類の糖転移酵素に着目し、機能解析に取り組んだ。 (1) FGL1 のグルコシルガラクトシルヒドロキシ化とその糖転移酵素の同定 FGL1 過剰発現細胞株より FGL1 を精製し、質量分析を行ったところ、Lys65 におけるグルコシルガラクトシルヒドロキシ化 (GGH) と思われる糖鎖修飾を発見した。発見した修飾が GGH であるか否かの解明と糖転移酵素の同定のため、LH3 および GLT25D1 ノックアウト細胞について同様に質量分析を行った結果、LH3 がグルコース付加、GLT25D1 がガラクトース付加を触媒していることが明らかになった。同時に、FGL1 の Lys65 の糖鎖修飾が実際に GGH であることが示された。さらに、変異体を用いた解析により、GGH が FGL1 タンパク質の安定性に寄与していることが示唆された。 (2) C 型糖転移酵素 DPY19L3 が筋分化に及ぼす影響 マウス筋芽細胞由来 C2C12 細胞を分化誘導培地で培養し、DPY19L3 の発現量を評価したところ、分化前後どちらも発現が確認された。次に、C2C12 細胞に対して DPY19L3 をノックアウトしたのち同様に分化誘導を行うと、分化が抑制されていた。よって、DPY19L3 が C2C12 細胞の分化に重要であることが示された。よって、DPY19L3 によって触媒される C 型糖修飾の基質タンパク質が、筋分化の制御に関与していることが示唆された。 本研究により、LH3, GLT25D1, DPY19L3 という 3 種類の糖転移酵素を介したタンパク質および生体の機能制御を明らかにすることができた。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5694 号	氏 名	森 研人
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
		慶應義塾大学教授	博士（理学） 宮本 憲二
学士（工学）、修士（理学）森研人君の学位請求論文は、「糖転移酵素を介したタンパク質糖鎖修飾の新規機能解析」と題し、全4章で構成されている。タンパク質はアミノ酸残基に様々な化学的修飾を受ける翻訳後修飾によって機能を獲得するが、その中でタンパク質に糖鎖が付加するものを糖鎖修飾と呼ぶ。糖鎖修飾はタンパク質の分泌、安定性、フォールディングなどに寄与することが知られている。本論文では、生体機能について報告例が少ないC型糖修飾と、collagen-like domain存在下での修飾が知られているLysのグルコシルガラクトシルヒドロキシ化 (GGH) という2種類の糖鎖修飾に着目し、それぞれの糖鎖修飾およびその糖転移酵素の機能解析に関して述べている。 第1章では、序論として糖鎖修飾に関して、特に上記の2種類を中心に概説している。さらに、第2章、第3章でそれぞれ着目するタンパク質や生命現象の概要、そして本研究の目的について述べている。 第2章では、肝臓で発現する分泌型タンパク質であるFibrinogen-like protein 1 (FGL1)について、糖鎖修飾の種類や糖転移酵素の同定、機能解析について述べている。FGL1は肝臓や免疫系などに対する様々な機能が報告されているものの、糖鎖修飾による機能獲得については明らかになっていない。FGL1のアミノ酸配列はC型糖修飾の条件を満たしていることから、質量分析によって修飾の有無を解析した。しかし、予想に反してC型糖修飾は検出されなかった。FGL1の質量分析のデータを精査したところ、65番目のLysにおいてGGHと思われる糖鎖修飾が新たに発見された。しかし、FGL1はcollagen-like domainを持たないため、この糖鎖修飾が真にGGHであるか否かを検証した。糖転移酵素と予想されるLysyl hydroxylase 3 (LH3)およびGLT25D1を遺伝子ノックアウトした細胞に産生させたFGL1について、再度質量分析を行い、修飾の阻害が起きるか否かを解析した。その結果、FGL1の65番目のLysにはグルコースとガラクトースの付加が検出され、グルコース付加はLH3によること、ガラクトース付加はGLT25D1によることが見出された。さらに、65番目のLysをArgに置換した変異体を用いた解析によって、LH3およびGLT25D1によって触媒されるGGHが、FGL1タンパク質の安定性に寄与することが示唆された。 第3章では、C型糖転移酵素と筋分化との関係について述べている。C型糖修飾の機能解析を行うため、C型糖修飾を触媒する糖転移酵素DPY19L3に注目し、酵素の発現による筋分化への影響を解析した。DPY19L3の遺伝子ノックアウトを行ったマウス筋芽細胞由来C2C12細胞に対して、筋管細胞への分化誘導処理を行い、ノックアウト細胞の筋管細胞への分化が親細胞のC2C12細胞と比較して抑制されることを初めて明らかにした。さらに、DPY19L3ノックアウトによって、筋分化に対する分化マーカーの発現量やシグナル伝達分子のリン酸化量も抑制されていた。これらの結果から、DPY19L3の発現がC2C12細胞の筋分化に重要であることが明らかになった。また、DPY19L3を介したC型糖修飾が筋分化を制御している可能性が示唆された。 第4章では、本研究を総括・考察し、今後の展望について述べている。 本論文の成果を通じて、C型糖修飾とGGHという2種類の糖鎖修飾の、糖転移酵素を介した新規な生体機能制御メカニズムを明らかにした。これらの発見は糖鎖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（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 5695 号	氏 名	真辺 幸喜
主論文題名：			
異核 Feshbach 共鳴を有する Bose-Fermi 混合原子気体における 強相関量子多体现象の理論研究			
本論文では、Bose 原子気体 1 成分と Fermi 原子気体 1 成分で構成される極低温 2 成分 Bose-Fermi 混合原子気体における強相関量子多体现象を理論的に研究した。超流動転移温度以上の正常相において、異核 Feshbach 共鳴（Bose 原子と Fermi 原子の間で起こる Feshbach 共鳴）で制御された可変な Bose-Fermi 引力相互作用に起因する対形成揺らぎが、この系の 1 粒子励起スペクトルや熱力学的性質に与える影響を明らかにした。 本論文の前半では、Bose-Fermi 混合原子気体の 1 粒子励起に対する強結合効果を研究した。この系を構成する Bose 原子と Fermi 原子の質量や粒子数が等しい場合に対し開発された強結合理論である改良型 T 行列近似(improved T-matrix approximation (iTMA))を、現実の Bose-Fermi 混合原子気体を考える際に考慮しなくてはならない質量インバランスや、粒子数インバランスの効果をも扱えるよう拡張した。この理論を用い、1 粒子スペクトル強度に対する Bose-Fermi 対形成揺らぎの影響を、弱結合から強結合に至る幅広い相互作用領域で明らかにした。また、冷却原子物理学の分野で既に実験的に実現している ^{87}Rb-^{40}K、^{23}Na-^{40}K といった Bose-Fermi 混合原子気体に対し、1 粒子励起と密接に関係する観測可能量である光原子分光スペクトルを幅広い相互作用領域で計算、その結果から、質量バランス系で指摘されていた強結合効果に起因する 1 粒子励起スペクトルの特異な構造が現実的な実験状況を加味しても観測可能であることを明らかにした。 本論文の後半では、Bose-Fermi 混合原子気体の熱力学的安定性を研究した。1 粒子励起の研究で有用であった iTMA を熱力学的安定性の問題に適用すると破綻することを指摘、それを克服するために 2 成分 Fermi 原子気体の分野で用いられている自己無撞着 T 行列近似(self-consistent T-matrix approximation (SCTMA))をこの系に適用した。この系では、Fermi 原子気体成分が媒介する Bose 原子間引力が系を不安定にすることが弱結合平均場理論の範囲で知られていたが、SCTMA を用いた本研究により、強結合領域では強い Bose-Fermi 対分子相関により系が安定化することを示した。更に、Fermi 原子成分に媒介された Bose 原子間引力相互作用と、Bose 原子間に直接作用する弱い斥力相互作用の拮抗によっても系が安定化し得ることを指摘、これらの結果を用い、Bose-Fermi 間に働く引力相互作用強度と Bose 原子間に働く斥力相互作用強度に対する相図において、系が熱力学的に安定な領域を決定した。更に、安定領域において定積比熱などの熱力学量を SCTMA の枠組みで計算し、これらの量に現れる強結合効果を明らかにした。特に、強結合領域における比熱の温度変化から、系が Bose 原子と Fermi 原子が強く結合した複合 Fermi 分子の気体とみなせる領域を特定した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5695 号	氏 名	真辺 幸喜
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（工学） 斎木 敏治
		慶應義塾大学教授	博士（理学） 渡邊 紳一
		慶應義塾大学准教授	博士（理学） 山内 淳
学士（理学）、修士（理学）真辺幸喜君の学位請求論文は、「異核 Feshbach 共鳴を有する Bose-Fermi 混合原子気体における強相関量子多体現象の理論研究」と題し、全 6 章より構成されている。 冷却原子気体の分野では、これまで研究されてきた Bose 原子気体、Fermi 原子気体に加え、近年、両者を混合した Bose-Fermi 混合原子気体が注目を集めている。この系では、異核 Feshbach 共鳴を用いることで、Bose-Fermi 原子間にはたらく引力相互作用の強度を自在に制御することができ、Bose 原子と Fermi 原子が弱く相互作用している弱結合領域から、これらが強く結合した Fermi 分子が系の性質を支配する強結合領域までを、統一的に研究できると期待されている。しかし、Fermi 原子成分により誘起される、Bose 原子間引力相互作用に因る系の不安定化を回避する条件や、強結合効果の観測に適した物理量の特定といった、実験遂行時に重要となる情報が理論に求められているものの、本研究以前には、実験で避けることができない Bose 原子と Fermi 原子の間の質量差（質量インバランス）や粒子数差（粒子数インバランス）を扱える強結合理論が存在しない、という状況にあった。 当該研究分野のこうした状況に対し、本研究は、質量インバランスと粒子数インバランスの効果を両方扱える理論の構築に成功、それを用い、強結合効果が 1 粒子励起スペクトルにどのように現れるかを明らかにするという、重要な成果を挙げている。また、系が不安定化する領域や、系を Fermi 分子気体とみなせる強結合領域を、相互作用-温度相図上で特定するという成果も挙げている。 第 1 章は序論である。Bose-Fermi 混合原子気体の研究の現状と、本論文で扱う 1 粒子励起スペクトルや熱力学量の説明の後、本研究の目的が述べられている。 第 2 章では、Bose-Fermi 引力相互作用に起因する対形成揺らぎを扱うための 2 種類の近似理論が説明されている。一つは、改良型 T 行列近似（iTMA）であり、従来の理論を拡張し、質量インバランス、粒子数インバランスの効果をも取り扱える定式化が詳説されている。もう一つは、自己無撞着 T 行列近似（SCTMA）であり、可変な引力相互作用を有する 2 成分 Fermi 原子気体の研究で成功を収めたこの強結合理論を、Bose-Fermi 混合原子気体に適用するための方法が説明されている。 第 3 章では、iTMA の枠組みで、1 粒子励起スペクトル強度、および、それと密接に関連する観測可能量である光原子分光スペクトルを研究している。インバランス効果を見捨てた先行研究で指摘されていた強結合効果に起因する特殊なスペクトル構造が、既に実現している ^{87}Rb-^{40}K や ^{23}Na-^{40}K Bose-Fermi 混合原子気体における質量インバランスを考慮しても、観測可能であることが示されている。粒子数インバランスについても、Bose 原子数 N_B と Fermi 原子数 N_F の違いが $0.5 \leq N_B/N_F \leq 4$ 程度であれば、強結合効果に起因するスペクトル構造の観測が可能であることを明らかにしている。 第 4 章では、SCTMA の枠組みで圧縮率行列を理論的に評価、Fermi 原子気体成分に媒介された Bose 原子間引力相互作用と元々存在する Bose 原子間斥力相互作用との競合を研究している。その結果から、与えられた Bose 原子間斥力相互作用強度に対し、系が不安定化する領域を、Bose-Fermi 引力相互作用強度と温度に対する相図中で特定することに成功している。 第 5 章では、定積比熱を SCTMA の枠組みで研究、その温度変化から、系が Fermi 分子気体とみなせる強結合領域を、Bose-Fermi 引力相互作用強度と温度に対する相図中で特定している。 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。 本研究が成し遂げた、Bose-Fermi 混合原子気体に対する従来の理論が抱えていた問題点の克服は、当該研究分野の理論の発展に貢献するものと高く評価できる。また、強結合効果の観測に対する 1 粒子励起スペクトルの有効性を明らかにした成果、および、系の不安定領域や Fermi 分子気体とみなせる領域を相図中で特定することに成功した成果は、今後の実験に重要な指針を与えるものである。Bose-Fermi 混合系は、冷却原子気体の研究分野以外にも、物性物理学や高エネルギー物理学分野でも研究されており、本研究で得られた知見は、そうした他分野の研究に対しても資するものがあると判断できる。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 5696 号	氏 名	洞口 泰輔
主論文題名：			
ホモダイン検波法によるスピントルク検出の高精度化に関する研究			
スピントルクとは、伝導電子と局在電子の間でスピン角運動量を授受することにより、強磁性体の磁化を回転させる機構であり、高速・省電力な不揮発磁気メモリや論理演算素子への応用が期待されている。このスピントルクによるナノスケール磁性体の磁化ダイナミクス研究は、非平衡スピンが緩和する長さ以下(sub-μm~nm)での微細加工技術とともに発展し、様々なスピントルク測定法に応用されてきた。しかし、スピントルクを生成する電流は、Ampere の法則にしたがう磁場も発生させ、両者が磁化ダイナミクスを励起するため、常に「磁場トルクとスピントルクの分離」問題が付きまとう。本博士論文では、広く用いられるホモダイン検波法によるスピントルク検出に焦点を当て、その整流電圧スペクトルに含まれる様々なアーティファクト信号を定量化することにより、その高精度化に関する研究を行った。 まず、空間的に非一様な磁気構造中の電流が作るスピントルクの高精度評価を実証した。様々なスピントルク現象の理解に不可欠な非断熱スピントルクを見積もるため、ひょうたん型に微細加工した Ni81Fe19 薄膜中に閉じ込めた磁気渦対の連成振動をホモダイン検波法により検出した。交流電流を与えることにより、スピントルクと磁気トルクの両方に由来する磁気渦コア対の旋回運動を励起した。ひょうたん型試料を用いることにより、磁気渦対に含まれるダイヤモンド型の磁区が試料中央にピン止めされ、左右対称な磁気渦を形成することに成功した。これは、スピントルクと磁場トルクの分離測定において不可欠な4つの連成振動モードを実現する上で極めて重要な成果である。スピントルクと磁場トルクは、固有周波数の異なる連成振動モードと結合するため、両者の整流電圧スペクトルを分離測定できる。実際、ノンコリニア磁気構造に発生するスピントルクの微視的理論と定量的に一致するスピントルクを測定することに成功した。 次に、強磁性体と非磁性体からなる二層膜におけるコリニア磁気構造に作用するスピントルクを測定する最もよく用いられる方法の一つであるスピントルク強磁性共鳴(ST-FMR)法の高精度化について研究した。一般にスピントルク効率ξ_{FMR}は、ST-FMR スペクトルの対称・反対称成分の強度比から見積もられる。しかし、ST-FMR を誘引する交流電流の分布が非対称になると面直磁場成分が発生し、これが対称・反対称成分の強度比に影響を与えるため、ξ_{FMR} の決定において不確かさを生む。本研究では、ST-FMR スペクトルの外部磁場印加角依存性を測定し、その角度依存性を詳細に分析することにより、交流電流分布に非対称性がある場合でもξ_{FMR} を高精度に決定できることを実証した。さらに、10 GHz 以下の低周波領域において ST-FMR スペクトルの強度が大きく増大する効果を発見した。この効果は、これまでに ST-FMR 法で報告されているどのタイプのアーティファクトとも定量的に一致しないことが分かった。この結果は、高精度なξ_{FMR} の決定には周波数依存性の測定も不可欠であることを示す。 最後に、本研究で開発した高精度スピントルク検出法を用いて、ナノメータ厚の Si/Al 傾斜材料における全く新しいスピン流生成を実証した。スピン軌道相互作用(SOI)が弱い物質から構成される傾斜材料において、代表的な強 SOI 材料である Pt の3倍以上のスピントルクが発生することを発見した。このスピン流発生効率は、Si/Al 傾斜幅の減少に伴い増加すること、傾斜幅ゼロの界面では急減することが分かった。それに加え、SOI に由来するスピンホール効果とは異なり、電流とスピン流の変換が極めて非相反的になることを確かめた。これらは、Si/Al 傾斜材料において全く新しい機構に基づくスピン流生成が実現していることを示唆しており、スピントロニクス材料の高性能化に大きく貢献する結果である。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5696 号	氏 名	洞口 泰輔
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 能崎 幸雄
	副査	慶應義塾大学教授	理学博士 江藤 幹雄
		慶應義塾大学教授	博士（理学） 渡邊 紳一
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 安藤 和也
学士（理学）、修士（理学） 洞口泰輔君提出の学位請求論文は、「ホモダイン検波法によるスピントルク検出の高精度化に関する研究」と題し、全 7 章より構成されている。スピントルクとは、伝導電子と局在電子の間でスピン角運動量を授受することにより、強磁性体の磁化を回転させる機構であり、高速・省電力な不揮発磁気メモリや論理演算素子への応用が期待されている。本論文では、スピントルクの定量評価に広く用いられるホモダイン検波法によるスピントルク検出に焦点を当て、その整流電圧スペクトルに含まれる様々なアーティファクト信号を定量化することにより、スピントルク測定を高精度化する研究を行った。 第 1 章は序論であり、スピントルクの概要とその検出に関する先行研究の背景と課題、本論文の目的が述べられている。第 2 章では、ホモダイン検波法によるスピントルク検出に関する基礎理論がまとめられている。第 3 章では、素子作製の方法と測定原理がまとめられている。 第 4 章では、磁気渦対の連成振動をホモダイン検波法により検出し、非一様な磁気構造に発生する非断熱スピントルクを高精度に見積もる手法を実証した。磁気渦対には、渦中心の重心運動と相對運動の組み合わせにより固有周波数の異なる 4 種類の連成振動モードが存在し、面内 2 方向のスピントルク、あるいは磁場トルクとそれぞれ結合する。そのため、スピントルクと磁場トルクを周波数領域で分離できる系として注目されていたが、連成振動モード実現に必要な対称性の良い磁気渦対の形成がこれまで困難だった。本論文では、強磁性 Ni-Fe 薄膜をひょうたん型に微細加工し、磁気渦対の中央に現れるダイヤモンド型磁区をピン止めすることにより、再現性良く連成振動モードを励起することに成功した。さらに、得られた連成振動モードの整流電圧スペクトルの強度と固有周波数から非断熱スピントルクを見積もることができること、および磁気渦対のコア半径を変化させることにより、起源の異なる 3 種類の非断熱スピントルクを分離できる可能性を示した。 第 5 章では、外部スピン流が一様な磁気構造に作用する場合のスピントルクを測定するスピントルク強磁性共鳴(ST-FMR)法の高精度化について述べている。この方法では、整流電圧スペクトルの対称・反対称成分の強度比から、スピントルク効率ξ_{FMR}を求める。一方、スピン流生成に用いる電流が作る面直磁場成分も対称・反対称成分の強度比に影響を与えるため、これがξ_{FMR}の不確かさを生む。本論文では、整流電圧スペクトルの外部磁場印加角依存性を詳細に分析することにより、面直磁場成分が無視できない場合でもξ_{FMR}を高精度に決定できることを実証した。さらに、従来のアーティファクト効果では説明できない低周波領域での整流電圧スペクトルの増大を発見し、正確なξ_{FMR}の決定に必要な周波数条件を明らかにした。 第 6 章では、第 5 章で開発した手法を用いて、電気伝導率がナノメートルスケールで傾斜した Si/Al 接合界面が作るスピン流によるスピントルクを測定した。その結果、スピン軌道相互作用(SOI)が弱い Si と Al を用いているにもかかわらず、代表的な強 SOI 材料である Pt の 3 倍以上のスピントルクが発生することを発見した。また、スピントルク効率は、Si/Al 界面の傾斜幅減少に伴い増加する一方、傾斜幅ゼロの界面では急減することが分かった。さらに、SOI に由来するスピンホール効果とは異なり、電流とスピン流の変換が極めて非相反的であることを発見した。これらは、Si/Al 傾斜材料がスピンホール効果とは異なる機構によりスピン流を生成することを示唆しており、スピン流生成材料の開発に大きく貢献する成果である。 第 7 章では、本論文の結果をまとめて結論を述べている。 以上、本博士論文はナノスケール磁性体の非線形磁化ダイナミクスの高効率な励起、検出、制御に関する新規の知見を得たものであり、スピントロニクス基礎物理、工学応用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 5697 号	氏 名	西村 健太郎
主論文題名：			
回転するバリオン物質におけるトポロジカル項と π^0 中間子と η' 中間子の カイラルソリトン格子状態			
有限温度・有限密度における量子色力学（Quantum Chromodynamics, QCD）の相構造を理解することは、素粒子標準模型の未解決問題の一つである。近年、高温・高密度物質に加えて、高速で回転する QCD 物質が注目されている。実際、2017 年に Relativistic Heavy Ion Collider における非中心重イオン衝突実験によって生成された物質は、これまで地上で実現された最大の渦度を持っており、一秒間に約 10^{22} 回転していると報告された。一般的にクォークのような相対論的なカイラルフェルミオンで構成された物質を回転させると、回転軸に沿った方向に粒子数カレントである「カイラル渦効果（Chiral Vortical Effect, CVE）」が現れる。CVE は相対論的な場の量子論において、理論の古典的に持つ軸性対称性が量子効果によって破れるカイラルアノマリーや、理論の持つトポロジ的性質と密接に関係している。しかしながら、回転する QCD 物質の相構造に対するこれまでの解析では、このような CVE に関するトポロジの効果が無視されていた。 本博士論文では、CVE に対するトポロジカル項を QCD の低エネルギー有効理論の枠内で導出し、この新しいトポロジカル項によって、十分速く回転する QCD 物質において従来の基底状態が不安定になることを示した。まず、CVE の輸送係数がトポロジカルな性質によってエネルギースケールに依らず厳密であることに着目し、QCD の低エネルギー自由度である中間子に対して、CVE を再現する新しいトポロジカル項を導出した。一つは有限バリオン化学ポテンシャルの場合の η' 中間子に対するトポロジカル項で、もう一つは有限バリオン・アイソスピン化学ポテンシャルの場合の π^0 中間子のトポロジカル項である。 次に、回転する QCD 物質で現れるトポロジカル項を考慮した低エネルギー有効理論を用いて、十分速く回転する QCD 物質の基底状態がトポロジカル数を持つ周期構造を示し、同時にパリティ対称性を自発的に破る「カイラルソリトン格子（Chiral Soliton Lattice, CSL）」と呼ばれる状態であることを解析的に示した。特に、η' 中間子の CSL は低密度のハドロン相と高密度のカラー超伝導相両方で生じ、これらの対称性の破れのパターンが一致することから二つの相は相転移なしにつながると予想した。これはクォーク・ハドロン連続性の回転系への拡張を与えている。さらに、新しいトポロジカル項の物理的帰結として、バリオン化学ポテンシャルの勾配と垂直方向にエネルギー流が生じる異常ホール効果や、系を回転させることで磁化が生じる（またはその逆の）角運動量と磁化の間の交差応答を導出した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5697 号	氏 名	西村 健太郎
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士（理学） 山本 直希
	副査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 能崎 幸雄
		慶應義塾大学専任講師	博士（理学） 檜垣 徹太郎
		慶應義塾大学准教授	博士（数理科学） 服部 広大
学士（理学）、修士（理学）西村健太郎提出の学位請求論文は、「回転するバリオン物質におけるトポロジカル項と π^0 中間子と η' 中間子のカイラルソリトン格子状態」と題し、全 8 章より構成されている。 有限温度・有限バリオン密度における量子色力学 (QCD) の相構造を理解することは、素粒子の標準模型の未解決問題の一つである。近年、高温・高密度だけでなく、高速で回転する QCD 物質が実験的にも理論的にも精力的に調べられている。2017 年には、Relativistic Heavy Ion Collider における重イオンの非中心衝突実験で生成された QCD 物質が、これまでに地上で実現された最大の渦度（約 $10^{22}/s$）を有すると報告された。一方、これまでの理論研究では、回転する QCD 物質の相構造についてモデル計算しかなく、QCD 自体に基づいた解析は皆無であった。著者は本論文において、QCD に基づく系統的な解析によって、回転する QCD 物質に特有のトポロジカル項が存在することを初めて明らかにし、この新しい項によって十分速く回転する QCD 物質における従来の基底状態が不安定になることを理論的に示した。 第 1 章は序論であり、有限温度・有限密度、および回転する QCD 物質の研究の現状と、本研究の概要が述べられている。第 2 章では、QCD の基本的性質と相構造、および本研究で用いる QCD の理論的枠組みである低エネルギー有効理論について説明されている。第 3 章では、本研究で新たなトポロジカル項を導出する際に重要になる概念である量子論的な対称性の破れ（アノマリー）が説明されている。第 4 章では、磁場中や回転する系におけるカイラル輸送現象であるカイラル磁気効果とカイラル渦効果、およびそのアノマリーとの関係性が述べられている。 第 5 章では、カイラル渦効果の輸送係数がトポロジカルな性質によって厳密であることに着目し、回転する QCD 物質におけるトポロジカル項を低密度のハドロン相と高密度のカラー超伝導相それぞれの低エネルギー有効理論に対して導出している。 第 6 章と第 7 章では、回転する QCD 物質で現れるトポロジカル項を考慮した低エネルギー有効理論を用いて、回転が十分速い場合の基底状態がトポロジカル数を持ち、空間の並進対称性とパリティ対称性を自発的に破るカイラルソリトン格子 (CSL) 状態になることを解析的に示している。第 6 章では、有限アイソスピン化学ポテンシャルと有限バリオン化学ポテンシャルの場合に基底状態が π^0 中間子の CSL になること、第 7 章では有限バリオン化学ポテンシャルのみの場合に基底状態が η' 中間子の CSL になることを明らかにしている。特に、η' 中間子の CSL は低密度のハドロン相と高密度のカラー超伝導相の両方で現れ、両者の対称性の破れ方が一致することから、二つの相は相転移なしに連続的につながっているという新しい予想を提唱している。これは、従来の「クォーク・ハドロン連続性」仮説の回転系への拡張を与えるものである。さらに、新しいトポロジカル項によって生じる別の現象として、バリオン化学ポテンシャルの勾配と垂直方向にエネルギー流が生じる異常ホール効果や、角運動量と磁化の間の交差応答を導出している。 第 8 章では、本論文の結果と今後の展望がまとめられている。 以上のように、本研究は、回転する QCD 物質のトポロジカル項、およびその結果現れる QCD の新しい相構造を明らかにした。特に、本研究は、回転する QCD 物質に対するこれまでのモデル計算とは異なり、初めて QCD に基づいた系統的な理論的解析を与えており、高エネルギー物理学の関連分野で学術上貢献するものとして高く評価できる。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 5698 号	氏 名	板井 駿
主論文題名： Self-standing <i>in vitro</i> multi-layered blood vessel model reproducing immunological tissue deformation (免疫応答による組織変形を再現した自立型多層人工血管モデル)			
血管の生化学反応は人体の免疫応答において重要な役割を果たしており，様々な病気に深く関与している．そのため，生体内組織を模倣した <i>in vitro</i> 血管モデルの構築が，病理解明・薬効試験等の医療分野から大きく注目を集めている．しかしながら，これまでに報告されているモデルは血管の生化学応答下での変形を正しく再現できていない．その原因は，柔軟性を欠いた足場材料に組織が固定されていることにある．これにより，応答下での血管の変形が阻害され，その挙動が生体組織と乖離してしまっている． そこで本研究では，炎症メディエータ由来の血管の変形現象を再現するため，自在に変形可能な自立型多層人工血管モデルを提案する．外部からの固定を受けず自立した多層のコラーゲングルチューブ内で血管組織を構築することにより，生化学応答下で血管組織が自在に変形し，細胞および組織双方のレベルでの収縮および弛緩挙動の再現を実現可能である．また，内皮層の外側に円周方向に配向した平滑筋層を構築することで，血管内皮層と平滑筋層双方の免疫応答変形反応を再現可能である． 第 1 章では，本研究の背景および目的，提案する人工血管モデルについて述べる． 第 2 章では，多層コラーゲングルチューブデバイスの構築を行う．まず，簡便な繰り返しモールドイング法により，高い精度でコラーゲングルチューブの作製を行う．デバイス内に血管内皮層を構築し，内皮のバリア機能の評価により血管内皮の組織化を確認する．さらに，血管周皮細胞との共培養試験を行うことで，細胞間相互作用による血管内皮の応答性を評価する． 第 3 章では，血管内皮を組織化させたチューブデバイスを用いて，免疫応答による変形反応の再現を行う．アレルギーに関わる炎症メディエータであるヒスタミンを作用させることで，血管内皮の細胞および組織双方の収縮や回復反応の再現を行う．また，抗ヒスタミン薬の成分であるオロパタジン塩酸塩をヒスタミンと同時に曝露することで，薬効試験への有用性の評価も行う．加えて，ヒスタミン曝露時の変形挙動を元に有限要素法を用いた数値解析を行うことで，血管内皮の収縮力を算出する． 第 4 章では，円周方向に配向した血管平滑筋層を持つ血管モデルの構築を提案する．具体的には，軸方向に配向したファイバ状平滑筋組織を巻き上げることで，コラーゲングルチューブ内に簡便に円周方向に配向した平滑筋層を持った血管モデルを構築する手法を提案する（巻き上げ成熟モールドイング法）．平滑筋組織の配向性は，アクチン染色によるライブイメージングを用いて評価する．構築された内皮と平滑筋が共培養された組織を用いて，ヒスタミンに起因する共培養組織の免疫応答変形反応の再現を行う． 第 5 章では，本論文で提案した自立型多層人工血管モデルの有用性および展望について議論し，本研究の成果を要約する．			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5698 号	氏 名	板井 駿
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学教授	博士（情報理工学）	尾上 弘晃
副査	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	宮田 昌悟
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	須藤 亮
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	竹村 研治郎
学士（工学）、修士（工学）板井駿君提出の学位請求論文は「Self-standing <i>in vitro</i> multi-layered blood vessel model reproducing immunological tissue deformation」（免疫応答による組織変形を再現した自立型多層人工血管モデル）と題し、5章から構成されている。 血管の生化学反応は人体の免疫応答において重要な役割を果たしており、様々な病気に深く関与している。そのため、生体内組織を模倣した <i>in vitro</i> 血管モデルの構築が、病理解明・薬効試験等の医療分野から大きく注目を集めている。しかしながら、これまでに報告されているモデルは血管の生化学応答下での変形を正しく再現できていない。その原因は、柔軟性を欠いた足場材料に組織が固定されていることにある。これにより、応答下での血管の変形が阻害され、その挙動が生体組織と乖離してしまっている。そこで本研究では、炎症メディエータ由来の血管の変形現象を再現するため、自在に変形可能な自立型多層人工血管モデルを提案する。外部からの固定を受けず自立した多層のコラーゲンゲルチューブ内で血管組織を構築することにより、生化学応答下で血管組織が自在に変形し、細胞および組織双方のレベルでの収縮および弛緩挙動の再現を実現可能である。 第1章では、本研究の背景および提案する人工血管モデルについて述べている。 第2章では、多層コラーゲンゲルチューブデバイスの構築法を提案している。簡便な繰り返しモールドイング法により、高い精度でコラーゲンゲルチューブの作製が可能であることを示している。さらにデバイス内に血管内皮層を構築し、内皮のバリア機能の評価により血管内皮の組織化を確認している。 第3章では、血管内皮を組織化させたチューブデバイスを用いて、免疫応答による変形反応について実験的に再現を行っている。アレルギーに関わる炎症メディエータであるヒスタミンを作用させることで、血管内皮の細胞および組織双方の収縮や回復反応を達成している。また、抗ヒスタミン薬の成分であるオロパタジン塩酸塩をヒスタミンと同時に曝露することで、薬効試験への有用性を評価している。 第4章では、円周方向に配向した血管平滑筋層を持つ血管モデルの構築を提案している。軸方向に配向したファイバ状平滑筋組織を巻き上げることで、コラーゲンゲルチューブ内に簡便に円周方向に配向した平滑筋層を持った血管モデルの構築に成功している。構築された内皮と平滑筋が共培養された組織を用いて、ヒスタミンに起因する共培養組織の免疫応答変形反応の再現している。 第5章では、本論文で提案した自立型多層人工血管モデルの有用性および展望について議論し、本研究の成果を要約している。 以上要するに、本論文では免疫応答による血管組織の変形を再現した人工血管モデルの構成論を提示するとともに、その機能に関して実験的に有効性を実証しており、組織工学・再生医工学分野において、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 5699 号	氏 名	柵木 光
主論文題名：			
陽極酸化ナノチューブアレイと半導体ナノ粒子との複合体形成 および気相光触媒水素生成			
半導体光触媒を用いた水素生成は、他の水素製造技術と比較して材料コストや装置の設置と維持に係る費用が安価で済むことから、次世代の水素エネルギー源として大いに注目されているが、実用化が見込めるような十分な水素生成効率は未だ得られていない。そのため、半導体光触媒における可視光応答性の増強や光誘起電荷キャリアの分離機構の解明が、水素製造の高効率化に向けた重要課題となっている。本研究では、水分解用光触媒として反応比表面積が大きい半導体ナノチューブアレイ構造を採用し、その表面に水素生成用光触媒の半導体ナノ粒子を堆積させてナノ複合体を形成することで、可視光応答型光触媒の高性能化を目指した。また、一連のナノ複合体光触媒に対して、これまでにほとんど実施例の無かった、高真空下での光触媒反応の実時間観測や可視光照射下での気相光触媒水素生成の評価を実施した。その結果を基に、ナノチューブアレイとナノ粒子との複合体における光触媒反応過程や光誘起電荷キャリアの分離機構に関する議論を行った。 第 1 章では、水素エネルギー社会実現に向けた様々な取り組みや水素製造技術の概要、光触媒研究開発の進展について詳述した後、本研究の目的と特徴について述べた。 第 2 章では、使用した光触媒材料、および試料の作製技術と評価技術について述べた。 第 3 章では、二酸化チタン (TiO_2) ナノチューブアレイ (TNT) と酸化銅 (Cu_2O) ナノ粒子に着目し、全電気化学手法を用いて両者の複合体を作製した後、高真空下での紫外光照射に伴う光触媒分解過程の観測を実施した。その結果、作製した複合体表面でのメタノール光分解において、正孔が 2 つの異なる経路で消費されると共に、Cu_2O ナノ粒子が高真空下においてもプロトン還元を助触媒として機能することを示した。 第 4 章では、酸化鉄 ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) ナノチューブアレイ (FNT) と Cu_2O ナノ粒子という、共に可視光応答性を有する組み合わせを対象に、全電気化学手法による複合体形成を実施し、可視光照射下での気相光触媒水素生成を検出するに至った。また、FNT と Cu_2O 界面での光誘起電荷キャリアの分離に、Z スキームが作用していることを見出した。 第 5 章では、Cu_2O の代替材料として有機系のグラファイト状窒化炭素 ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) に着目し、前駆体の熱縮合反応を用いたナノ粒子合成と TNT との複合体形成、および気相光触媒水素生成の評価を行った。その結果、紫外領域にのみ光吸収を示す TNT に対して、可視光に対する増感効果が生じることを示しただけでなく、TNT と $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 界面における光誘起電荷キャリアの分離においても、Z スキームが働いていることを見出した。また、第 4 章と第 5 章を通じて、陽極酸化ナノチューブアレイの光触媒機能における可視光応答性の向上、および貴金属フリーな材料系での可視光応答光触媒水素生成を実証した。 第 6 章では、結論として、本論文の要約と今後の展望について述べた。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5699 号	氏 名	柵 木 光
論文審査担当者： 主査 慶應義塾大学教授 博士（工学） 野田 啓			
副査 慶應義塾大学教授 博士（工学） 斎木 敏治			
慶應義塾大学教授 Ph. D. フォンス, ポール			
慶應義塾大学教授 博士（理学） 近藤 寛			
学士（工学）、修士（工学）柵木 光君提出の学位請求論文は「陽極酸化ナノチューブアレイと半導体ナノ粒子との複合体形成および気相光触媒水素生成」と題し、6 章から構成されている。 半導体光触媒を用いた水素生成は、他の水素製造技術と比較して材料コストや装置の設置と維持に係る費用が安価で済むことから、次世代の水素エネルギー源として大いに注目されているが、実用化が見込めるような十分な水素生成効率は未だ得られていない。そのため、半導体光触媒における可視光応答性の増強や光誘起電荷キャリアの分離機構の解明が、水素製造の高効率化に向けた重要課題となっている。本研究では、水分解用光触媒として反応比表面積が大きい半導体ナノチューブアレイ構造を採用し、その表面に水素生成用光触媒の半導体ナノ粒子を堆積させてナノ複合体を形成することで、可視光応答型光触媒の高性能化を目指している。また、一連のナノ複合体光触媒に対して、高真空下での光触媒反応の実時間観測や可視光照射下での気相光触媒水素生成の評価を実施し、その結果を基に、ナノチューブアレイとナノ粒子との複合体における光触媒反応過程や光誘起電荷キャリアの分離機構に関する議論を行っている。 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、使用した光触媒材料や、試料作製および評価技術について述べている。 第 3 章では、二酸化チタン（TiO_2）ナノチューブアレイ（TNT）と酸化銅（Cu_2O）ナノ粒子に着目し、全電気化学手法を用いて両者の複合体を作製し、高真空下での紫外光照射に伴う光触媒分解過程を観測した。その結果を基に、作製した複合体表面でのメタノール光分解において、正孔が 2 つの異なる経路で消費されると共に、Cu_2O ナノ粒子が高真空下でもプロトン還元を助触媒として機能することを論じている。 第 4 章では、酸化鉄（$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$）ナノチューブアレイ（FNT）と Cu_2O ナノ粒子という、共に可視光応答性の材料を対象に、全電気化学手法による複合体形成を実施し、可視光照射下での気相光触媒水素生成を検出した。また、FNT と Cu_2O 界面での光誘起電荷キャリアの分離に、Z スキームが作用していることを明らかにしている。 第 5 章では、Cu_2O の代替材料として有機系のグラファイト状窒化炭素（$\text{g-C}_3\text{N}_4$）に着目し、前駆体の熱縮合反応を用いたナノ粒子合成と TNT との複合体形成、および気相光触媒水素生成の評価を行っている。その結果に基づき、紫外領域にのみ光吸収を示す TNT に対して、可視光に対する増感効果が生じると共に、TNT と $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 界面における光誘起電荷キャリアの分離においても、Z スキームが働くことを示している。また、本論文での成果を基に、ナノチューブアレイとナノ粒子との複合体を対象として、光触媒水素生成における理想的な試料構造の提案を行っている。 第 6 章では、各章で得られた成果をまとめ、本論文全体の結論を述べている。 以上要するに、本論文では陽極酸化ナノチューブアレイと半導体ナノ粒子との複合体形成とその気相光触媒水素生成を通じて、陽極酸化ナノチューブアレイの光触媒機能における可視光応答性の向上、および貴金属フリーな材料系での可視光応答光触媒水素生成を示しており、半導体材料工学や光エネルギー変換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5700号	氏 名	長友 竜帆
主論文題名：			
触対象の物理特性とヒトの触覚認知情報統合のための触覚データマイニング			
近年バーチャルリアリティ（VR）の発展に伴い、VR空間における触覚の提示の研究が盛んとなっている。一方で、触覚は視聴覚と異なり、触対象の物理特性とヒトの触覚認知情報が対応付いていないため、擬似的に全ての触覚情報を提示できるような触覚ディスプレイは未だ開発されていない。そこで本研究では、触対象の物理特性およびヒトの触覚認知情報からなる大量のデータセットを構築し、ディープラーニング技術によってこれらの関係性を結びつける手法を提案した。しかし、この手法の実現には大きく2つの問題がある。触対象の材料特性において、ヒトの指腹部程度の大きさの剛性分布測定が困難である点、また、ヒトの触覚認知情報抽出において、被験者による官能評価を必要とするため、大規模なデータセットを構築することが困難な点である。 本論文の目的は、触対象の物理特性とヒトの触覚認知情報を結びつけるために双方における触覚データマイニング手法を確立することである。本論文では、ヒトの指腹部程度の範囲の剛性分布を測定できる触覚センサの開発、および世の中にアーカイブされたテキストコーパスから自然言語処理を用いてヒトの触覚認知情報を被験者実験なしに取得できる手法を提案した。 第1章では、触覚認知、データマイニング、触覚センサの先行研究を概説し、研究目的を述べた。 第2章では、ヒトの指腹部程度の範囲を測定可能な剛性分布測定センサの開発を行なった。具体的にはソフトリソグラフィ技術を用いて、液体金属を電極とした静電容量型3軸力センサを開発した。また、センサのボディ部であるポリジメチルシロキサンに対し、UV照射およびトルエン-エタノール希釈溶液による洗浄を行うことで寄生容量を低減し、センサ感度を向上する手法を提案した。さらに、センサに異なるヤング率をひずみゲージを搭載することで直接剛性測定を可能とする機構を提案した。 第3章では、世の中のアーカイブされたテキストコーパスと自然言語処理を用いてベクトル化（埋め込み）し、ベクトル化された触覚オノマトペを材料特性空間に写像することで触覚認知情報を抽出する手法を提案した。また、被験者認知のアンケートを正解データとして、本手法の妥当性を検証し、さらに本オノマトペ埋め込み表現を主成分解析することで、ヒトの触覚認知における新たな知見を見出した。 第4章では、研究成果を要約し、本手法が触覚提示研究に及ぼす影響について論じ、本研究の提案する触覚データマイニングの展望について論ずることで本論文の結論とした。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5700 号	氏 名	長友 竜帆
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 三木 則尚
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士 萩原 将文
		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） 加藤 健郎
学士（工学）、修士（工学）長友竜帆君提出の学位請求論文は、「触対象の物理特性とヒトの触覚認知情報統合のための触覚データマイニング」と題し、4章から構成されている。 近年バーチャルリアリティ（VR）の発展に伴い、VR空間における触覚提示技術が求められている。しかし、触覚は視聴覚と異なり、触対象の物理特性とヒトの触覚認知情報に対応付けられていないことが、任意の触覚情報提示を可能とする触覚ディスプレイ開発の障壁となっている。この対応は、触対象の物理特性、およびヒトの触覚認知情報からなる大量のデータセットを構築し、ディープラーニングを適用することで導出できると考えられる。 本論文の目的は、触対象の物理特性とヒトの触覚認知情報に対応させるために、双方における触覚データマイニング手法を確立することである。そのために、ヒトの指腹部程度の範囲の剛性分布を測定できる触覚センサの開発、およびこれまでにアーカイブされたテキストコーパスから、自然言語処理を用い、ヒトの触覚認知情報を被験者実験なしに取得する手法の提案を行っている。 第1章では、触覚認知、データマイニング、触覚センサの先行研究を概説し、研究目的を述べている。 第2章では、ヒトの指腹部程度の範囲を測定可能な剛性分布測定センサとして、液体金属を電極とした静電容量型3軸力センサを提案、その評価を行っている。その開発過程で、センサのボディ部材料であるポリジメチルシロキサンに対し、紫外線照射およびトルエン・エタノール希釈溶液による洗浄を行うことで、寄生容量を低減し、センサ感度を向上する手法を確立している。さらに、異なるヤング率を有するひずみゲージを組み込むことで、変位に依存せず、直接剛性を測定可能な機構を提案している。 第3章では、アーカイブされているテキストコーパスを、自然言語処理を用いてベクトル化し、その中でベクトル化された触覚オノマトペを材料特性空間に写像することで、触覚認知情報を抽出する手法を提案している。本手法の妥当性を、被験者による触覚認知に関するアンケートを正解データとして用い、検証している。さらにベクトル空間に埋め込まれた触覚オノマトペの主成分分析結果が、触覚認知における心理的基底であることを示唆するなど、ヒトの触覚認知に関する新たな知見を得ている。 第4章では、本研究の成果を総括し、今後の展望について述べている。 以上要するに、本論文は触対象の物理特性とヒトの触覚認知情報に関して、新たな触覚データマイニング手法を提案し、その有効性を示したものであり、人間工学、マイクロ・ナノ工学、情報工学の分野において工学上、工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第5701号	氏 名	松村 善洋
主論文題名：			
次世代高速鉄道のための無線通信システムに関する研究			
新幹線をはじめとする高速鉄道の世界的な広がりと共に、高速鉄道の車内から地上へのデータ通信に求められるニーズは今後更に高まる傾向にある。このため、高速に移動する鉄道においての地上車上間通信インフラを高速化することは重要な課題である。しかし、高速走行する新幹線において、安定して大容量の通信を確保するのは大変困難な課題である。現在の列車無線が利用するLCX（漏えい同軸ケーブル）は400MHz帯を用いているが、この帯域は各種無線局により混雑しており10MHz以上の帯域を確保するのは大変難しい。そのため、周波数帯域を比較的確保しやすいミリ波を新幹線システムに適用することが考えられるが、ミリ波は直進性が高く、降雨減衰が大きいことが課題である。 また、新幹線の高速化につれて騒音が大きくなるため、新しい新幹線車両は様々な空力改善の工夫によって、高速走行が実現されている。そのような中、新幹線の先頭車両の屋根上に設置された静電アンテナの空力抵抗の低減が求められており、もう一つの課題である。 本研究においては、これらの新幹線における無線通信の課題の解決するため、新幹線列車無線システムに対するミリ波の適用に向けてそのシステム構成を提案すると共に、新幹線走行騒音の原因の一つである新幹線静電アンテナの形状改善策を提案することを目的とした。 第1章に、本研究の背景と研究の位置づけを概説した。 第2章では、新幹線静電アンテナの低騒音化について検討した。折返しモノポール構造と並列共振回路の採用により、本アンテナを小型化することを検討し、新型静電アンテナを製作した。本新型静電アンテナの有効性を計算と測定により実証し、また、降雨・積雪に対する影響を実験と計算で確認した。 第3章で、新幹線環境におけるミリ波伝搬環境の解明について検討した。曲線区間における45GHz帯における実測伝搬測定結果とレイトレースシミュレーションとの比較を行った。 第4章では、新幹線に適用するミリ波列車無線システムの構成について提案した。新幹線ミリ波列車無線システムとしての、セルを構成する周波数配置やセル間ハンドオーバーなど実用化を想定したシステム構成の検討と、それに伴う曲線区間における基地局配置を検討した。 第5章に、東海道新幹線N700S確認試験車による走行試験結果を記載している。第2章で試作した新幹線用の新型静電アンテナと、第4章で検討、試作した新幹線ミリ波列車無線システムについて、東海道新幹線N700S確認試験車に搭載し、走行試験によりその性能を検討し、要求性能を満足することを確認した。 第6章に、結論として各章で得られた内容をまとめ、本研究の成果を要約した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5701 号	氏 名	松村 善洋
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	眞田 幸俊
副査	慶應義塾大学教授	工学博士	笹瀬 巖
	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	久保 亮吾
	京都大学大学院准教授	博士（工学）	村田 英一
学士（工学）、修士（工学）松村善洋君提出の学位請求論文は「次世代高速鉄道のための無線通信システムに関する研究」と題し、6章から構成されている。 新幹線をはじめとする高速鉄道の世界的な広がりと共に、高速鉄道の車内から地上へのデータ通信に求められるニーズは今後更に高まる傾向にある。このため、高速に移動する鉄道においての地上車上間通信インフラを高速化することは重要な課題である。そこで、周波数帯域を比較的確保しやすいミリ波を新幹線システムに適用することが考えられるが、ミリ波は直進性が高く、降雨減衰が大きいことが課題である。また、新幹線の高速化につれて騒音が大きくなるため、新しい新幹線車両は様々な空力改善の工夫によって、高速走行が実現されている。そのような中、新幹線の先頭車両の屋根上に設置された静電アンテナの空力抵抗の低減が求められている。 本研究においては、これらの新幹線における無線通信の課題を解決するため、新幹線列車無線システムに対するミリ波の適用に向けてそのシステム構成を提案すると共に、新幹線走行騒音の原因の一つである新幹線静電アンテナの形状改善策を提案することを目的としている。 第1章では、本研究の背景と研究の位置づけを概説し、その目的を述べている。 第2章では、新幹線静電アンテナの低騒音化について検討している。折返しモノポール構造と並列共振回路によりアンテナを小型化することを検討し、新型静電アンテナを製作している。そして提案アンテナの有効性を計算と測定により実証している。 第3章では、新幹線環境におけるミリ波伝搬環境の解明について検討している。曲線区間における45GHz帯における実測伝搬測定結果とレイトレースシミュレーションとの比較を行っている。 第4章では、新幹線に適用するミリ波列車無線システムの構成について提案している。セルを構成する周波数配置やセル間ハンドオーバーなど実用化を想定したシステム構成の検討と、それに伴う曲線区間における基地局配置を検討している。 第5章では、東海道新幹線 N700S 確認試験車による走行試験結果を記載している。第2章で試作した新幹線用の新型静電アンテナと、第4章で検討、試作した新幹線ミリ波列車無線システムについて、東海道新幹線 N700S 確認試験車に搭載し、走行試験によりその性能を検討し、要求性能を満足することを確認している。 第6章では、結論として各章で得られた内容をまとめ、本研究の成果を要約している。 以上要するに、本論文では新幹線列車無線システムに適用するミリ波無線システムの構成を提案すると共に、新幹線静電アンテナの形状改善策を提案し計算機シミュレーションと実験の双方からその有効性を実証しており、無線通信工学分野において、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5702号	氏 名	霧生 拓也
主論文題名：			
フォワードルッキングなリターン分布の資産運用への応用			
本研究の目的は、オプション価格から推定したフォワードルッキングなリターン分布の資産運用への応用方法を検討し、その有効性を実証的に検証することである。 資産運用においてはフォワードルッキングな視点を意思決定プロセスに反映することが重要である。しかし、フォワードルッキングなリターン分布を推定する方法は少なく、実務ではヒストリカルデータから推定したバックワードルッキングな分布が利用されることが多いのが現状である。近年になって、複数満期のオプション価格データからフォワードルッキングな分布を推定可能にする定理（Recovery Theorem, RT）が示された。本研究ではフォワードルッキングな分布を、運用プロセスを構成する要素である資産配分およびパフォーマンス分析に応用する方法を検討する。 まず、資産配分におけるフォワードルッキングな分布の利用を検討する。1つのリスク資産と無リスク資産の2資産を対象とした資産配分問題において、フォワードルッキングな分布を利用した場合と、ヒストリカルデータを用いて推定した分布を利用した場合のパフォーマンスを比較し、フォワードルッキングな分布はヒストリカルデータを利用した分布よりも高いパフォーマンスが獲得できることを示す。さらに、その高いパフォーマンスは将来見通しに基づく投資比率の動的な変更を通して獲得していることを明らかにする。また、伝統的4資産を対象にした資産配分問題においてRTを適用することが難しい債券のフォワードルッキングな分布推定方法を提案し、その有効性を示す。 次に、パフォーマンス分析への応用としてフォワードルッキングな推定値に基づいてリターンを要因分解する新たな方法を提案する。提案法は分解にヒストリカルデータやアナリスト予想データを利用する必要がなく、従来の方法では難しかった短期リターンの変動要因を分解できる点が大きな特徴である。提案法を用いてS&P 500指数の日次リターンを分析した結果から、リターンの分散の約8割がキャッシュフロー要因で説明できることを示す。また、金融イベント（FOMC）が日次リターンに与える影響についても分析を行う。 本研究を通して得られた成果は、資産運用にフォワードルッキングな視点を組み込むことの重要性を示すものであり、投資家が運用プロセスの高度化の方向性を検討する上で非常に重要な知見になるものと考えられる。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5702 号	氏 名	霧生 拓也
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 枇々木 規雄
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 今井 潤一
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 山本 零
		東京経済大学教授	Ph. D 小暮 厚之
学士（工学）、修士（工学）の霧生 拓也君提出の学位請求論文は「フォワードルッキングなりターン分布の資産運用への応用」と題し、全 6 章より構成されている。資産運用においてはフォワードルッキングな視点を意思決定プロセスに反映することは重要な課題のひとつである。しかし、フォワードルッキングなりターン分布(FL 分布)を推定する方法は少なく、現状の実務ではヒストリカルデータから推定した分布が利用されることが多いという課題があった。そのような中で近年、複数満期のオプション価格データから FL 分布を推定可能にするリカバリー定理（RT）が示された。そこで霧生君は、FL 分布を運用プロセスを構成する要素である資産配分およびパフォーマンス分析に応用する方法を提案している。まず、資産配分問題においては、1 つのリスク資産と無リスク資産の 2 資産を対象として、FL 分布を利用した場合にヒストリカルデータを利用した分布よりも高いパフォーマンスが獲得できることを示すとともに、それは将来見通しに基づく投資比率の動的な変更を通して獲得していることを明らかにした。さらに、伝統的 4 資産を対象にした資産配分問題において RT を適用することが難しい債券のフォワードルッキングな分布推定方法を提案し、その有用性を示した。次に、パフォーマンス分析への応用として、従来の方法では難しかった短期リターンの変動要因を分解できる新たな方法を提案した。S&P500 指数の日次リターンを分析し、リターンの分散の約 8 割がキャッシュフロー要因で説明できることを示すとともに、金融イベントが日次リターンに与える影響も明らかにした。 第 1 章では、本論文の背景と目的・貢献、論文構成とその関係を述べている。 第 2 章では、本論文の特徴である FL 分布を推定可能にするリカバリー定理および関連した先行研究について述べている。 第 3 章では、資産配分への応用として、1 つのリスク資産と無リスク資産の 2 資産を対象にした分析を行い、FL 分布の有用性を明らかにしている。 第 4 章では、債券の FL 分布の推定方法を提案し、実務で対象とする伝統的 4 資産の資産配分問題に対してもこの方法論が有用であることを示している。 第 5 章では、短期リターンの変動要因の分解が可能なパフォーマンス分析の方法を提案し、分析を行っている。これは FL 分布でしかできない分析方法であり、資産運用実務へのさらなる貢献が期待できる。 最後に第 6 章では、本論文のまとめと今後の課題を述べている。 以上要するに、本研究においては、FL 分布を応用した資産配分およびパフォーマンス分析方法を提案し、様々な分析を通して、資産運用にフォワードルッキングな視点を組み込むことの重要性を定量的に明らかにした研究成果をまとめたものであり、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5703号	氏 名	本田 裕
主論文題名：			
深層学習を用いた一階述語論理による推論に関する研究			
従来の人工知能による記号推論は、人が中身を解釈することは容易であるが、ビッグデータに含まれるデータの曖昧性に対処することは困難である。他方で、深層学習はデータの曖昧性に対して頑健であるものの、人が中身を解釈することは困難である。そこで本研究では、従来の人工知能による記号推論と深層学習の手法を融合することにより、ビッグデータを扱うことが可能な頑健性と解釈可能性の両方を備える推論手法を確立することを目的とする。 前述の推論手法を確立するために、曖昧性を含む大量のデータから知識ベースを構築し、それを一階述語論理で表現を行い、深層学習により学習を行う。具体的には、(1) Web上のデータから構築した知識ベースをもとに演繹推論を行う手法、(2) Web上のデータから構築した知識ベースをもとに類推を行う手法、(3) 学習済みの深層強化学習モデルから構築した知識ベースをもとに演繹推論を行う手法によって実現する。 第1章では、本研究の目的と位置づけについて述べるとともに、深層学習による記号推論に関連する研究について概説する。 第2章では、前記(1)の手法を提案するとともに、質問応答システムに組み込むことでその実用性を示す。評価実験を通して、提案手法は高い表現力を備え、未学習の記号が含まれていた場合でも解を導くことを可能とし、小規模なデータからも学習が可能であることを示す。 第3章では、前記(2)の手法を提案する。評価実験を通して、既学習の規則から未学習の規則を効率良く類推可能なことを示す。提案手法は深層学習を用いて一階述語論理による類推を行う初めての事例である。 第4章では、前記(3)の手法を提案する。評価実験を通して、学習済みの深層強化学習モデルが記号表現を用いたモデルによって高い一致率で再現可能なことを示す。提案手法は人とコミュニケーション可能なエージェントを構築する初めての事例である。 第5章では、本研究において取り組んだ深層学習を用いた一階述語論理による推論の研究成果をまとめる。また、今後の展望と課題についても述べる。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5703 号	氏 名	本田 裕
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士 萩原 将文
	副査	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（情報学） 杉浦 孔明
		慶應義塾大学名誉教授	博士（工学） 櫻井 彰人
学士（工学）、修士（工学）、本田裕君提出の学位請求論文は、「深層学習を用いた一階述語論理による推論に関する研究」と題し、全5章から構成されている。 従来の人工知能による記号推論では、人が推論過程を解釈することは容易である。しかしビッグデータに含まれるデータの曖昧性に対処することは困難である。これに対して深層学習はデータの曖昧性に対して頑健であるものの、推論過程の解釈は困難である。本研究は、従来の人工知能による記号推論と深層学習の手法を融合することにより、頑健性と解釈可能性の両方を備える推論手法を確立することを目的としている。 このような推論手法を確立するために、曖昧性を含む大量のデータから知識ベースを構築し、それを一階述語論理で表現を行い、深層学習により学習を行う新しい手法を提案している。具体的には、Web上のデータから構築した知識ベースをもとに演繹推論を行う手法、Web上のデータから構築した知識ベースをもとに類推を行う手法、そして、深層強化学習モデルの入出力から構築した知識ベースから演繹推論を行う手法の提案を行っている。 本論文における各章の内容は次の通りである。 第1章では、本研究の背景と目的を述べている。古典的な論理学に基づく推論、近代における記号論理研究、従来の人工知能、そして今日のニューラルネットワークを利用した記号推論について概観し、本研究の位置づけを明らかにしている。 第2章では、深層学習を用いて一階述語論理による演繹推論を行い、知識ベースから質問応答システムを構築する手法を提案している。単語分散表現の利用により、未学習のデータが含まれるような場合でも深層学習による演繹推論が可能となっている。 第3章では、深層学習を用いて一階述語論理による類推を行う手法を提案している。具体的には、既知の規則を含む知識ベースから未知の規則の推論、および大きな知識ベースからの未知の規則の効率的な抽出を可能としている。 第4章では、学習済みの強化学習モデルから記号表現を用いたモデルを再現し、人とのコミュニケーションを可能とするエージェントを提案している。人が解釈しやすく、表現しやすい知識表現に変換するために、強化学習モデルの入出力をファジィ化し、環境の状態とエージェントの行動を一階述語論理の規則として記述している。 第5章は結論であり、研究成果を要約すると共に、今後の展望や残された課題についても言及している。 以上要するに本研究は、深層学習による記号推論を行うことで、ビッグデータを扱うことを可能とするロバストで解釈可能な推論手法を提案し、その有効性を確認したものである。したがって本研究の成果は、工学上寄与するところが少なくない。また、これらの成果は、著者が研究者として自立して研究活動を行うために必要となる高度な研究能力、および豊かな学識があることを示したものとと言える。 よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

Thesis Abstract

Registration Number	“KOU” No. 5704	Name	Xu, Kangqian
Thesis Title Identification of Maximum Inter-Story Drift of Multi-Degree-of-Freedom Shear Structures Using Only One Accelerometer			
The inter-story drift estimation is one of the main aspects of structural health monitoring (SHM) since the inter-story drift can provide important evidence to assess structures. In our research, only one accelerometer is used in sensing network to simplify the SHM systems, reducing the installation and maintenance cost. First, the absolute acceleration and relative displacement are formulated in modal coordinates and a state-space representation is derived. Then a variant of the Kalman filter is introduced to achieve the task. Verified by a simple numerical simulation, the performance of the state-space equation and Kalman filter is satisfactory. However, when a multi-degree-of-freedom (MDOF) shear structure is excited by seismic excitation, the modal parameters of the system may shift and become unknown. It is not easy to accurately re-identify the changed unknown modal parameters from the response recorded by one sensor. In this case, this thesis presents methods to estimate the time histories of the relative displacement and maximum inter-story drift of the structure from the one measured absolute response. First, the cases where the connections between structural and non-structural members become loose or slight structural damages arise are considered. In the circumstances, the natural frequencies shift from their initial values that are identified from the healthy state of the structure, while the change of mode shapes and damping ratios are omitted. A scheme to reduce the error arising from shifts in the structural frequencies is devised that uses the genetic algorithm (GA) and a reasonably chosen fitness function. The results of numerical simulations and a laboratory experiment indicate that the proposed approach can accurately estimate the time histories of the relative displacements and maximum inter-story drifts of all floors of the structure in the case of a significant change in natural frequencies and a large search range of GA variables. Secondly, severe damage case of the structure is taken into account. At this point, the mode shapes significantly alter. If the mode shapes identified from the original system are still employed, a huge estimation error will arise. The GA with a reasonable fitness function is used to determine the unknown natural frequencies of the severely damaged structure, and the mode shapes are updated by solving a set of nonlinear equations with respect to each group of frequency variables in the GA. Verified by examples, the proposed method is capable of estimating the relative displacement and peak inter-story drift of the first floor even the structure is seriously damaged.			

The calculation based on the data of one sensor using a conventional method is unstable, and when modal coordinates are used, higher modes should be included, which is different from the estimation based on the responses recorded by many accelerometers. However, the parameters of the higher modes of structures are difficult to obtain from structures under small excitation. To overcome this difficulty, the recorded absolute acceleration is converted into the absolute displacement, and absolute displacement-based state-space expression is formulated. Then numerical simulations and a shaking-table experiment are conducted. The results indicate that the proposed method can accurately estimate the time histories of the relative displacements and maximum inter-story drift of all floors when one accelerometer is used and just the first two modal parameters are incorporated in the model.

審査の要旨

報告番号	甲 第 5704 号	氏 名	Xu, Kangqian
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	Ph. D. 三田 彰
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 高橋 正樹
		慶應義塾大学専任講師	博士（工学） 飯盛 浩司
		東北工業大学教授	工学博士 薛 松濤
B.S., M.S. Xu, Kangqian 君の博士学位請求論文は、「Identification of Maximum Inter-Story Drift of Multi-Degree-of-Freedom Shear Structures Using Only One Accelerometer（1つの加速度計のみを使用した多自由度せん断構造物の最大層間変形角の同定）」と題し、6章より構成されている。 本論文では、多自由度せん断構造物の最大層間変形角の同定に焦点を当てている。建物の床から直上階の床までの相対変位をその階高で割った層間変形角は、地震による建物の損傷程度を表す最も重要な指標である。その最大層間変形角をたった1つの加速度計のみを利用して、算出可能であることその論文は様々な条件下において可能であることを示した。多くのセンサを使うシステムが常識であった構造ヘルスマモニタリングの分野において1つの加速度計によって計測される特定フロアの応答データのみを利用して、安定して最大層間変形角を同定できる手法は独自のもので、博士号取得に十分なレベルの研究といえる。 第1章では、構造ヘルスマモニタリングと変位測定について簡単に紹介している。 第2章では、モード座標での絶対加速度と相対変位応答の関係について説明し、状態空間方程式を定式化し、この問題を解決するためにカルマンフィルタを導入している。 第3章では、1つの加速度計のみを使って未知の固有振動数を決定する手法について説明している。多自由度せん断構造物が強い地震によって変形すると固有振動数が変化するため、その固有振動数を同定し、それによって層間変形角の算出を達成するために、合理的な適合度関数を提案し、最適な固有振動数を決定する手法が提案された。 第4章では、固有振動数とモード形状がすべて変化して不明になる大きな損傷のケースについて説明している。損傷が大きくなるとモード形状も変化するため、GAを使ってモデルを更新している。その結果、1階の最大層間変形角を正確に求めることができることが示された。 第5章では、複数のセンサを使用して同定したケースと比較することで、1つの加速度計を使用した同定についての感度について説明している。加速度計の時刻歴を2回積分して求めた絶対変位に基づく定式化によって高次モードの寄与度が下がり、最初の2つのモードのみに基づくモデルであっても精度の高い同定が可能となることを示している。 第6章では、本論文全体をまとめた結論と今後の展望を述べた。 以上、要するに、本論文で提案された1つの加速度計を用いた最大層間変形角の同定アルゴリズムは、簡素で安価な構造ヘルスマモニタリングシステムの普及に貢献し、工学上寄与するところが少ない。また、社会的にも大きな貢献が期待される。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 5705 号	氏 名	角 晴美子
主論文題名： Proposal and Verification of Improvement Measures to Raise Operational Efficiency in Distribution Centers (物流センターの作業効率の向上に向けた改善方策の提示とその性能検証)			
近年、物流センターの役割が大きく変化し拡大してきている。かつての物流センターは「収益を生まないコストセンター」として捉えられていたが、工場等における効率改善の限界を受けて、サプライチェーン全体の改善・改革が求められている。更に、インターネットの発達により情報伝達の速度が上昇した結果、物流センターの効率性がサプライチェーンの競争力の源泉となってきた。本研究では、上記のように物流センターの効率性がサプライチェーン全体に及ぼす影響が拡大してきたことを背景に、その作業効率の向上に着目している。 本研究では、物流センターを通過型センターと在庫型センターの二種類に分類して改善方法の考察を進めている。前者は複数の生産者から受け取った商品を一時的に保管し、出荷先へ再分配する機能を担い、後者は予め商品を在庫として保管し、消費者の発注に応じてピッキングをして出荷する機能を担っている。これらの物流センターでの作業効率の改善方策を考察・提示すると共に、数理モデルを利用して商品の物流距離の観点を中心に改善方策の性能検証を行っている。 通過型センターでの効率改善に関しては、商品の入庫日と出庫日の情報に基づいて商品の保管位置を決定する方法を考察した。研究の前半部分では商品の入庫日と出庫日の情報が既知である状況を想定し、商品の保管位置を決定する貪欲法の性能評価、更に移動距離の短縮観点以外の性質を明らかにした。後半部分ではそれらの情報が逐次的に分かっていく状況を想定し、入庫日順に商品を保管する貪欲法を改良することによって商品の保管位置を決定する方法を考察した。 在庫型センターでの効率改善に関しては、フロア・レイアウトの変更とクラス別ロケーション管理の導入について考察を実施した。研究の前半部分では①従来のフロア・レイアウトに斜めの通路を追加し、入出庫口から直接的に商品の保管位置への訪問を可能にする方法、②物流センターにおける商品の入出庫口の移動により商品の物流経路を改善する方法、③商品管理を効率的に行うことを目的として商品を需要頻度に応じて数段階のクラスに区分して保管する方法の性能比較を実施した。後半部分では、それらの方法を同時に導入したときの性能検証を実施した。 以上、本研究では物流センターの効率化がサプライチェーン全体に及ぼす影響が強まっている近年の物流環境を踏まえた上で、物流センターにおける各種の改善方策が商品の物流効率の向上に与える影響について数理モデルを通じて評価を実施した。これらの結果は、物流センターにおいて効率改善を実施する際に、方策の選択を判断する際のひとつの示唆になると考えられる。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5705 号	氏 名	角 晴美子
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士（工学） 稲田 周平
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 松川 弘明
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 志田 敬介
		上智大学教授	博士（工学） 伊呂原 隆
学士（経済学）、修士（工学、経済学）の角晴美子君の学位請求論文では、「Proposal and Verification of Improvement Measures to Raise Operational Efficiency in Distribution Centers（物流センターの作業効率の向上に向けた改善方策の提示とその性能検証）」との題目のもとで、物流センターにおける作業効率の向上方策を提案すると共に、それらの有効性を定量的に評価している。 近年、商品に対する顧客満足度の向上に向けては、工場での生産性のみならず、サプライチェーン全体を見渡した中でシステムを改変していくことが強く求められている。このような中で、取り扱い商品数の急増や納入リードタイムの短縮要求等を受けて、物流センターの効率性を高めようとする動きが活発化している。本研究では、これらの物流センターを取り巻く環境の変化を受けて、センター内で行われる物流作業を効率化する方法を考察・提案している。更に、数理モデルを構築して、倉庫内での商品の物流距離の観点を中心に、提案した改善方法を定量的に評価している。 論文は全6章から構成されるが、本研究では、商品の物流形態の違いから、物流センターを“通過型センター”と“在庫型センター”の2種類に分類し、論文の前半と後半において、各センターでの作業効率の向上方策を議論している。 論文の前半では、複数の生産者から受け取った商品を一時的に保管し、出荷先へ再分配する機能を担う“通過型センター”を考察対象として、商品の保管位置の決定問題を取り扱っている。考察の前半部分では、計画期間内で取り扱われる全ての商品の入出庫日が既知である状況を想定したもとで、センター内での総物流距離を短縮するための最適解法と近似解法を提案している。従来研究では主に商品の保管期間に着目して考察がなされてきたが、本研究では、入出庫日の情報に着目した解法を提案し、その性能調査が行われている。更に、評価観点に商品の必要保管スペースを加えた中で、商品の入出庫日に着目して決定された解が持つ性質を、数学的な論証に基づいて明らかにしている。考察の後半部分では、入出庫日の情報が不確実となる実務での状況に接近する試みとして、時系列の中で商品の入出庫日が逐次的に判明する問題を考察している。商品の入庫日に着目して保管位置を決定する方法の欠点を補うために、商品の保管期間に関する閾値を設けて保管位置を決定する2つの方法を提案し、それらの有効性を調査した。また、閾値の決定方法を考察している。 論文の後半では、予め商品を在庫として保管し、消費者の発注に応じてピッキングを行い、顧客へ出荷する“在庫型センター”を考察対象としている。効率向上のための方策として、①物流センター内に敷設される通路の形状変更（斜め通路の活用）、②商品の搬入・搬出が行われる物流センターの入出庫口の位置変更、③商品の保管位置を管理する際の粒度変更（商品のクラス別管理の導入）を想定し、これらを実施した際の作業効率への影響を調査している。従来研究では、これらの改善方策を個別のシミュレーションモデルの中で評価しており、シミュレーションモデルでの物流センターの形状や商品の収容能力が異なる問題が包含されていた。本研究では、この問題を解決するために、共通した物流センターの設定条件のもとで3つの方策を数理解析的に評価するモデルを構築し、方策の優位性や特徴を考察している。更に、上記の方策を複合的に採用した場合の効果を評価し、その有効性を示している。 以上、本研究では物流センターを、“通過型センター”と“在庫型センター”の2種類に分類した上で、それぞれのセンターでの作業効率の向上方策を提案し、その評価を定量的に行っている。示された結論は、物流センターの効率化に関する学術研究に対して貢献を有するばかりでなく、実務に対しても少なからぬ示唆を与えるものといえる。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第5738号	氏 名	赤星 太一
主論文題名：			
網羅的 Ca^{2+} イメージングから明らかにされたホヤ初期発生における運動神経細胞の役割			
カタユウレイボヤは脊椎動物などのモデル動物と比較して、個体サイズが小さい、細胞数が少ないなど発生研究における利点を多く持つ。一過的な Ca^{2+} 濃度上昇は数多くの発生現象に関与することが報告されているが、これまでの研究に用いられてきたモデル動物では個体サイズが大きく、細胞数が多いといった問題点から発生現象における Ca^{2+} 濃度上昇の機能を1細胞レベルで理解することは困難であった。本研究では胚全体を1細胞レベルで観察できるカタユウレイボヤを用いて、初期発生過程における Ca^{2+} 濃度上昇を網羅的に明らかにし、発生現象における Ca^{2+} 濃度上昇の機能を1細胞レベルで明らかにすることとした。 第1章は緒言である。背景として生体におけるカタユウレイボヤの利点、発生における Ca^{2+} 濃度上昇について述べ、最後に本研究の目的を述べた。 第2章では、ホヤ初期発生過程における Ca^{2+} 濃度上昇の網羅的特徴付けについて述べた。蛍光タンパク質型 Ca^{2+} センサーGCaMP6s をコードした mRNA をマイクロインジェクション法によりホヤ卵に導入し、Ca^{2+} 濃度上昇を網羅的に観察した。原腸胚期から後期尾芽胚期までの広範な Ca^{2+} イメージングにより、原腸胚、神経胚、尾芽胚など複数の発生段階、また表皮、中枢神経系、筋肉など複数の組織で Ca^{2+} 濃度上昇の時空間動態を明らかにした。 第3章では、第2章で明らかにされた Ca^{2+} 濃度上昇のうち、中期尾芽胚期における Ca^{2+} 振動に着目し、ホヤ発生中の Central Pattern Generator (CPG) でみられる Ca^{2+} 振動とリズムカルな尾部運動との関係について述べた。Ca^{2+} 振動は CPG を構成する単一の運動ニューロン MN2 (細胞系譜 A10.64) で見られた。また、Ca^{2+} 振動に伴い膜電位のバースト発火がみられた。さらに、バースト内の個々のスパイクは発生に伴い同側での1度の尾筋収縮と対応するようになることを見出した。最後にオプトジェネティクス実験により、MN2 の神経活動はリズムカルな初期尾部運動を引き起こすのに必要十分であるとわかった。以上のことから、CPG の発生中から単一運動神経細胞が初期胚の運動リズムを生み出し、初期の自発運動を制御することが示唆された。 第4章は結言である。本成果により明らかにされた、ホヤ初期発生過程における Ca^{2+} 濃度上昇、および単一運動神経細胞の自発運動における役割について、得られた結果の意義を述べた。さらに今後の展望について述べた。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5738 号	氏 名	赤星 太一
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士（理学） 堀田 耕司
	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（地球環境科学） 土居 信英
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 牛場 潤一
		慶應義塾大学准教授	医学博士 松本 緑
学士（理学）、修士（理学）赤星太一君提出の学位請求論文は、「網羅的Ca²⁺イメージングから明らかにされたホヤ初期発生における運動神経細胞の役割」と題し、全4章から成っている。 カルシウムイオン（Ca²⁺）は生体内の主要な陽イオンの1つで、様々な細胞内シグナル伝達に関与する優れた2次メッセンジャーである。脊椎動物初期発生過程の様々な発生ステージにおいて筋肉細胞や神経細胞などの興奮性の細胞だけでなく、非興奮性の細胞においてもCa²⁺濃度上昇が観察されることが報告されている。しかし脊椎動物を用いたこれまでの研究では、細胞運命が発生の早い時期から定まっていない、個体が大きく顕微鏡下で全体を細胞レベルで観察できない等の理由から、初期発生におけるCa²⁺濃度上昇の機能を1細胞レベルで理解することは困難であった。そこで本論文では脊椎動物に代わるモデル生物として、ホヤを用いた。ホヤは個々の細胞運命が発生初期から決まり、1細胞レベルで胚全体を観察できる。このようなホヤの利点を生かし、初期原腸胚期から後期尾芽胚期の、幅広い発生ステージでCa²⁺濃度上昇の特徴づけを行った。さらに、ホヤ胚遊泳前の発生の早い段階からみられる周期的なCa²⁺濃度上昇（Ca²⁺振動）を発見し、その機能解析を行った。 本論文の第1章は緒論であり、モデル生物カタウレイボヤの発生学研究における利点を紹介した後、2次メッセンジャーとしてのCa²⁺の特性や細胞内のシグナル伝達経路、発生におけるCa²⁺濃度上昇についての先行研究について紹介し、本研究の目的を述べている。 第2章では、ホヤ初期発生過程におけるCa²⁺濃度上昇の網羅的特徴付けについて述べている。蛍光タンパク質型Ca²⁺センサーGCaMP6sのmRNAをマイクロインジェクション法によりカタウレイボヤ卵に導入し、Ca²⁺濃度上昇を発生期の長時間にわたり網羅的に観察している。原腸胚期から後期尾芽胚期までの広範なCa²⁺イメージングにより、原腸胚、神経胚、尾芽胚の各発生段階でのCa²⁺濃度上昇の時空間動態を明らかにしている。また、3章で述べる研究につながる、ホヤ胚遊泳前の発生の早い段階からみられる数十秒周期のCa²⁺振動を見出したことについて述べている。 第3章では、運動神経節におけるCa²⁺振動とリズムカルな尾部運動との関係について解析している。このCa²⁺振動は単一の運動ニューロンMN2（細胞系譜A10.64）の自律的振動であったことを明らかにしている。また、MN2のCa²⁺振動は数十秒周期の初期の運動リズムを生み出すのに必要十分であり、MN2の膜電位変化が初期のホヤ胚の自発運動を制御することを明らかにしている。 第4章では、本研究を総括するとともに、運動神経回路の発生・進化について議論している。また、今後の展望として、遊泳期におけるMN2のリズム生成の分子機構や、左右交互に尾を振る運動を生み出す神経回路（中枢パターン生成器、CPG）の実態解明などの将来的な研究展開について述べている。 以上、本論文の著者は、ホヤ初期発生過程におけるCa²⁺濃度上昇の網羅的特徴付けに成功し、さらに運動神経細胞の初期発生における役割を明らかにすることで運動神経回路の発生機構の理解に大きく貢献したと言える。この研究は、MN2の遊泳期におけるCPGでの役割解明や、Ca²⁺振動の分子機構に迫ることで生物のもつ自律的な運動リズム生成機構解明に展開されうる成果であり、発生生物学・神経科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 5739 号	氏 名	田中 智樹
主論文題名：			
ノイズがある量子振幅推定法の解析と実験			
本論文は、全 7 章により構成される。 第 1 章では、本論文の研究背景と構成について説明する。特に、本研究で用いる量子振幅推定法の応用面での重要性、そして現在の量子コンピュータで実行しようとした場合の課題について大まかに述べる。 第 2 章では、本研究で用いる量子情報理論における基本事項について説明を行う。 第 3 章では、まず Brassard らによって提案された振幅推定法を説明する。これは、現在の古典的なコンピュータを用いる場合より計算量において二乗の優位性があることが知られており、量子コンピュータを用いることの優位性が保証されている手法の一つである。そして、この手法は振幅増幅法と位相推定法という二つの方法から構成されており、幾つもの量子ビットや多数のゲート操作の数が必要となることが知られている。他方、現在の量子コンピュータは、NISQ と呼ばれるような限られたハードウェアしかなく、振幅推定法の実行が困難である。そこで、振幅増幅法を並列的に実行し、量子コンピュータから得た結果を最尤推定で処理することで、位相推定法を用いない振幅推定法を提案する。結果、この最尤推定法を用いた振幅推定法では、量子ビットやゲート操作の数等の必要なリソースを大幅に減らすことができ、現在の量子コンピュータにおける振幅推定法の活用の一歩を進めたものである。そして、この手法の有効性をシミュレーションにより検証する。 第 4 章では、第 3 章で述べた最尤推定法を用いた振幅推定法を実際の量子コンピュータで実行する場合を述べる。現在の NISQ と呼ばれる実機では、ノイズがあるため、そのノイズによる影響を考える必要があるが、実際の量子コンピュータで起きているノイズを特定することは困難である。そこで、本章では、脱分極ノイズを仮定したモデルを構築し、たとえノイズがあつたとしても量子コンピュータの優位性を実現できる可能性について述べる。そして、実際の量子コンピュータを用いた結果からこのモデルが相応に妥当であることを述べる。また、推定するパラメータだけでなく、ノイズの大きさも未知のパラメータとすることで、複数のパラメータ推定問題となり、これにより生じる問題も取り扱う。 第 5 章では、第 4 章で述べた脱分極ノイズがある際の振幅推定法の推定精度を改善する手法を説明する。具体的には、これまでの第 3 章および第 4 章で用いた演算子とは別の基底で作用する振幅増幅演算子を導入する。すると、従来の演算子では達成できない推定精度の下限を理論的に達成できる可能性があることを示す。 第 6 章では、第 4 章で述べた脱分極ノイズモデルを拡張したモデルを扱うことで、より一般的なモデルを扱うことができるようにする。モデルの拡張に際し、パラメータを増やすことを行うが、単に増やすだけでは興味のあるパラメータを推定することができなくなる。そこで、元の量子回路と同程度のノイズを受けると想定される補助回路を用意することでパラメータの推定を可能にする。しかしながら、一般に複数パラメータの最尤推定、つまりは、多次元の最適化問題を解くことは困難である。そこで、パラメータ直行化法という手法を用いることで、複数パラメータの最尤推定問題を直接解かず、一次元の最尤推定の問題に帰着させることができる。特に、パラメータ直交化法を用いる際には条件式となる微分方程式をとく必要があるが、本問題ではこの方程式が解析的に解けることを示す。最後に、量子コンピュータの実機を用いて検証を行う。 第 7 章では、本論文のまとめと展望を行う。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5739 号	氏 名	田中 智樹
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（情報理工学） 山本 直樹
	副査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 早瀬 潤子
		慶應義塾大学教授	博士（理学） 齊藤 圭司
		慶應義塾大学准教授	博士（情報理工学） 小林 景
学士（理学）、修士（理学） 田中智樹君の学位請求論文は「ノイズがある量子振幅推定法の解析と実験」と題し、全7章より構成される。 量子計算機は、従来型(非量子型)計算機では扱えない計算タスクを、現実的な時間で処理できる可能性を有する。そして、量子状態の振幅を推定する「量子振幅推定法」は様々な量子アルゴリズムに含まれている重要なサブルーチンである。一方で、実際の量子計算機デバイスでは、一般にノイズの影響が不可避である。したがって、ノイズ環境下でもロバストに動作する量子アルゴリズム開発が世界中で盛んに行われている。本論文は、ノイズ耐性を有する新たな量子振幅推定法を提案し、理論・実験の両面からその性能を検証するものである。 第1章では、本論文の研究背景と構成が説明されている。特に、量子振幅推定法に関する先行研究と、その応用面での重要性が詳細に議論されている。 第2章では、本論文に関係する量子計算と統計的推定理論の基礎事項が説明されている。 第3章では、従来より知られていた振幅推定法を、ノイズの影響を受ける量子計算機で実装できるように修正したアルゴリズムが説明されている。従来法は振幅を増幅する部分と、状態の位相を推定する部分から構成されており、一般に量子演算数は非常に多くなる(量子回路が深くなる)。新規提案法は、振幅増幅部を並列的に実行し、各々の測定結果からなるデータ集合に基づく最尤推定によって、位相推定を用いずに振幅推定を行うものである。この振幅推定法(以降、並列型振幅推定法と呼ぶ)は、従来法と比べ、大幅に少ない量子ビット数・量子演算数でアルゴリズムを動作させることができる。また、推定精度に関する量子超越性も理論保証されている。この方法の有効性は、量子回路がノイズを受けないという理想的な仮定のもと、シミュレーションにより検証されている。 第4章では、並列型振幅推定法にノイズを導入し、さらに実際の量子計算デバイスを用いて性能検証した結果が説明されている。最尤推定を用いることからノイズの数理モデルが必要であるが、本章では「脱分極ノイズ」と呼ばれるある種の最悪ケースに対応するモデルを構築している。そして、この推定法を超伝導型量子計算機を用いて評価し、理論と整合する結果を示している。さらに、この理論モデルの妥当性から、ある種の実問題を量子計算機で計算するために必要な精度と、実機が達成すべきノイズレベルの見積もりを与えている。 第5章では、並列型振幅推定法にノイズ耐性を入れた修正アルゴリズムが説明されている。具体的には、振幅増幅部の演算を微修正し、ノイズの情報をより抽出できる測定をすることで、脱分極ノイズ環境下で推定精度を改善する手法を提案している。手法は数値シミュレーションによって性能検証されている。 第6章では、並列型振幅推定法を、脱分極ノイズ以外のノイズも考慮できるように拡張した手法が提案されている。拡張されたノイズモデルは多数(任意の有限個数)のパラメータを含んでおり、愚直には、ターゲットである振幅パラメータに加え、これらのノイズパラメータも最尤推定する必要が生じる。これは計算負荷の増大と推定精度の低下を招き、量子計算機の優位性を打ち消してしまう恐れがある。そこで、振幅パラメータとノイズパラメータを分離し、ノイズパラメータの推定を行わずに振幅のみの最尤推定問題に帰着させる理論が提案されている。この手法は超伝導型量子計算機を用いて評価され、理論と整合する結果が示されている。 第7章では、本論文のまとめと展望が与えられている。 量子計算機を実応用するために、ノイズ耐性を有する量子アルゴリズムの開発が必須である。本論文で示された、並列型振幅推定法とその一連の改良版は、振幅推定という枠を超えて、様々な量子アルゴリズムにノイズ耐性をもたせるための重要な指針を与えるものである。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5740号	氏 名	森本 圭彦
主論文題名：			
キノリノラトロジウム触媒を用いたアルキン類のアミンとの 新規カップリング反応の開発に関する研究			
本研究はキノリノラトロジウム錯体触媒を用いた、アミン類の逆 Markovnikov 型付加反応による末端アルキン類の新規分子変換反応の開発を目的としている。 アルキンに対するアミンの付加反応は、エナミンやイミンなどの有機合成化学における合成中間体として有用な含窒素化合物を高い原子効率で与える手法である。中でも付加反応の位置選択性を制御し、逆 Markovnikov 型付加生成物を効率的に得るために、主に前周期遷移金属錯体を用いてこれまで検討されてきた。これらの多くの場合、用いる基質によっては Markovnikov 型付加生成物が主生成物となるといった選択性における観点や、極性官能基をもつ基質の適用が困難であるといった官能基許容性の観点における課題があった。 ロジウムなどの後周期遷移金属は一般に高い官能基許容性が期待される一方、これらをアルキンに対するアミンの逆 Markovnikov 付加反応に用いた例は少ない。本申請者が所属する研究グループでは、キノリノラト配位子をもつロジウム錯体を用いた特徴的な触媒反応の開発を目指した研究を行っている。本研究では、求核剤として第一級および第二級アミン類を用いた逆 Markovnikov 型付加反応による末端アルキン類の新しい分子変換反応の開発を目標とし、多様なアルキン類との反応を可能とする触媒系の開発と、異なるアルキンとのカップリングを含む三成分連結型反応の開発を行った。 第1章では、キノリノラトロジウム触媒と電子求引性置換基をもつトリアリールホスフィンおよびフッ化セシウムを組み合わせた触媒系を用いることで、末端アルキン類に対する脂肪族第一級アミンが逆 Markovnikov 配向で付加し、高収率で対応するアルジミンが得られることを述べている。アリールアセチレンを用いた場合には、アルジミンとエナミンの混合物で対応する生成物が得られることを見出した。第一級アミンを用いた末端アルキン類の逆 Markovnikov 型ヒドロアミノ化反応は、従来チタンなどの前周期遷移金属が主に用いられていたが、選択性や官能許容性に乏しい場合がほとんどであった。本触媒系ではこれらの課題を解決し、幅広い基質一般性をもつ合成手法として確立することができた。 第2章では、第1章で見出した反応系を芳香族第一級アミンとの反応へと適用した結果を述べている。添加剤としてフッ化セシウムの代わりに有機強塩基を用いることでこれまで達成できなかった芳香族第一級アミンとのカップリング反応にも適用できる新規触媒系の開発に成功した。NMR 実験の結果から、有機塩基との相互作用によりアニリンが活性化され、ビニリデン錯体への求核攻撃を促進しているという新しい知見を見出すことができた。電子供与基や求引基を含め、様々な極性官能基をもつ基質の適用も可能であり、本反応も高い官能許容性を示す合成手法であることを明らかにした。 第3章では、脂肪族末端アルキンと第二級アミンとの反応の結果について述べている。この反応は溶媒の極性により反応経路が変わり、異なる生成物を選択的に与えるというあまり例がない現象を含んでいる。トルエン溶媒中では 1:1 型付加生成物であるエナミンが高収率で得られた。DMA 中ではアルキン二分子とアミンの 2:1 型付加反応による共役ジエナミンが高選択的に得られた。NMR 実験から、これらの反応の選択性の分岐点には、添加剤として用いる塩基が関与していることが示唆された。トルエン中では、塩基はアミンよりも弱い塩基として作用し、1:1 型付加反応が進行する。一方で DMA 中ではフッ化セシウムの塩基性が向上することでアミノカルベン錯体が中間体として生成し、これに二分子目のアルキンが反応することで 2:1 型付加反応が進行する機構を提唱することができた。 第4章では、末端アルキンと第二級アミンとの反応で系中発生するアミノカルベン錯体を内部アルキンで捕捉することによって、三成分連結型の共役ジエナミンが高選択的に得られることを述べている。アミノカルベン錯体が効率的に発生する条件として塩基と溶媒を適切に組み合わせることで、目的の反応が効率的に進行したと考えられる。触媒的に生成するアミノカルベン錯体を中間体として用いる触媒反応の例はほとんどなく、Fischer 型カルベン錯体を組み込んだ触媒反応の新たな設計指針として期待できる。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5740 号	氏 名	森本 圭彦
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 千田 憲孝
		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
学士（理学）、修士（理学）森本圭彦君提出の学位請求論文は、「キノリノラトロジウム触媒を用いたアルキン類のアミンとの新規カップリング反応の開発に関する研究」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。 アルキンに対するアミンの付加反応は、エナミンやイミンなどの有機合成化学における合成中間体として有用な含窒素化合物を高い原子効率で与える手法として重要である。これまでの手法では、末端アルキンへの逆 Markovnikov 型付加生成物を効率的に得るために、主に前周期遷移金属錯体を用いて検討されていた。しかしながらこれらの場合、多くは用いる基質によっては Markovnikov 型付加生成物が主生成物となるといった選択性の問題や、極性官能基をもつ基質の適用が困難であるといった官能基許容性の課題があった。著者は本論文で、窒素と酸素で二座配位するキノリノラトを配位子にもつロジウム錯体を触媒に用いた第一級および第二級アミンの様々な末端アルキンへの 1:1 逆 Markovnikov 型付加によるエナミンやイミンへの触媒的変換法を開発を述べている。さらに、同種および異種アルキン 2 分子と第二級アミンとのカップリング反応で共役ジエナミンの生成が選択的に進行する新規分子変換反応を開発した結果についても述べている。 序論では、炭素上に窒素や酸素などのヘテロ原子を触媒的に導入する手法の重要性を述べている。特に、末端アルキンへのアミンの付加により炭素－窒素結合生成を行う反応の重要性と、それを行うためにこれまでに開発されている前周期遷移金属錯体触媒を用いる合成手法がもつ位置選択性制御と官能基許容性に関する問題点を示すとともに、それらを解決できる効率的かつ選択的な末端アルキンとアミンのカップリング反応開発の重要性を述べている。 第 1 章では、キノリノラトロジウム触媒と電子求引基をもつトリアリールホスフィンとフッ化セシウムを用いる触媒系で、末端アルキン類に対する脂肪族第一級アミンが逆 Markovnikov 配向で付加し、高収率でアルジミンが得られることを述べている。また、アリールアセチレンを用いた場合には、対応する生成物がアルジミンとエナミンの混合物として得られることを見出している。従来法では前周期遷移金属が主に使用されるため選択性や官能基許容性に問題があったが、本反応ではこれらの課題を解決し、広い基質適用範囲をもつ手法として利用できることを明らかにしている。 第 2 章では、第 1 章で見出した反応系に関して、添加剤として有機強塩基を用いることで、これまで達成できなかった芳香族第一級アミンとのカップリング反応を開発したことを述べている。第 1 章で述べた反応系と同様に、この反応も様々な官能基をもつ基質を利用できる官能基許容性が高い合成手法であることを明らかにしている。 第 3 章では、脂肪族末端アルキンと第二級アミンとの反応について述べている。この反応は溶媒の極性により反応経路が変わり、異なる生成物を選択的に与えるという、ほとんど報告例がない現象を含んでいることを明らかにしている。非極性のトルエン中では 1:1 型付加生成物であるエナミンが高収率で得られた一方で、高極性の DMA 中ではアルキン二分子とアミンの 2:1 型付加反応による共役ジエン構造をもつエナミンが高選択的に得られた。NMR 実験の結果から、これらの反応の選択性の変化は、アミノカルベン錯体への変化のし易さが関与していることが示唆される結果を得ている。反応機構として、トルエン中ではフッ化セシウムはアミンよりも弱い塩基として作用して 1:1 型付加反応が進行する一方で、高極性の DMA 中ではフッ化セシウムの塩基性が向上することでアミノカルベン中間体が円滑に生成し、これに二分子目のアルキンが反応する機構を提唱している。触媒的に生成するアミノカルベン錯体を中間体として用いる触媒反応の例はほとんどなく、Fischer 型カルベン錯体の利便性を高める手法として期待できる。 第 4 章では第 3 章での知見を展開させて、末端アルキンと第二級アミンとの反応で系中発生させたアミノカルベン錯体を内部アルキンで捕捉することで、三成分連結型の共役ジエン構造をもつエナミンが高選択的に得られることを述べている。本反応の鍵中間体であるアミノカルベン錯体の効率的発生には、塩基と溶媒を適切に組み合わせることが重要であることを明らかにしている。 このように上記の研究成果は、有機化学分野のみならず有機金属化学分野の発展に貢献し、理學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5741号	氏 名	北村 貴士
主論文題名：			
次世代型光線力学療法を指向した刺激応答型光感受性分子の創製			
光線力学療法は、人体に無害な光と光感受性分子を用いた治療法であり、外科手術を必要とせず、光照射をトリガーとして、がんなどの標的組織を選択的に破壊することができることから、患者への負担が少ない魅力的な治療法である。しかし、既存の光感受性分子では、太陽光などの治療目的以外の光の曝露により、正常組織において光過敏症などの副作用が誘発されることが重大な課題として残されている。このような背景の中、近年、がんなどの標的組織に過剰発現するバイオマーカーなどの刺激に応答して、光感受性の発現が OFF から ON に変化する刺激応答型光感受性分子が、光過敏症の課題を解決可能な次世代型光線力学療法のための候補分子として注目されている。本論文では、光感受性の OFF/ON が制御可能な新たな光感受性分子の探索と光感受性分子にがん細胞に過剰発現するバイオマーカーとの応答部位を付与した刺激応答型光感受性分子の創製について記述した。 序論では、まず、現在の光線力学療法とその課題及び課題解決に向けた刺激応答型光感受性分子の開発例について概説した。次に、本研究で着目したがん細胞に過剰発現するバイオマーカーとしての過酸化水素 (H_2O_2) と、光感受性分子である天然物ネオカルチノスタチン・クロモフォア (NCS-chr) 及びヒポクレリン B について概説した。また、本研究で光感受性分子の活性評価の指標としたタンパク質光分解活性について先行研究を例に概説した。さらに、本研究の目的及び位置付けについて記述した。 本論第 1 章では、NCS-chr の 2-ナフトール部分に相当する分子におけるタンパク質光分解活性の発見と光感受性に関する構造活性相関研究について記述した。すなわち、本分子が人体に無害な長波長紫外光の照射下、タンパク質を光分解することを初めて見出した。さらに、構造活性相関研究により、本分子が有する 1,3-ジカルボニルエノール構造が活性発現に重要であることを明らかにし、水酸基を保護することで光感受性を OFF に制御できることを見出した。 本論第 2 章では、NCS-chr の 2-ナフトール部分に相当する分子を基本骨格とした H_2O_2 応答型光感受性分子の創製について記述した。すなわち、本分子が有する 1,3-ジカルボニルエノール構造の水酸基に、H_2O_2 応答性のボロン酸エステルを、ベンジルエーテルリンカーを介して連結したハイブリッド分子をデザイン及び合成後、長波長紫外光の照射下における光感受性を評価した。その結果、本ハイブリッド分子の光感受性が OFF であること、及び本ハイブリッド分子が H_2O_2 と反応して、光感受性が ON である NCS-chr の 2-ナフトール部分に相当する分子を放出することを明らかにした。さらに、本ハイブリッド分子の正常細胞 WI-38 及び H_2O_2 を過剰発現するがん細胞 B16F10 に対する光細胞毒性を評価した結果、B16F10 細胞に対して選択的な光細胞毒性を発現することを見出した。 本論第 3 章では、ヒポクレリン B を基本骨格とした H_2O_2 応答型光感受性分子の創製について記述した。すなわち、ヒポクレリン B が有する 1,3-ジカルボニルエノール構造の水酸基に、H_2O_2 応答性のボロン酸エステルを連結したハイブリッド分子を合成後、生体透過性の高い可視光照射下における光感受性を評価した。その結果、本ハイブリッド分子の光感受性が OFF であること、及び本ハイブリッド分子が H_2O_2 と反応して、光感受性が ON であるヒポクレリン B を放出することを明らかにした。さらに、本ハイブリッド分子が生体透過性の高い可視光の照射下、B16F10 細胞に対して選択的な光細胞毒性を発現することを見出した。 結論では、本研究を総括し、今後の展望について記述した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5741 号	氏 名	北村 貴士
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士 戸嶋 一敦
	副査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 藤本 ゆかり
		慶應義塾大学教授	博士（理学） 末永 聖武
		慶應義塾大学教授	博士（薬学） 荒井 緑
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 高橋 大介
学士（工学）、修士（工学）北村貴士君の学位請求論文は、「次世代型光線力学療法を指向した刺激応答型光感受性分子の創製」と題し、序論、本論第1～第3章、および結論で構成されている。 光線力学療法は、光と光感受性分子を用いた治療法であり、光照射をトリガーとして、がん組織を破壊することが出来ることから、がん患者への負担が少ない治療法として注目されている。しかし、既存の光線力学療法は、光感受性分子のがん組織に対する低い選択性が、大きな課題として残されている。このような背景の中、がん組織に過剰発現するバイオマーカーなどの刺激に応答し、光感受性が OFF から ON になる刺激応答型光感受性分子が、上記の課題を解決した次世代型光線力学療法のための光感受性分子として注目を集めている。本論文では、光感受性の OFF/ON が制御可能な光感受性分子の発見と新たな刺激応答型光感受性分子の創製について記述している。 序論では、光線力学療法の現状とその課題、および刺激応答型光感受性分子の開発例について概説している。さらに、本研究で着目した、がん細胞に過剰発現しているバイオマーカーとしての過酸化水素(H_2O_2)、光感受性分子であるネオカルチノスタチン・クロモフォア(NCS-chr)およびヒポクレリン B について概説し、本研究の目的および位置付けについて記述している。 本論第1章では、NCS-chr の2-ナフトール部分に相当する分子におけるタンパク質光分解活性の発見と光感受性に関する構造活性相関研究について記述している。すなわち、本分子が人体に無害な長波長紫外光の照射下、タンパク質を光分解することを初めて見出している。さらに、構造活性相関研究により、本分子が有する 1,3-ジカルボニルエノール構造が活性発現に重要であることを明らかにしている。 本論第2章では、NCS-chr の2-ナフトール部分に相当する分子を基本骨格とした H_2O_2 応答型光感受性分子の創製について記述している。すなわち、本分子が有する 1,3-ジカルボニルエノール構造の水酸基に、H_2O_2 応答性のボロン酸エステルを連結したハイブリッド分子をデザインおよび合成し、本ハイブリッド分子の光感受性が OFF であること、また、本ハイブリッド分子が H_2O_2 と反応して、光感受性が ON である NCS-chr の2-ナフトール部分に相当する分子を放出することを明らかにしている。さらに、本ハイブリッド分子が、H_2O_2 を過剰発現しているがん細胞 B16F10 に対して選択的な光細胞毒性を発現することを見出している。 本論第3章では、ヒポクレリン B を基本骨格とした H_2O_2 応答型光感受性分子の創製について記述している。すなわち、ヒポクレリン B が有する 1,3-ジカルボニルエノール構造の水酸基に、H_2O_2 応答性のボロン酸エステルを連結したハイブリッド分子を合成し、本ハイブリッド分子の光感受性が OFF であること、また、本ハイブリッド分子が H_2O_2 と反応して、光感受性が ON であるヒポクレリン B を放出することを明らかにしている。さらに、本ハイブリッド分子が、生体透過性の高い長波長可視光の照射下、がん細胞 B16F10 に対して選択的な光細胞毒性を発現することを見出している。 結論では、本研究を総括し、今後の展望について記述している。 以上、本論文の成果は、がんの光線力学治療を指向した新しい光感受性分子を開発し、その有用性を生物学的に実証しており、学術的基礎および応用研究として意義深い。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第5742号	氏名	中路 紘平
主論文題名：			
Noisy intermediate-scale quantum computation and its application (ノイズあり中規模量子計算とその応用)			
本論文は全7章により構成されている。 第1章では、本論文の研究背景と構成について説明する。 第2章では、量子計算の基礎事項について説明する。まずは、量子計算における構成要素(量子ビット、量子ゲート、測定について、等)について導入する。次に、量子計算が与えるインパクトについて、その重要なアルゴリズムを例示することによって明らかにする。 第3章では「ノイズあり中規模量子デバイス(NISQ)」の特徴を述べる。特に、演算処理が追加されるごとに演算結果がノイズによって歪められるため、演算処理をいかに減らせるかが、NISQ活用の鍵となることを説明する。また、以上NISQを活用すべく提案された、「変分量子アルゴリズム」を導入する。また、変分量子アルゴリズムに関して、これまで指摘されている重要な問題について説明し、それらの問題のうち、特に「勾配消失問題」が深刻であることを指摘する。 第4章では、NISQを実問題に応用すべく学位申請者が開発した振幅推定のアルゴリズムである「Faster Amplitude Estimation」について説明する。振幅推定は、演算後の量子状態から演算結果を効率よく取り出すうえで欠くことできない処理である。本章では、提案手法が、従来の振幅推定手法に比べ、著しく演算処理を減らすことを示す。 第5章では、学位申請者「変分量子アルゴリズム」を応用して開発した「半教師有り敵対的学習アルゴリズム」について説明する。半教師あり学習は、機械学習の中で特に重要な問題の一つであるが、NISQをうまく活用した提案アルゴリズムにより、古典機械学習を超える精度を得られる可能性を指摘する。 第6章の前半では、3章で議論した変分量子アルゴリズムの勾配消失問題に対して、これまで提案されてきた解決策について説明する。特に、解決策の中で「Alternating layered ansatz」と呼ばれる量子回路を用いる手法が、理論的な保証があり有望であることを説明する。一方、Alternating layered ansatzは特殊な構造を持った量子回路であり、変分量子アルゴリズムに適用可能なほどの高い表現力を持ち得ない(結果、勾配消失問題の解決策になり得ない)可能性を指摘する。 第6章の後半では、学位申請者が行った Alternating layered ansatz の表現能力を理論的・数値的に解析した結果を示す。特に重要な点は、Alternating layered ansatz を用いれば、勾配消失問題の解決と(変分量子アルゴリズムに利用可能なほどの)高い表現能力の両立が可能である、という結果である。以上の結果から、変分量子アルゴリズムにおいて Alternating layered ansatz を使う手法が有望であることを明らかにする。 第7章では、本論文のまとめと展望を記述する。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5742 号	氏 名	中路 紘平
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（情報理工学） 山本 直樹
	副査	慶應義塾大学准教授	博士（工学） 渡辺 宙志
		慶應義塾大学准教授	博士（理学） 田中 宗
		慶應義塾大学専任講師	博士（理学） 古池 達彦
学士（理学）、修士（理学） 中路紘平君の学位請求論文は「Noisy intermediate-scale quantum computation and its application（ノイズあり中規模量子計算とその応用）」と題し、全7章より構成される。 近年、世界中で、量子計算機のデバイス開発が急速に進んでいる。それらは現状では「ノイズあり中規模量子デバイス」(Noisy intermediate-scale quantum device: NISQ)であるが、NISQ研究は、誤り耐性を仮定する理想的な状況含め、量子計算機研究全般に大きな進展をもたらしている。とくに、限られた計算資源(高純度の量子ビットや高精度で使える量子演算)を有効活用するための様々な提案がなされている。そして、それに伴い、実機実装のハードルが低い量子アルゴリズムが数多く提案されている。本論文で記載されている成果は、これら両面について大きな貢献をするものである。 第1章では、本論文の研究背景と構成について説明が与えられている。 第2章では、量子計算の基礎事項(量子ビット、量子ゲート、量子測定等)について説明されている。また、本論文の成果に関係するいくつかの重要な量子アルゴリズムが例示されている。 第3章では、NISQに関する最近の研究状況が概観されている。NISQでは量子アルゴリズムを実装するために様々な工夫が必要であり、それらが説明されている。とくにパラメトライズされた量子回路を(ニューラルネットワークの様に)学習させ、所望の性能をもたせる変分量子アルゴリズムについての詳細が記載されている。この方法では学習コストの勾配ベクトルが消失する問題(勾配消失問題)が深刻であり、これについても説明が与えられている。 第4章では、量子状態の振幅を推定する量子アルゴリズムをNISQで実装するために開発した、“Faster Amplitude Estimation” アルゴリズムについて説明されている。振幅推定は、演算後の量子状態から演算結果を効率よく取り出すうえで欠くことできない処理である。この提案手法は、従来の振幅推定手法に比べ、著しく少ない演算処理で、しかし同程度の推定精度を達成することが理論・数値的に示されている。 第5章では、変分量子アルゴリズムを応用して開発した「半教師有り敵対的生成ネットワーク」の量子版について説明されている。これはデータ生成器である量子計算機と、データ分類器である古典(非量子)計算機からなるネットワークを学習する機械学習スキームである。目的は高い汎化分類性能を有する古典分類器をつくることであり、つまり高い表現力を有する量子計算機で古典分類器を鍛える構造をとっている。量子生成機に高純度の状態生成が求められておらず、NISQの欠点を上手く回避する機械学習スキームとなっている。数値シミュレーションにおいて、この提案アルゴリズムが(ニューラルネットワークからなる)古典半教師有り分類器を超える精度を達成していることが示されている。 第6章では、上述の勾配消失問題を緩和する方法の理論解析が与えられている。近年、勾配消失問題を緩和する方法として“Alternating Layered Ansatz”と呼ばれるあるクラスの量子回路を用いる手法が提案されている。これは勾配ベクトルの消失を抑える効果がある一方で、どれほど広いクラスの量子状態を表現することができるか未知であった。変分量子アルゴリズムにおける関数近似器として、高い表現力をもつことは重要である。ここでは、Alternating Layered Ansatzの表現能力を理論的・数値的に詳細に解析し、結果、この量子回路は勾配消失問題を緩和するとともに高い表現能力を有することが示されている。 第7章では、本論文のまとめと展望が与えられている。 NISQ研究は、広く量子情報科学全般の発展を促進する重要な分野である。本論文で示された成果は、基礎・応用の両方向において同分野のさらなる発展に寄与することが期待されるものである。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 5743 号	氏 名	秋山 真那斗
主 論 文 題 名 : Development of RNA informatics for RNA sequence and structure analysis (RNA 配列と構造解析のための RNA インフォマティクスの構築)			
タンパク質に翻訳されない非コード RNA (ncRNA) は、これまで機能を持たないジャンク領域と見なされてきたが、近年、発生や細胞分化の過程から病気の原因に至るまでさまざまな機能を持つことが明らかになっている。RNA インフォマティクスによる解析において、ncRNA の機能を知るために不可欠なステップとして ncRNA の構造情報の抽出がある。本論文では RNA の構造解析及び配列解析という異なる二つのアプローチにより ncRNA の効果的な表現方法とそれを用いた新しい解析手法を構築した。 本論文の第 1 章では、ncRNA とその情報解析分野である RNA インフォマティクスの重要性について述べるとともに、本研究で扱う二つの課題について概説した。 第 2 章では、高精度な RNA 二次構造予測アルゴリズムの開発について報告した。ncRNA の機能は二次構造と密接に関連しているため、二次構造が分かればその生物学的機能を推測することができる。RNA 二次構造を予測するための一般的なアプローチは、熱力学的に最も安定した最小自由エネルギー (MFE) 構造を見つけるための熱力学的モデルである。さらなる予測精度の改善のために、より詳細な特徴量のモデリングが可能である機械学習に基づくアプローチが開発されてきた。機械学習ベースの詳細な特徴量を持つモデルは、予測精度において非常に高いパフォーマンスを達成したが、学習データに過剰適合するリスクの可能性が報告されている。本論文では、熱力学的アプローチと機械学習ベースのアプローチを統合する RNA 二次構造予測のための新しいアルゴリズムを提案した。ベンチマークテストでは、提案アルゴリズムは大きな過剰適合を起こさず、既存の方法と比較して最高の予測精度を示した。 第 3 章では、RNA 配列及び塩基のベクトル化技術の開発を行った。DNA 配列やアミノ酸配列をベクトル化する埋め込み(embedding)という技術が DNA 配列モチーフの検出やタンパク質機能予測などの品質を向上させる事がわかっている。一方で、RNA 配列の効果的な埋め込み技術はこれまで開発されていない。本論文では、RNA 配列を効果的に埋め込むための事前トレーニングアルゴリズムを採用して、構造情報や配列の文脈情報を豊富に含む RNA 配列の埋め込みベクトルを取得する手法を開発した。事前トレーニングによって得られた埋め込みベクトルの品質を検証するために 2 つの基本的な RNA インフォマティクスの課題 (構造アラインメントと遺伝子のクラスタリング) によるテストを実施し、既存の最先端の方法よりも優れた精度を達成した。 第 4 章では、本研究を総括するとともに、開発した RNA 解析手法について今後の応用可能性を議論した。 以上、本論文では RNA 二次構造予測及び RNA 塩基配列のベクトル化という二つのアプローチを用いて ncRNA の効果的な解析手法を開発することに成功した。各アプローチはあらゆる RNA インフォマティクスにおける課題に応用可能である。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5743 号	氏 名	秋山 真那斗
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 榊原 康文
	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（地球環境科学） 土居 信英
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 舟橋 啓
学士（理学）、修士（理学）秋山真那斗君提出の学位請求論文は、「Development of RNA informatics for RNA sequence and structure analysis（RNA 配列と構造解析のための RNA インフォマティクスの構築）」と題し、4 章から構成されている。 RNA はセントラルドグマを構成する三大生体高分子の一つである。その中でもタンパク質に翻訳されない非コード RNA（ncRNA）と呼ばれる RNA 分子は、ヒトゲノムの 70% の領域にコードされており、miRNA などのように生物活性を示すものもあることからポストゲノム時代において注目されている。このような膨大な量の非コード RNA を解析するためには、RNA インフォマティクスと呼ばれる情報解析技術が必須である。本論文は、RNA インフォマティクスの基本解析技術である二次構造予測、配列アライメント、クラスタリングという三つの課題に関して、最新の人工知能技術を応用した新しい手法を提案し、その有効性について報告している。 本論文の第 1 章では、ncRNA とその情報解析分野である RNA インフォマティクスの重要性について述べるとともに、本論文で扱う三つの課題について概説している。 第 2 章では、高精度な RNA 二次構造予測アルゴリズムの開発について報告している。ncRNA の機能は二次構造と密接に関連しているため、二次構造が決定されるとその生物学的機能を推測することができる。RNA 二次構造を予測するための一般的なアプローチは、熱力学的に最も安定した最小自由エネルギー構造を見つけるための熱力学的モデルである。一方で、予測精度の改善のために、より詳細な特徴量のモデリングが可能である機械学習に基づくアプローチが開発されている。機械学習ベースの詳細な特徴量を持つモデルは、熱力学的モデルと比較して予測精度において高いパフォーマンスを達成したが、学習データに過剰適合する問題点が報告されている。本論文では、熱力学的モデルと機械学習ベースのモデルを統合する RNA 二次構造予測のための新しいアルゴリズムを提案している。ベンチマークテストでは、提案アルゴリズムは大きな過剰適合を起こさず、既存の方法と比較して最高の予測精度を達成している。 第 3 章では、RNA 配列および塩基のベクトル化技術の開発を行っている。DNA 配列やアミノ酸配列などの非構造データ（非数値データ）をベクトル化する埋め込みという技術が、DNA 配列モチーフの検出やタンパク質の機能予測の性能を向上させるために利用されている。一方で、RNA 配列の効果的な埋め込み技術はこれまで開発されていない。本論文では、RNA 配列を効果的に埋め込むために事前学習アルゴリズムを適用して、構造情報や配列の文脈情報を効果的に取り込んだ RNA 配列の埋め込みベクトルを計算する手法を開発している。事前学習によって得られた埋め込みベクトルの精度を検証するために、二つの基本的な RNA インフォマティクスの課題（構造配列アラインメントと遺伝子のクラスタリング）によるテストを実施し、既存の方法よりも優れた精度を達成している。 第 4 章では、本研究を総括するとともに、開発した RNA 解析手法について今後の応用可能性について議論している。 以上結論として、RNA 二次構造予測および RNA 塩基配列のベクトル化という二つのアプローチを用いて ncRNA の効果的な解析手法を開発することで、バイオインフォマティクス分野の発展に大きく資することができた。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. 5744	Name	RATHNAYAKE MUDIYANSELAGE, Maheshi Ruwanthika
Thesis Title			
Excess Force Reduction in Bilateral Control for Precise and Safe Operation			
An aging population, declining birth rates, and pandemics such as COVID-19 have motivated the development of a robotic support society to guarantee a certain quality of life. Bilateral control that enables contact interactions, including haptic sensations, with entities at distant locations through master-replica actuators is an emerging technology in the fields of human tele-support, care, and assistance. This thesis focuses on methods to reduce operator-applied excessive force in bilateral control to ensure the safety of man-machine interfaces. Chapter 1 describes the purpose and background of this research. Chapter 2 describes the preliminary models used in this thesis. Starting with a motor model, it describes a disturbance observer, reaction force observer (RFOB), acceleration control, 4ch-acceleration-based bilateral control (ABC), and the experimental setup and performance with a 4ch-ABC and scaling bilateral control. Additionally, it discusses the necessity of safety enhancement for bilateral control applications. Chapter 3 describes a constrained motion control (CMC) method using master-replica isolated control. If an operator applies force on the master exceeding the corresponding safe force limit, then the 4ch-ABC switches to the replica-side force control and master-side virtual impedance control (VIC). When analyzing conventional VIC, drawbacks are recognized and when it is applied to the 4ch-ABC, solutions are provided to achieve the control objectives. The VIC plays a vital role because it accepts excessive force, regulates it using a virtual force model, facilitates operator's freedom, and transmits replica object impedance to the operator. Chapter 4 describes a virtual force reduced (VFR) RFOB. Instead of using switching controllers as discussed in Chapter 3, Chapter 4 changes the master force input of the 4ch-ABC as a solution when an operator applies excessive force on the master. The VFR RFOB is an extension of the RFOB. It considers excessive force as a disturbance force and removes it from the estimated external force, resulting in an input force for the 4ch-ABC from the master side that is reduced to the corresponding force limit if an operator exerts an excessive force. The VFR RFOB models excessive force as a virtual force using a virtual impedance model. Chapter 5 describes an excess force reduced (EFR) RFOB that is another extension of the RFOB. The EFR RFOB estimates the amount of excessive force by adding the master-side RFOB output and replica-side safe force limit. It is independent of the virtual force model. The CMC performs 4ch-ABC with limited master and actual replica force-position responses. Chapter 6 summarizes the results of this thesis and presents conclusions and future works.			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5744 号	氏 名	RATHNAYAKE MUDIYANSELAGE, Maheshi Ruwanthika
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	桂 誠一郎
副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	滑川 徹
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	柿沼 康弘
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	杉本 麻樹
学士（工学）、修士（工学） RATHNAYAKE MUDIYANSELAGE, Maheshi Ruwanthika 君提出の学位請求論文は「Excess Force Reduction in Bilateral Control for Precise and Safe Operation」（精密かつ安全な操作のためのバイラテラル制御における超過力低減）と題し、6章から構成されている。 遠隔操作は空間を越えた身体拡張をもたらし、人間支援、産業応用などさまざまな分野での適用が期待されている。特に、安全な遠隔操作の実現にあたっては、遠隔地の接触対象へ印加される力の制限が必要となる。本論文では、力の制限を設けた上で、透明性の高いバイラテラル制御系を構成する手法の提案を行っている。具体的には、制限値を超過した力に応じて操作者側のシステムで再現する環境側のインピーダンスを調整する機能について複数の手法を提案し、制御系の解析ならびに性能に関する実験を実施し、比較検証を行っている。 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、外乱オブザーバに基づく加速度制御系、センサレス力制御、加速度規範バイラテラル制御など、本研究の基本となるモーションコントロール技術についてまとめている。 第3章では、操作者側のシステムに制限値を超過した力が印加された際に安全機能を実現するための制御系を提案している。操作者側、遠隔側の両システム間の制御的な結合を切り離し、操作者側のシステムは仮想インピーダンス制御、遠隔側のシステムは力制御へと切り替えることで、遠隔地の接触対象へ印加される力を制限しつつ、環境側のインピーダンスを操作者に感触としてフィードバックできるため、透明性に関する目標が達成されることを示している。 第4章では、力の制限超過時に制御系の切り替えを必要としない手法を提案している。具体的には、環境のインピーダンスモデルを用いて操作者の力を遠隔側に伝送することにより、安全性を保った上で動作を再現することを可能にしている。制限値を超過した力を外乱と見なして補償することで、仮想的に操作者が印加する力の制限を可能にしている。 第5章では、第4章で示した手法を拡張し、環境側のインピーダンスモデルを使用せずに超過した力を補償する手法を提案している。操作者の印加する力と制限力の比率に基づき遠隔側のシステムを動的に制御することで、環境側のモデルや制御系の切り替えが不要な制御系を実現している。本論文で提案する各手法については、安定性、透明性の解析に加え、実験により性能の確認を行っている。 第6章では、各章で得られた成果をまとめ、本論文全体の結論を述べている。 以上要するに、本論文では力の制限を導入した安全なバイラテラル制御系を提案し、各種実験を通してその有効性を実証しており、制御工学分野において、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5745号	氏 名	長南 友太
主論文題名：			
Investigation of the Mechanism for Emergence of Spatial Heterogeneity of Invading Glioblastoma Cells in the Presence of Perivascular Factors (浸潤するグリオブラストーマ細胞の空間的な不均一性が 血管周辺要素の存在下で出現するメカニズムの研究)			
グリオブラストーマ (GBM: glioblastoma) とは、最も予後が悪く発生率の高い原発性悪性脳腫瘍である。GBM の治療には外科手術が適用されるが、腫瘍細胞が血管に沿って正常脳組織へ広く浸潤するために治療の効果は低く、これが患者の予後の悪さに繋がっている。浸潤はグリオーマ幹細胞によって先導される一方で、分化したグリオーマ細胞 (DGC: differentiated glioma cell) は腫瘍塊に局在することが報告されている。しかし、血管に向かう浸潤の過程で、このような空間的な不均一性が出現するメカニズムは不明である。また、血管周辺要素である血管内皮細胞や間質流は、GBM 細胞の浸潤や分化を制御することが知られているため、これらは GBM 細胞の空間的な不均一性の出現にも影響を与えることが予想される。そこで本研究は、血管周辺要素の存在下で GBM 細胞の空間的な不均一性が出現するメカニズムを解明することを目的とした。 第1章に、本研究の背景および目的を概説した。 第2章に、本研究の実験手法をまとめて述べた。 第3章では、マイクロ流体デバイスを用いて、浸潤する GBM 細胞の空間的な不均一性に血管内皮細胞が与える影響を検討した。まず、グリオーマ起源細胞 (GIC: glioma initiating cell) のコラーゲンゲルへの浸潤はヒト臍帯静脈内皮細胞 (HUVEC: human umbilical vein endothelial cell) との共培養により促進されることを示した。そして、浸潤は幹細胞性を維持する GIC が先導する一方、後方には DGC が位置することを明らかにした。また、HUVEC と共培養をすることでデバイス内の非浸潤領域において GIC の分化が促進されることも明らかにした。 第4章では、腫瘍細胞間相互作用と間質流が GBM 細胞の空間的な不均一性に与える影響を解析した。マイクロ流体デバイス内において、浸潤先端の GIC は低細胞密度のために幹細胞性を維持した一方、細胞密度の高い浸潤後方では局所的なパラクライン因子の蓄積により GIC の分化が誘導されることが見出された。さらに、血管周辺要素である間質流は、パラクライン因子を除去することで浸潤後方における GIC の分化を抑制する働きを示すことも明らかにされた。 第5章では、空間的な不均一性の出現に貢献する主要なシグナル伝達経路を検討した。阻害剤を用いた実験により、浸潤後方での GIC の分化は TGF-β ファミリーのパラクラインシグナルによって誘導される一方で、GIC の浸潤は p38 と ERK シグナル伝達経路が重要な役割を果たすことが示唆された。さらに、浸潤先端の GIC では後方の細胞よりも p38 の活性が高いことも見出された。 第6章に、結論として各章の内容をまとめた要約と今後の展望を述べた。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5745 号	氏 名	長南 友太
論文審査担当者： 主査 慶應義塾大学教授 博士（工学） 須藤 亮			
副査 慶應義塾大学教授 博士（工学） 清水 史郎			
慶應義塾大学教授 博士（工学） 田口 良広			
慶應義塾大学専任講師 博士（工学） 山下 忠紘			
学士（工学）、修士（工学）長南友太君提出の学位請求論文は「Investigation of the Mechanism for Emergence of Spatial Heterogeneity of Invading Glioblastoma Cells in the Presence of Perivascular Factors」（浸潤するグリオブラストーマ細胞の空間的な不均一性が血管周辺要素の存在下で出現するメカニズムの研究）と題し、6 章から構成されている。 悪性脳腫瘍のグリオブラストーマ（GBM: glioblastoma）は、腫瘍細胞が血管に沿って正常組織へ広く浸潤するために患者の予後が非常に悪い。GBM 細胞は浸潤する際、先端に幹細胞、後方に分化細胞という空間的な不均一性を示す。しかし、血管に向かって浸潤過程において、このような空間的な不均一性が出現するメカニズムは不明である。血管周囲には GBM 細胞の浸潤や分化を制御する血管内皮細胞や間質流が存在することから、これらの要素は GBM 細胞の空間的な不均一性の出現に重要な役割を果たすことが予想される。そこで本研究は、血管周辺要素の存在下で GBM 細胞の空間的な不均一性が出現するメカニズムを明らかにすることを目的としている。 第 1 章では、研究背景および目的について述べている。 第 2 章では、実験手法をまとめて述べている。 第 3 章では、マイクロ流体デバイスを用いて、浸潤する GBM 細胞の空間的な不均一性に血管内皮細胞が与える影響を検討している。まず、グリオーマ起源細胞（GIC: glioma initiating cell）のコラーゲンゲルへの浸潤はヒト臍帯静脈内皮細胞（HUVEC: human umbilical vein endothelial cell）との共培養により促進されることを示している。また、浸潤は幹細胞性を維持する GIC が先導する一方、後方には分化細胞が位置することを見出している。さらに、デバイス内における非浸潤領域では HUVEC との共培養により GIC の分化が促進されることを明らかにしている。 第 4 章では、腫瘍細胞間相互作用および間質流が GBM 細胞の空間的な不均一性に与える影響を解析している。マイクロ流体デバイスにおいて、浸潤先端の GIC は低細胞密度のために幹細胞性を維持する一方、細胞密度の高い浸潤後方では GIC の分化が誘導されることを見出している。さらに、間質流はパラクリン因子を除去することによって浸潤後方での GIC の分化を抑制する働きがあることを明らかにしている。 第 5 章では、空間的な不均一性が出現するシグナル伝達経路を検討している。その結果、浸潤後方での GIC の分化は TGF-β シグナルによって誘導される一方、GIC の浸潤は p38 と ERK シグナルが重要な役割を果たすことを示唆している。さらに、浸潤先端の GIC では後方の細胞よりも p38 活性が高いことを見出している。 第 6 章では、各章で得られた成果をまとめ、本論文全体の結論を述べている。 以上要するに、本研究はマイクロ工学を活用することで、生化学因子と力学因子を含む血管周辺要素と、GBM 細胞の空間的な不均一性を同時に再現する培養モデルを初めて構築し、これを用いることにより GBM 細胞の空間的な不均一性の出現メカニズムとそれに与える血管周辺要素の影響を明らかにしており、がんの組織工学分野において、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.5746	Name	TRIANA, Yunita
Thesis Title Application of Boron Doped Diamond Electrodes to Electrochemical Gas Sensors			
In the last decades, electrochemical sensors have presented a promising way forward for gas sensor application, since they offer real time measurement, simplicity with a low limit of detection (LOD) and good selectivity. Therefore, research on high sensitivity, selectivity and highly durable materials for electrochemical gas sensors has become a hot issue. Boron doped diamond (BDD) electrodes have been applied as electrochemical sensors for various targets, such as free chlorine, oxalic acid and proteins, or as immunosensor, since they have attractive electrochemical properties such as wide potential window, low background current, chemical stability and mechanical durability compared to conventional electrodes. Although several works of BDD applied to gas sensors have been reported so far, they do not include detailed studies on the electrochemical behavior and the oxidation mechanisms. In this thesis, the use of BDD as the working electrode material for gas sensors without any mediator or modification is proposed, which is simple, low cost, highly durable and environmentally friendly. Chapter 1 describes the background and purpose of this research. Chapter 2 describes an oxidation reaction of dissolved hydrogen sulfide (H₂S) in aqueous solution using BDD electrodes. In order to study the oxidation behavior, the effects of pH and the scan rate were investigated. No sulfur fouling was detected on the BDD surface by X-ray photoelectron spectroscopy. A linear calibration curve was observed for the detection of H₂S. Moreover, a comparison of the analytical performance with sensors using glassy carbon and platinum electrodes is shown. Chapter 3 describes the electrochemical oxidation reaction of nitrogen dioxide (NO₂) in aqueous solution using BDD electrodes. The pH and scan rate dependences were investigated to study the oxidation mechanism. In addition, the analytical performance was compared with that using glassy carbon, platinum and stainless steel as the working electrode. Chapter 4 describes the electrochemical reduction behavior of oxygen (O₂) in blood using BDD electrodes. The scan rate dependence was investigated to study the reduction reaction mechanism. A linear calibration curve was observed, and the analytical performance was better than in the case of using glassy carbon or platinum electrodes as the working electrode. In addition, an application to bovine blood was performed. The O₂ concentration in the blood measured with the BDD electrodes was compared to that measured using the OxyLite ProTM fiber-optic oxygen sensor device. Chapter 5 summarizes the results of this thesis and presents conclusions with future perspectives.			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5746 号	氏 名	TRIANA, Yunita
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	Dr. sc. nat.	チッテリオ, ダニエル
	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（工学）	松原 輝彦
学士（工学）、修士（工学） TRIANA, Yunita（トゥリアナ、ユニタ）君提出の学位請求論文は「Application of Boron Doped Diamond Electrodes to Electrochemical Gas Sensors」（ホウ素ドーパダイヤモンド電極の電気化学ガスセンサーへの応用）と題し、5章から構成されている。 ダイヤモンド電極は、優れた感度と耐久性を兼ね備えた次世代電極材料として期待されており、電気化学センサーとしての応用展開が盛んである。そのような中、本論文では、ダイヤモンド電極を用いた電気化学的なガス計測を目的とした技術開発を目指している。具体的には、水溶液中の硫化水素や二酸化窒素、ならびに血液における酸素の電気化学的挙動を明らかにするとともに、それらの濃度を高感度で計測することに成功している。 第1章では、本研究の背景と目的を述べている。 第2章では、ダイヤモンド電極を用いた、硫化水素水溶液の電気化学的な酸化反応について調べている。走査速度や pH 依存性などを詳細に調べて反応機構を明らかにするとともに、酸化電流が硫化水素の濃度に比例することを見出し、濃度計測に利用できることを示している。さらに、従来の電極材料であるグラッシーカーボン電極や白金電極の特性との比較から、ダイヤモンド電極の優位性も述べている。 第3章では、ダイヤモンド電極を用いた、二酸化窒素水溶液の酸化反応について述べており、同様に走査速度や pH 依存性などを詳細に調べて反応機構を明らかにしている。さらに、酸化電流が二酸化窒素の濃度に比例することを見出し、濃度計測に利用できることを示している。 第4章では、ダイヤモンド電極を用いて、血液中の酸素濃度を計測する試みについて述べている。酸素の還元反応について詳細に調べて反応機構を明らかにするとともに、還元電流が溶存酸素濃度に比例することを見出している。さらに、ウシ血液を用いて酸素濃度の検出を行い、血液中においても酸素濃度の計測が可能であることを見出している。 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、本論文では、ダイヤモンド電極を用いたガス計測に関する電気化学的挙動の知見を得ただけでなく、センサーへの応用展開の可能性も示しており、電気化学、分析化学の分野において、工学上、工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第5747号	氏 名	幡井 亮介
主論文題名：			
大容量光信号伝送に向けたポリマー導波路型光結合デバイスの設計と作製			
データセンタ内やハイパフォーマンスコンピュータ内の機器間ネットワークトラフィックの急増に対応するため、特にラック間・電子回路基板（ボード）間ネットワークには光配線が導入されている。ラック間の光リンクには、低コスト性に優れるマルチモードファイバ（MMF）が使用されてきたが、近年、伝送帯域・距離積の限界が課題となっている。その解として、MMF リンクへの短波長帯での波長分割多重技術（SWDM）の導入、あるいはシングルモードファイバ（SMF）リンク、フューモードファイバ（FMF）リンクへのモード分割多重技術（MDM）の導入が検討されている。信号多重化のためには合分波素子（MUX/DEMUX）が必要不可欠であり、その素子の一つとして作製およびボード上への実装が容易な Y 分岐ポリマー光導波路が注目されている。これまでに提案されてきたマルチモード Y 分岐ポリマー光導波路は、階段屈折率（SI）型コアにより形成されているため、特に合波部で損失が増大する点が課題となっていた。これに対し分布屈折率（GI）型コアにより形成された Y 分岐ポリマー光導波路では、コア内部へ光波が強く閉じ込められるため、低損失かつ小型の MUX 素子の実現が期待される。一方で、シングルモード／フューモード Y 分岐ポリマー光導波路を円形コアにて作製できれば、SMF、FMF と導波路の間で、伝搬モードの強度分布に高い一致が得られるため、GI 型円形コア Y 分岐ポリマー導波路の、MDM FMF リンク向け低損失・小型 MUX 素子への応用が期待される。そこで本研究では、まず、低損失 MUX 素子のためのマルチモード／シングルモード円形コア Y 分岐ポリマー光導波路の実現を目指し、導波路構造設計・作製方法検討から試作、特性評価までを行い、SWDM、MDM リンクへの適用可能性を検証した。 第 1 章は、序論であり、本研究の背景技術を概説し、目的を示した。 第 2 章では、ポリマー光導波路素子の適用が想定される光リンクとその広帯域化技術について概説し、ポリマー光導波路に求められる光学特性に関して概説した。 第 3 章では、Y 分岐ポリマー光導波路の作製法として、既に報告されているフォトリソ法を使用したリアクティブイオンエッチング法（RIE）や直接露光法について概説し、さらに本研究にて採用したインプリント法および Mosquito 法について示して、マルチモード、シングルモード Y 分岐導波路の作製方法を解説した。特に、Mosquito 法では、一筆書きの要領でニードルを走査しながらコアを吐出する手法が有効であることを示した。また、分岐部でのコアの構造乱れを低減するために、使用する樹脂の原料（モノマー）に求められる特性を示した。 第 4 章では、Y 分岐ポリマー光導波路を SWDM、MDM リンクの MUX 素子として応用するための特性評価を行った。SWDM MMF 光リンクでは、GI 型コアを用いることで低損失・広帯域 MUX として機能し、SWDM で想定される高速信号伝送が可能であることを実証した。また MDM リンクでは、GI 型コア非対称 Y 分岐ポリマー光導波路が MDM MUX として機能することを示し、さらに合波部の導波路構造により低損失化・小型化が可能であることを示した。 第 5 章は、結論であり、ポリマー導波路型光結合素子に関して総括し、今後の展望を示した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5747 号	氏 名	幡井 亮介
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	石樽 崇明
副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	津田 裕之
	慶應義塾大学准教授	工学博士	二瓶 栄輔
	慶應義塾大学教授	博士（理学）	早瀬 潤子
学士（工学）、修士（工学）幡井亮介君提出の学位請求論文は「大容量光信号伝送に向けたポリマー導波路型光結合デバイスの設計と作製」と題し、5章から構成されている。 データセンタ内やスーパーコンピュータ内ネットワークのトラフィック急増に対応するため、光ファイバリンクが導入されている。近年は、既存の光ファイバリンクの伝送容量限界が問題となりつつあり、波長分割多重（WDM）技術やモード分割多重（MDM）技術の導入による大容量化が検討されている。信号多重化には合分波（MUX/DEMUX）素子が必要とされ、Y分岐ポリマー光導波路が注目されている。従来の階段屈折率型矩形コア Y分岐ポリマー光導波路は、合波部での信号光損失が課題となっていた。これに対し、分布屈折率（GI）型円形コア Y分岐ポリマー光導波路は、コアへの光の強い閉じ込め効果により低損失化ならびに MUX 素子の小型化が期待される。本論文では、低損失マルチモード／シングルモード円形コア Y分岐ポリマー光導波路の構造設計およびその作製方法を検討した後、実際に Y分岐導波路を試作し特性を評価することで、光ファイバリンクの MUX 素子への適用可能性を検証している。 第1章では、本研究の背景技術を概説し、本研究の目的を示している。 第2章では、ポリマー光導波路の適用が想定される光ファイバリンクとその大容量（信号多重）化技術ならびにポリマー光導波路に求められる光学特性を概説している。 第3章では、従来の Y分岐ポリマー光導波路の作製法および本研究で採用したインプリント法や Mosquito 法によるマルチモード／シングルモード Y分岐ポリマー光導波路の作製方法を示している。Mosquito 法では、コアモノマー吐出時に一筆書きの要領でニードルを走査する手法が有効であることを示し、分岐部のコア構造乱れを生じさせないためには、樹脂原料（モノマー）の粘度が最重要であることを示している。 第4章では、Y分岐ポリマー光導波路の特性評価結果をまとめている。WDM リンクでは、GI型円形コアマルチモード Y分岐光導波路が、低損失・広帯域 MUX 素子として機能し、期待される高速信号伝送が可能であることを実証している。一方、円形コアシングルモード非対称 Y分岐ポリマー光導波路が、MDM リンクの MUX 素子として機能すること、さらに合波部の構造最適化により一層の低損失化・小型化が可能となることを示している。 第5章では、ポリマー導波路型光結合素子に関する本研究の内容を総括し、今後の展望を述べている。 以上要するに、本論文の著者は、Y分岐ポリマー光導波路の低損失化のための最適構造、作製方法および構成樹脂への要求仕様を明らかにし、光ファイバリンクのさらなる高速化に貢献する成果を挙げており、高分子科学、光通信工学の分野において工学上、工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第5748号	氏 名	森倉 峻
主論文題名：			
変動する機械的圧縮刺激に対するメラノーマ細胞の応答性に関する研究			
世界的に発症率が増加し続けているメラノーマは、極めて進展が早く予後の悪い難治性疾患である。分子標的療法や免疫療法など新たな治療法が開発されてきたが、一部のサブタイプには未だ有効性が限定的である。近年、有効な新規治療法の確立に向けて、細胞周囲の力学的環境に対するメラノーマ細胞の応答性が注目され始めた。いくつかの先行研究によって、静的な機械的刺激はメラノーマ細胞の応答性を変化させることが報告された。しかしながら、生体内に発生する機械的刺激は常に変動する。より深い生理学的応答の理解には、変動する機械的刺激に対する応答性の解明が重要であるが、現時点で未解明である。そこで、本研究では変動する機械的圧縮刺激に対するメラノーマ細胞の応答性を細胞集団レベルおよび単一細胞レベルで解明することを最終目的とし、時系列情報を取得可能な機械的圧縮刺激印加培養装置および光散乱性ハイドロゲル内の細胞形状変化を取得可能なラベルフリー四次元細胞顕微鏡法を確立した。確立した方法論をもって、数時間周期で変動する間欠的圧縮刺激に対するメラノーマ細胞集団およびメラノーマ単一細胞の応答性を調査した。 第1章で、メラノーマに関する知見を整理した後に、機械的圧縮刺激印加培養装置および四次元細胞顕微鏡法を概説した。 第2章で、圧縮刺激印加と光路確保を両立する機構を考案したことで、時系列情報を取得可能な機械的圧縮刺激印加培養装置を開発した。 第3章で、新たに開発した双方向符号化理論に基づく情報損失のない可逆的な次元変換法を構築したことで、高精度なシングルショット三次元細胞計算顕微鏡法の構築に成功した。タイムラプスイメージングと組み合わせることで、光散乱性ハイドロゲル内の細胞形状変化を取得可能なラベルフリー四次元細胞顕微鏡法の確立を可能にした。 第4章で、間欠的圧縮刺激の周期に依存してメラノーマ細胞集団の進展速度が変化することを明らかにした。 第5章で、間欠的圧縮刺激の周期に依存して二次元的な細胞形態分布および三次元的な細胞形態分布の時間的変化が異なることを示した。特に、未知な表現型であるハイブリッド表現型の発現が、変動する機械的圧縮刺激に対して周期依存的に変化することを明らかにした。 第6章に、結言として各章で得られた内容をまとめ、本研究の成果を要約した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5748 号	氏 名	森倉 峻
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	宮田 昌悟
副査	慶應義塾大学教授	博士（情報理工学）	尾上 弘晃
	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）	舟橋 啓
	防衛大学校准教授	博士（工学）	塚本 哲
学士（工学）、修士（工学）森倉峻君提出の学位請求論文は「変動する機械的圧縮刺激に対するメラノーマ細胞の応答性に関する研究」と題し、6章から構成されている。 世界的に発症率が増加しているメラノーマは予後の悪い難治性疾患である。近年、新規治療法の確立に向けて、細胞周囲の力学的環境に対するメラノーマ細胞の応答性に注目が集まっている。いくつかの先行研究では、静的な機械的刺激はメラノーマ細胞の応答を変化させることが報告されている。しかしながら、生体内で発生する機械的刺激は常に変動している。より深い生理学的応答の理解には、変動する機械的刺激に対する細胞応答性の解明が重要であるが、現時点では未解明である。そこで、本研究では変動する機械的圧縮刺激に対するメラノーマ細胞の応答性を細胞集団レベルおよび単一細胞レベルで解明することを目的とし、時系列情報を取得可能な機械的圧縮刺激印加培養装置および光散乱性ハイドロゲル内の細胞形状変化を取得可能なラベルフリー四次元細胞顕微鏡法を確立した。さらに、確立した方法論をもって、数時間周期で変動する間欠的圧縮刺激に対するメラノーマ細胞集団およびメラノーマ単一細胞の応答性を調査した。 第1章では、メラノーマに関する知見を整理した後に、機械的圧縮刺激印加培養装置および四次元細胞顕微鏡法を概説している。 第2章では、圧縮刺激印加と光路確保を両立する機構を備え、時系列情報を取得可能な機械的圧縮刺激印加培養装置について説明している。 第3章では、情報損失のない可逆的な次元変換法の構築、高精度なシングルショット三次元細胞計算顕微鏡法の構築について説明している。これらの方法論をタイムラプスイメージングと組み合わせることで、光散乱性ハイドロゲル内の細胞形状変化を取得可能なラベルフリー四次元細胞顕微鏡法を確立している。 第4章では、間欠的圧縮刺激の周期に依存してメラノーマ細胞集団の進展速度が変化することを明らかにしている。 第5章では、間欠的圧縮刺激の周期に依存して二次元的な細胞形態分布および三次元的な細胞形態分布の時間的変化が異なることを示している。特に、未知な表現型であるハイブリッド表現型の発現が、変動する機械的圧縮刺激に対して周期依存的に変化することを明らかにしている。 第6章では、各章で得られた成果をまとめ、本論文の結言を述べている。 以上要するに、本論文では、メラノーマが生体内で置かれる力学的環境を再現する機械的圧縮刺激印加培養装置およびハイドロゲル内の細胞形状変化を取得可能なラベルフリー四次元細胞顕微鏡法を開発し、変動する力学的環境下におけるメラノーマ細胞の特性について実証したものであり、組織工学およびがん病態生理学分野において、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5749号	氏 名	田脇 裕太
主論文題名： Modeling and Analysis for Stability Evaluation of Quiet Standing Posture (静止立位姿勢の安定性評価のためのモデリングと解析)			
近年、世界的に高齢化が進んでおり、高齢者の身体機能を支援する研究が世界中で注目されている。高齢者が要介護になる要因の一つとして下肢能力の衰えがあり、特に転倒は骨折や寝たきりに繋がる重要な要因である。高齢者のバランス能力を評価することは、将来の転倒リスクを予測し適切なリハビリテーションの選定において重要であり、簡易で正確な評価方法の確立が期待されている。静止立位テストは種々あるバランス評価テストの中で最も簡単なテスト法の一つであり、被験者の重心動揺を解析することでバランス能力を評価することができる。しかしながら、過去の研究では 70 種類以上の指標が提案されており、どの指標の有用性においても優位性の観点から議論の余地がある。また、臨床家がバランス能力を診断する際に、数十種類の記述統計量を考慮することは現実的な対応ではない。そこで本研究では、重心動揺を数理モデルでフィッティングすることにより、物理的意味が明確な少数のパラメータによってバランス能力を評価できることを明らかにした。 第1章では、本研究の背景、様々なバランス能力の評価方法についてその概要を述べた。 第2章では、静止立位テストの実施方法について説明し、従来の記述統計量指標や数理モデル法を示した。 第3章では、代表的な4種類の線形数理モデルの予測精度を比較することを目的とし、複数人が視覚と床面条件を変えて実施した重心動揺データに対して数理モデルをフィッティングした。推定された係数を用いてシミュレーションを行い、元の重心動揺軌道の記述統計量を予測できるか検証した。検証結果から、粘性係数のみを有する数理モデルは位置に関する記述統計量の予測精度が低いことが明らかになり、剛性係数を含んだ数理モデルを考慮するべきであることを明らかにした。 第4章では、粘性係数と剛性係数を含む線形数理モデルによってバランス能力が衰えた被験者を判定することを目的とし、複数人が視覚と床面条件を変えて実施した重心動揺データから推定した係数を用いて高齢者と若者の分類精度、また転倒経験者と非転倒経験者の分類精度を検証した。検証結果から、視覚と床面条件が重心動揺をより振動的にすることが固有角振動数と減衰比から明らかになり、また高齢者の重心動揺は若者よりも振動的であることが示された。推定された数理モデルの係数をランダムフォレストアルゴリズムの入力データとして用いることで、従来の代表的な記述統計量指標よりも高い精度で高齢者を分類できることが示された。 第5章では、重心動揺を表現する数理モデルと、身長や体重を考慮した倒立振子モデルとの関係性を明らかにすることを目的とし、モデルの導出過程を明確化した。また、数理モデルの係数値がモデルの導出過程で遷移する様子を可視化し、2つの数理モデルの係数間に非線形な関係性があること、ならびにその理論モデルの必要性についての議論を示した。 第6章では、本研究の成果についてまとめ、今後の展望について総括した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5749 号	氏 名	田脇 裕太
論文審査担当者： 主査 慶應義塾大学教授 博士（工学） 村上 俊之			
副査 慶應義塾大学教授 博士（工学）博士（医学） 満倉 靖恵			
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			
学士（工学）、修士（工学）田脇 裕太 君提出の学位請求論文は「Modeling and Analysis for Stability Evaluation of Quiet Standing Posture」（静止立位姿勢の安定性評価のためのモデリングと解析）と題し、6章から構成されている。高齢化が進む社会においては、要介護者数を減少させるための適切なリハビリテーションの実施判断が重要な位置付けとなっている。その判断のため、静止立位テストは最も簡単なテスト法の一つであり、被験者の重心動揺を解析することでバランス能力の評価が行えるものとなっている。しかしながら、過去の研究では70種類以上の指標が提案されており、必ずしも統一的な評価が行えていない。そこで本研究では、重心動揺を数理モデルでフィッティングすることにより、物理的意味が明確な少数のパラメータによってバランス能力の評価が可能な新たな手法を明らかにしている。 第1章では、本研究の目的を述べ、研究の位置付けおよび論文構成を概説している。 第2章では、本研究で着目している静止立位テストの実施方法を示し、従来の記述統計量指標や数理モデル法を概説している。その上で、提案手法の必要性について言及している。 第3章では、粘性項、剛性項の設定が異なる代表的な4種類の線形数理モデルについて、その予測精度を比較するため、2種類の視覚条件（目隠しの有無）および剛性の異なる2種類の床面条件下で、複数人の重心動揺データに対する数理モデルのフィッティング結果を示している。さらに、推定された各モデルの係数を用いてシミュレーションを行うことで、重心動揺軌道に対する記述統計量の予測可能性の検証を行っている。検証結果より、粘性項のみを有する数理モデルは位置に関する記述統計量の予測精度が低くなることから、剛性項を含んだ数理モデルを考慮することが必要であることを明確化している。 第4章では、第3章で得られた知見を活用し、粘性項と剛性項を含む線形数理モデルによってバランス能力が衰えた被験者を判定するため、重心動揺の応答データから推定した各項の係数を利用した高齢者と若者の分類、また転倒経験者と転倒未経験者の分類法を示し、その精度検証を行っている。検証結果から、視覚と床面条件が重心動揺に影響することが明らかとなり、目隠し有の状態、また高剛性の床面ほど振動的な重心動揺の応答となることが判明している。また、高齢者の重心動揺は若者よりも振動的であることが示されている。さらに数理モデルの推定係数をランダムフォレストアルゴリズムの入力データとして用いることで、従来の代表的な記述統計量指標よりも高い精度で高齢者を分類できることが示されている。 第5章では、重心動揺を表現する数理モデル、また立位状態の物理モデルとして倒立振子モデルを仮定し、両モデルの対応関係を明確化するため、数理モデルから倒立振子モデルによる運動方程式への遷移過程を可視化している。これより、数理モデルの係数の遷移過程に非線形な関係性があること、また物理モデルの必要性についての議論を示している。 第6章では、結論を述べ、得られた成果の重要な貢献と今後の展望について総括している。 以上要するに、本研究では人の動作解析とモデリングに関する新たな手法を提案し、実データによる検証によりその有用性を実証したものである。これらの研究は人の運動解析に基づいた人支援システムの実応用を含め、リハビリテーション、生体工学の分野において、工学上、工業上寄与するところが少なくない。 よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第5750号	氏 名	渡邊 大記
主 論 文 題 名：			
Separating Transport Policy and Mechanism in Network Protocol Layering by Inserting New Layer-5 (ネットワークプロトコルレイヤリングにおいて Layer-5 挿入による 通信の転送ポリシと転送メカニズムの分離)			
初期のインターネットのプロトコルレイヤリングアーキテクチャでは、Layer-4 (L4) が Layer-7 (L7) に対して、TCP による信頼性のあるバイトストリームか UDP による信頼性のないデータグラムといった単純なエンドツーエンド通信路を提供していた。インターネットの普及とアプリケーションからの要求の高度化により、マルチパス通信、DTN (Delay/Disruption Tolerant Networking) , ミドルボックスを用いた通信などの高機能なエンドツーエンド通信路が重要となった。高機能なエンドツーエンド通信路は主に現行の L4 に実装されている。SCTP (Stream Control Transmission Protocol) は、L7 へマルチパス/マルチストリーム通信を提供する L4 プロトコルである。また、MPTCP (Multipath TCP) は、TCP を L4 でラップして L7 にマルチパス/マルチストリーム通信を提供する L4 プロトコルである。代表的なミドルボックスである NAT は、エンドツーエンド接続性の原則に反しており layer violation を引き起こす。また、DTN の代表的なプロトコルである Bundle Protocol は独自の階層を導入している。様々な高機能なエンドツーエンド通信路が提案されているが、現在のプロトコルレイヤリングアーキテクチャでは、どの階層が高機能を担うべきか、またそれを実現するためのメカニズムをどの階層が担うべきかが明確になっていない。このような状況は L4 の役割の肥大化と複雑化を招くか、特定の機能のみを提供するエンドツーエンド通信路のモデルが乱立につながる。高機能なエンドツーエンド通信路を明確にモデル化するためには、新たなプロトコルレイヤリングアーキテクチャが必要である。本論文では、高機能なエンドツーエンド通信路のモデルを明確にするために、L4 と L7 の間に挿入される新しい Layer-5 (L5) を提案する。この新しいプロトコルレイヤリングアーキテクチャでは、エンドツーエンド通信路は転送ポリシと転送メカニズムから構成される。転送メカニズムは 2 つのエンドポイント間の通信路として定義され、転送ポリシは転送メカニズムをどのように組み合わせるかの指示として定義される。L4 は TCP と UDP による転送メカニズム (L4-Paths) を L5 に提供する。L5 は、L4 から提供される転送メカニズムを組み合わせ、L7 が指定した転送ポリシを反映するエンドツーエンド通信路 (L5-Path) を L7 に提供する。L7 は、L5-API と呼ばれる共通の API を通じて L5-Path を利用する。本論文では、具体的な L5-Path としてマルチパス通信をモデル化した L5 Bundled Path, ミドルボックスを用いた通信をモデル化した L5 Spatially-Spliced Path, DTN をモデル化した L5 Temporally-Spliced Path を提案する。これらの L5-Path を実現するためのプロトコルと、2 種類の L5-API を設計および実装した。性能評価の結果、各 L5-Path を確立するためのオーバーヘッドは実用上十分に小さいことを示した。また、L5-Path のスループットは、既存の高機能なエンドツーエンド通信路と同等かそれ以上であることを示した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5750 号	氏 名	渡邊 大記
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	博士（工学） Van Meter, Rodney
修士(工学)渡邊大記君提出の学位請求論文は「Separating Transport Policy and Mechanism in Network Protocol Layering by Inserting New Layer-5 (ネットワークプロトコルレイヤリングにおいて Layer-5 挿入による通信の転送ポリシーと転送メカニズムの分離)」と題し全 9 章から構成される。 現在のインターネットプロトコル階層においては、Layer-7 (L7) が使用するマルチパス通信や Delay/Disruption Tolerant Networking (DTN)、ミドルボックスを用いた通信といった高機能通信路は Layer-4 (L4) に詰め込まれて提供されるか機能ごとに独自にモデル化されて提供されるかのどちらかであることが多く、今後もプロトコル階層構造が複雑になることが考えられる。従って複数の高機能性を内包するプロトコル階層構造を再考して階層の役割をより明瞭にする必要がある。 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 章は代表的なネットワークアーキテクチャの関連研究について取り上げ、それぞれの特徴と L7 が使用する高機能通信路のあり方についてまとめている。 第 3 章は導入される New Layer-5 (L5) の役割と設計について述べている。L5 は L4 と L7 の間に挿入される。この新しいプロトコル階層構造では、高機能通信路は転送ポリシーと転送メカニズムから構成される。転送メカニズムは 2 つのエンドポイント間に通信を提供する仕組みであり、転送ポリシーは転送メカニズムをどのように組み合わせるかという指示と定義している。L4 は TCP や UDP を用いて L5 に転送メカニズムを提供する。L5 は L4 が提供する転送メカニズムを組み合わせる L7 から指定される転送ポリシーを反映した高機能通信路 (L5-Path) を L7 に提供する。L5 は従来の L4 とは異なりミドルボックスも含めて通信をモデル化しており、従来の L4 では不可能であった高機能通信をモデル化することができる。 第 4 章は具体的な L5-Path について関連技術と比較しながら述べている。本論文ではマルチパス通信をモデル化した L5 Bundled Path、ミドルボックスを用いた通信をモデル化した L5 Spatially-Spliced Path、DTN をモデル化した L5 Temporally-Spliced Path について扱っている。 第 5 章は L7 が L5-Path を操作するために使用する L5 API (Application Programming Interface) という共通の API の設計について述べている。全ての L5 の機能を共通の API 体系から利用することができれば、L5 API の体系にはどのようなものを用いてもよい。本論文では、伝統的なソケット API とモダンなプログラミング言語の 1 つである Go 言語におけるネットワーク操作のためのライブラリの API のそれぞれに類似した 2 種類の L5 API を設計している。 第 6 章は第 4 章で提案した L5-Path を利用するためのプロトコルについて述べている。 第 7 章は各 L5-Path と L5 API、それらを利用する簡単なアプリケーションの実装について述べている。本論文では管理や開発のしやすさから L5 をユーザ空間ライブラリとして実装している。 第 8 章は第 7 章で実装したアプリケーションを用いて L5-Path の基本的な性能を評価している。評価の結果、各 L5-Path を確立する時間的オーバーヘッドは実用上許容できる範囲であり、L5-Path は既存の高機能通信と同等かそれ以上のスループットを達成することを示している。 第 9 章は本論文の結論であり、論文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、本論文は New Layer-5 を挿入して高機能通信路の転送ポリシーと転送メカニズムを分離することによって階層の役割を明瞭にした。また、L5 は既存の高機能通信だけではなく従来の L4 では不可能だった通信モデルを内包することができ、その貢献は工学上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士(工学)の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第5751号	氏 名	近藤 賢郎
主論文題名：			
ZINK: A Scalable and Secure Information Centric Networking Mechanism Utilizing Layered Network Architecture (ZINK: 階層型アーキテクチャに基づくスケーラブルで安全な Information Centric Networking 機構)			
本論文では、Information Centric Networking (ICN)には、narrow-waist アプローチよりも階層型アプローチが適していると主張し、ZINK と呼ばれる ICN 機構を提案する。ZINK では、ネットワーク上での locator に依存しないコンテンツ名がアプリケーション層では content server の ID のリストに解決され、ネットワーク層では content server の ID が locator にマッピングされることで、locator に基づいたスケーラブルな経路制御が実現される。ネットワーク層では ID/locator 分離のアプローチを採用することで、client と server のモビリティを効率的にサポートすることができる。効率的なコンテンツ転送は、帯域集約やフォールトトレランスのためのマルチパス転送等のトランスポート層の高度な機能を使用することで実現される。トランスポート層の既存の最適化された輻輳制御により、ICN 上の通信フローだけでなく、既存の host-centric な通信フローとの間でも公平性を実現する。ZINK の認証・認可メカニズムは、汎用認証認可インフラ基盤である Diameter の拡張アプリケーションとして実現される。 ZINK の PoC プロトタイプは、IPv6 スタック上に実装される。Diameter ZINK アプリケーションは、Diameter ベースプロトコルの実装である freeDiameter を用いて、Diameter 拡張アプリケーションとして実装される。評価の結果、コンテンツ探索時間が実用的であること、マルチパス転送により効率的なコンテンツ転送が可能であること、モビリティサポート機構がスケーラブルであることを、我が国に跨がる広域実験ネットワーク環境で示した。本論文では、Diameter ZINK アプリケーションの脅威シナリオを、認証・認可情報の詐称、再送攻撃、転送コンテンツの盗聴と定義し、これらの脅威モデルが ZINK 上でのコンテンツ取得のいずれのシナリオにも当てはまらないことを確認した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5751 号	氏 名	近藤 賢郎
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	博士（工学） 手塚 悟
修士（工学）近藤賢郎君提出の学位請求論文は「ZINK: A Scalable and Secure Information Centric Networking Mechanism Utilizing Layered Network Architecture (ZINK: 階層型アーキテクチャに基づくスケーラブルで安全な Information Centric Networking 機構)」と題し、全7章から構成される。 代表的な Information Centric Networking (ICN)機構である Named Data Networking (NDN)は、コンテンツ取得における可用性、真正性、再利用可能性の問題を解決する一方で、インターネット規模で ICN を実現するには経路情報数を中心にスケーラビリティの課題を抱える。また NDN は構造上ユーザの識別が困難なので、ユーザの認証認可においてもコンテンツの前方秘匿性などの課題を抱える。従って NDN が抱えるこれらの課題を解決するためには、新しい方式の ICN の研究開発が必要となる。 第1章は本論文の序章であり、本研究の背景、課題定義、貢献についてまとめている。 第2章は既存の ICN アーキテクチャ3方式と ICN を対象とした既存の認証認可機構16方式を取り上げてそれらを分類し、それぞれの仕組みを詳細に分析している。 第3章は ICN アーキテクチャと ICN 上の認証認可機構のそれぞれに対して本研究で定義した要求事項をもとに第2章で取り上げた既存研究を比較検討し、利点欠点をまとめている。 第4章は本研究で提案する ZINK と呼ばれる階層型アーキテクチャに基づいた ICN 機構と ZINK における認証認可機構を提案している。まず ICN が対象とするアプリケーションについて、in-network cache が効果的に機能するアプリケーションを ICN の対象とすべきであると述べている。次に ZINK が階層型アーキテクチャ上に配置された機能に基づき、ホスト名に紐付かないコンテンツ名によりコンテンツの取得を実現する仕組みを述べている。その後 ZINK におけるコンテンツのネーミング方式、コンテンツ名の解決機構、コンテンツ取得手順、キャッシング機構、モビリティサポート機構、制御プレーン、コンテンツの真正性保証機構など、ZINK で実現される ICN の機能群について述べている。次に ZINK の認証認可機構に関し、ユーザの認証認可が必要なシナリオを4つに整理し、それらのシナリオ毎にユーザの認証認可手順を議論している。次に認証認可機構を Diameter base protocol 上の拡張 Diameter application として実現する方式について述べている。最後に ZINK の制御メッセージのフォーマットや名前解決機構、及びキャッシュ機構におけるデータ構造について議論している。 第5章は第4章で提案した ZINK 及び ZINK の認証認可機構のプロトタイプ実装について述べている。ZINK はネットワーク層における ID/Locator 分離機構である LIN6 を備えた Linux ネットワークスタック上に実装されている。また ZINK の認証認可機構は Diameter base protocol の実装である freeDiameter を用いた拡張 Diameter application として実装されている。 第6章は第5章で作成したプロトタイプ実装を用い、まず ZINK と ZINK の認証認可機構に関し、ノード内処理時間に基づいた基本性能を評価している。次に研究室内実験ネットワーク環境や広域実験ネットワーク環境 (AS2500)において、ZINK ではマルチパス転送が利用可能であることやモビリティサポートのための制御情報量の点でスケーラブルであることなどを確認し、これらの点で ZINK が NDN より優れていることを確認している。また ZINK の認証認可機構に関しては認証認可手続きに対する脅威モデルを定義し、それらが該当しないことを定性的に確認している。 第7章は本論文の結論であり、論文を総括すると共に今後の展望について述べている。 以上、本論文では階層型アーキテクチャに基づく ICN 機構である ZINK とその認証認可機構を設計・実装・評価して既存技術より優れていることを示しており、その貢献は工学上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第5752号	氏 名	鶏内 朋也
主論文題名：			
Human Motion Capture Based on Geometric Consistency Using Visual and Inertial Sensors (視覚センサと慣性センサを用いた幾何学的整合性に基づく人体動作推定)			
人の動きを計測するモーションキャプチャー技術（以下、MoCap）は画像処理やバイオメカニクス分野で盛んに研究されている。MoCapの目的は、人体の3次元姿勢、関節トルク、人体重心など、人の動きを表現する指標を獲得することである。本研究では人々が普段の動作を行う実環境でのMoCapに焦点を当てる。RGBカメラは、人体の骨格に加えて形状に関する情報も捉えることから、全身のMoCapに広く用いられている。近年、慣性計測装置（以下、IMU）も広い範囲を遮蔽の影響なく計測できることから、人体の動作分析のためのデバイスとして有効な選択肢となっている。 本論文では、これらのセンサーの利点を活かし統合することで、計測対象となる人にデバイスを装着することが困難な環境と装着可能な環境の双方におけるMoCap手法をそれぞれ提案する。前者において、本論文は複数視点のRGBカメラを用いたMoCap手法を提案する。2次元画像中の人体の関節位置とシルエットを3次元空間に逆投影することで人体モデルを3次元復元し、人体の重心位置を推定する。実験では、床反力計を使用した定量的な評価に加え、応用として野球の打撃動作中の重心軌道を推定し、提案手法が実環境で行われるスポーツ競技のMoCapに利用可能であることを示した。次に後者のシーンに対して、本論文は1台のカメラと身体に装着した複数のIMUから人体の3次元姿勢を推定する手法を提案する。人の3次元位置を求めるために複数のカメラを配置する既存手法と異なり、本手法は人体モデルの足の接地位置を推定することで、1台のカメラとIMUでの3次元姿勢推定を実現する。姿勢推定のベンチマークデータセットにおいて、カメラのみ、IMUのみを用いた手法と比較して、提案手法が関節位置の誤差をそれぞれ68.8%、80.9%低減することを確認した。本手法は、IMUを用いた既存のMoCapと同じく、姿勢推定を始める際に複雑な前処理を必要とする。この制限を緩和するために、本論文では最後にこの前処理を自動化するフレームワークを提案する。提案された深層学習ネットワークは、IMUの数秒の歩行データから各IMUがどの部位にどのような相対姿勢で装着されているかを推論する。公開されたデータセットを使用した実験で、各IMUが装着された部位を識別するタスクにおいて既存手法の精度を8.5%上回ることを確認した。 以上のように、本研究では実環境での使用を想定した二つのMoCap手法と、IMUキャリブレーションフレームワークを提案した。本論文では提案された技術の応用可能性と、関連する研究領域への貢献についても述べられている。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5752 号	氏 名	鶏内 朋也
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 慶應義塾大学准教授	博士（メディアデザイン学）	杉浦 裕太
	工学院大学准教授	博士（工学）	三上 弾
	産業技術総合研究所	博士（工学）	多田 充徳
学士（工学）、修士（工学）鶏内 朋也君提出の学位請求論文は、「Human Motion Capture Based on Geometric Consistency Using Visual and Inertial Sensors（視覚センサと慣性センサを用いた幾何学的整合性に基づく人体動作推定）」と題し、6 章で構成されている。 人の動きを計測するモーションキャプチャ（以下、MoCap）は、人体の 3 次元姿勢、関節トルク、人体重心、移動速度など人の動きを表現する指標を推定する技術である。従来から研究開発が進んでいる専用の装置による実験室での MoCap に対して、近年はスポーツ競技中や日常生活のような実環境での MoCap も試みられているが、計測範囲が限定されたり動きの推定精度が悪かったりする問題があった。本論文は、実環境で利用可能なカメラと慣性計測装置（以下、IMU）から得られる計測データから、対象動作や環境の幾何学的整合性を利用して動きを表現する指標を高精度に推定する新しい手法を提案し、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、カメラや IMU を利用した MoCap について概観し、それらが利用可能な環境や条件を分析し、本論文で提案する手法の位置づけを述べている。 第 2 章では、コンピュータビジョン技術に基づくカメラを使った MoCap、IMU を利用した MoCap、さらにそれらを併用した MoCap に関連した技術についてのサーベイが示されている。 第 3 章では、本論文で提案している多視点カメラを利用した MoCap について述べられている。多視点カメラに同時に撮影される空間が限定されるため、広い範囲を動き回らないスポーツ競技中で実環境利用を想定した手法であり、多視点カメラで撮影された被験者のシルエットから多視点幾何解析により求めた 3 次元体積データから、競技動作中の重心の 3 次元位置の時間変化を捉えることができる。床反力計による計測値と提案手法による推定値の比較により計測精度を検証するとともに、提案手法により推定した野球の打撃動作中の 3 次元重心軌跡の妥当性を示し、提案手法が実環境で行われるスポーツ競技の MoCap に利用可能であることを示している。 第 4 章では、IMU と 1 台のカメラを利用することにより、広範囲に移動する被験者の 3 次元姿勢を位置と共に推定する手法を提案している。本手法では、カメラから得られる被験者の動作に関する幾何学的制約と IMU により計測される動作データに基づき姿勢を最適化する。実験により、1 台のカメラのみを使った場合と IMU のみを使った場合に比べ、提案手法が関節位置の推定誤差をそれぞれ 69%、81%低減できることを示し、提案手法の有効性を検証している。 第 5 章では、IMU を利用した MoCap において、複数の IMU を被験者に装着する際に従来必要とされていたキャリブレーション作業を簡略化する手法を提案している。本手法では、身体に装着された IMU 同士の相互関係を学習するネットワークにより、各 IMU が装着された関節位置の自動判定を実現し、従来手法に比べて推定精度が 8.5%改善したことを示している。 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 MoCap 技術により実現される新しい応用事例の可能性や、さらに今後解決すべき研究課題について議論している。 以上要するに本研究は、モーションキャプチャをスポーツ競技時や日常生活時の実環境で実現するための新たな方法を提案し、カメラや IMU から得られるデータの幾何学的整合性を利用した最適化や機械学習アルゴリズムが従来法と比べ推定精度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5753号	氏 名	富所 拓哉
主論文題名： Propagation of Laminar Premixed Flames with Equivalence Ratio Gradient across the Flame Front (火炎面に垂直な当量比勾配を伴う層流予混合火炎の伝播)			
内燃機関の高効率化・低環境負荷化をもたらす新たな燃焼技術では、燃料と空気の不均一な混合気中を伝播する予混合火炎（成層火炎）が生じる場合がある。従って、火炎伝播に対する混合気の局所的な当量比勾配の影響を解明することは、数値モデル開発や燃焼器設計の高度化において重要である。そこで本論文では、火炎面に垂直な当量比勾配を伴う混合気中を伝播する層流予混合火炎の特性と、そのメカニズムの解明を目的とする。層流対向流火炎の一次元数値シミュレーションにおいて、混合気の当量比を過渡的に変化させることで、成層火炎の解析を行った。さらに、化学種モル分率や温度の分布の違いから、成層火炎と均一な混合気中の火炎の燃焼速度が異なる原因を解明した。 第1章では、研究背景を概説し、成層火炎の基本概念を述べた後、本論文の動機と概要を述べた。 第2章では、本論文で使用する数値コード OPUS の物理モデルおよび数値計算手法について述べた。 第3章では、Back Support 効果（BS 効果）として知られている、成層火炎と均一な混合気中の火炎の燃焼速度が異なる現象のメカニズムを解明するため、混合気当量比の正弦的な振動に対するメタン／空気火炎の応答を解析した。これより、成層火炎では火炎下流の燃焼ガスから反応帯に向かって軽くて反応性の高い化学種、特に H/O ラジカルや水素分子が選択拡散することで BS 効果が生じることを示した。 第4章では、流れ場のひずみ速度が BS 効果に与える影響を調べるため、異なる大きさのひずみ速度をもつ対向流場において過濃から希薄混合気に伝播するメタン／空気成層火炎の解析を行った。これより、流れ場のひずみ速度が大きくなると、火炎帯における局所的な当量比勾配が増大して、BS 効果が強められることを示した。 第5章では、過濃から希薄混合気に伝播するメタン／空気成層火炎に水素を燃料割合で0から40%添加した場合の BS 効果への影響を検討した。結果として、未燃混合気中の水素分子の濃度勾配により、水素分子が火炎帯から未燃混合気に向かって選択的に拡散し、BS 効果が抑制されることを示した。 第6章では、アンモニアを燃料とする成層火炎の解析を行い、メタンが燃料の場合と同様に、主に水素分子の選択拡散を原因として BS 効果が生じることを示した。さらに、成層火炎の量論組成付近の燃焼ガス中では、主要な大気汚染物質である一酸化窒素が還元される反応が生じることを示した。 第7章では、本論文の結論をまとめて、今後の展望を述べた。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5753 号	氏 名	富所 拓哉
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 横森 剛
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 松尾 亜紀子
		慶應義塾大学准教授	Ph. D. 安藤 景太
		慶應義塾大学専任講師	博士（工学） 藤岡 沙都子
学士（工学）、修士（工学）を有する富所拓哉君の学位請求論文は「Propagation of Laminar Premixed Flames with Equivalence Ratio Gradient across the Flame Front（火炎面に垂直な当量比勾配を伴う層流予混合火炎の伝播）」と題し、全 7 章からなる。本論文をもって、2021 年 11 月より主査及び副査による専修内予備審査が開始され、本人からの研究内容説明とそれに対する質疑応答などを経て 12 月 15 日に同予備審査を通過し、2022 年 1 月 6 日の専攻連絡会議において受理申請が承認された。その後、1 月 31 日に公聴会および最終審査会が行われ、最終的な論文審査と学識確認を経て本報告を行うに至った。 以下、本論文の概要について述べる。 内燃機関を含む多くの燃焼器においては、成層火炎と呼ばれる燃料と空気の濃度不均一な混合気中を伝播する予混合火炎が形成され、その濃度不均一性が火炎伝播速度を変化させることで、燃焼器内での着火の成否や燃焼安定性に多大な影響を与えるものと考えられている。しかし、気体中の燃焼現象（火炎）は流動、熱・物質輸送、短時間での化学反応といった複合的な物理化学現象を内包しており、さらに濃度不均一混合気中を伝播するような火炎では、それらの時空間変化を伴う複雑現象となることから、濃度不均一性が火炎伝播速度を変化させる詳細なメカニズムにまでは十分な理解が及んでいないのが現状であった。本論文は、濃度不均一性すなわち当量比勾配を伴う混合気中を伝播する層流予混合火炎について詳細化学反応まで考慮した一次元の燃焼数値シミュレーションを実施し、濃度不均一性が火炎伝播速度などの燃焼特性に与える影響およびその物理的・化学的メカニズムについて詳細に解明した内容となっている。 第 1 章では、研究背景を概説し、濃度不均一な混合気中を伝播する予混合火炎の基本概念を解説した後、本研究の動機と概要について述べている。第 2 章では、本研究で使用する燃焼数値シミュレーションの物理化学モデルおよび数値計算手法について述べている。第 3 章では、濃度不均一な混合気中を伝播する予混合火炎に特有な現象として現れる Back Support 効果に焦点を当て、メタン/空気予混合火炎における火炎伝播速度の変化や火炎の内部構造の変化から、その Back Support 効果のメカニズムについて言及している。具体的には、火炎下流の燃焼ガスから反応帯に向かって軽量で反応性の高い化学種、すなわち H ラジカル、O ラジカルおよび水素分子が選択的に拡散することで Back Support 効果が生じることを明らかにしている。第 4 章では、流れ場のひずみ速度が Back Support 効果に与える影響について検討を行っている。結果として、流れ場のひずみ速度が大きくなると、火炎帯内における局所的な当量比勾配が急峻化し、それに伴う物質拡散量の増大によって Back Support 効果が強化されることを明らかにしている。第 5 章では、メタンに水素を添加した混合燃料/空気予混合火炎において、水素の添加が Back Support 効果に与える影響について検討を行っている。結果として、未燃混合気中の水素分子の濃度勾配により、水素分子が火炎帯から未燃混合気に向かって選択的に拡散し、Back Support 効果が抑制されることを明らかにしている。第 6 章では、次世代燃料の一つとして期待されるアンモニアを燃料として、前章までと同様な検討を行い、メタンが燃料であった場合と同様に水素分子の選択拡散が Back Support 効果を発現させることを明らかにしている。さらに、量論組成付近の燃焼ガス中では、主要な大気汚染物質である一酸化窒素が還元される反応が生じることにも言及している。最後に第 7 章では、本論文の結論をまとめ、今後の展望について述べている。 以上要するに、本論文の成果は、濃度不均一な混合気中を伝播する予混合火炎において、その濃度不均一性が火炎伝播速度といった燃焼特性を変化させる物理的・化学的メカニズムについて詳細に解明しており、火炎伝播速度の定量的な考慮を必要とする実燃焼器設計等において有用な知見を与えるなど、工業上および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5754号	氏 名	中村 文彦
主論文題名： Embedded Facial Surface Sensing and Stimulation: Toward Facial Surface Interaction in Virtual Environment (バーチャル環境におけるフェイシャルサーフェスインタラクションに向けた 組込型顔表面計測・刺激に関する研究)			
コンピュータの発展に伴い、ヒューマンコンピュータインタラクションのための入出力の手法が数多く開発されてきた。消費者向けの機器にもジェスチャ入力導入され、バーチャルリアリティ（VR）向けの頭部装着型ディスプレイ（HMD）なども普及している。HMDを装着すると、実世界を見ることが難しいため、身体を使ったインタラクションが有効である。そのようなインタラクションの手法の一つとして、細やかに動かすことが可能であり、また、刺激に敏感な部位である顔を用いたインタラクションが行われている。本論文では、顔を用いたインタラクションのための手法を2つ提案する。一つは、HMDに組み込んだ光センサを用いて口元の形状を計測・認識する手法であり、もう一つは、HMDに取り付けられたロボットアームを用いて頬に空間の方向情報を触覚提示する手法である。 まず、HMD組込式光センサを用いて口の形を6クラスに分類し、母音認識によって訓練データを自動的にラベル付けする手法を提案する。訓練データを手動と自動でラベリングする2条件で口元形状の認識精度を比較し、自動ラベリングは手動ラベリングとほぼ同等の高い精度で認識できることが示された。さらに、認識結果を基にアバターに口の形状を反映した。 次に、HMDに取り付けられた小型のロボットアームを用いて、頬への触覚刺激による空間方向誘導を行う手法を提案する。まず、ロボットアームに取り付けられた距離センサを用いて頬表面を推定する。そして、ターゲット方向に対応した頬表面の位置を計算し、ロボットアームでその位置を刺激し方向情報を提示する。実験から、本手法によって実験参加者をターゲット方向に高い精度で誘導できることを示した。また、本手法の空間誘導における有効性について検証し、タスクパフォーマンス・ユーザビリティ・ワークロードが改善されることを示した。 本論文を通して、フェイシャルサーフェスインタラクションのために必要な顔面形状の推定・顔面に対する刺激を可能にする手法を提案する。これらの技術は、大きく複雑に変形する形状の計測とピンポイントへの刺激の提示という面でこれまでの顔表面上のインタラクションの可能性を広げるものである。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5754 号	氏 名	中村 文彦
論文審査担当者： 主査 慶應義塾大学教授 博士（工学） 杉本 麻樹			
副査 慶應義塾大学教授 博士（工学） 斎藤 英雄			
慶應義塾大学准教授 博士（メディアデザイン学） 杉浦 裕太			
EC Nantes Associate Professor Ph.D. Jean-Marie Normand			
学士（工学）、修士（工学）中村 文彦君提出の学位請求論文は「Embedded Facial Surface Sensing and Stimulation: Toward Facial Surface Interaction in Virtual Environment（バーチャル環境におけるフェイシャルサーフェスインタラクションに向けた組込型顔表面計測・刺激に関する研究）」と題し、6章から構成されている。 バーチャルリアリティ(Virtual Reality, VR)技術は時空間を越えた知覚・認知の拡張をもたらし、遠隔コミュニケーションやエンタテインメントなど、さまざまな分野への応用が期待されている。一方で、普及が進む一般的な VR システムでは、計測される情報が頭部や四肢の運動などに限定されていることと、提示される触覚情報が主に手や体幹表面といった部位に限定されているという制約があった。本論文では、低次元の反射型光センサの情報を活用することで、頭部装着型ディスプレイ(Head Mounted Display, HMD)に組み込んだ顔表面上での形状計測と触覚刺激提示を行うシステムを提案し、実装したシステムを用いて性能を検証している。 第1章では、研究の背景と目的を述べ、本論文の構成を概説している。 第2章では、VR 技術の動向、環境構築のための計測・刺激システムについて関連研究をまとめている。 第3章では、人間の感覚受容器の分布に関する基礎的な解剖学知見を踏まえて、フェイシャルサーフェスインタラクションの構成要素として必要とされる計測と刺激提示の設計要件を述べている。 第4章では、HMD 組み込み型光計測システムを用いた顔表面形状の計測について述べている。反射型光センサアレイによる計測システムの設計を示した後、マルチモーダル情報に基づく状態識別のための機械学習器の訓練データの自動ラベリング手法について説明している。また、機械学習器によって識別した基底表情クラスへの所属確率に基づいて、基底表情に対応した幾何形状を合成することにより頬の形状を再構成が可能であることを示している。 第5章では、HMD 組み込み型ロボットアーム機構による頬への触覚刺激提示について述べている。小型モータと反射型光センサを用いた触覚刺激提示システムの機構設計を示した後、刺激提示に必要とされる頬表面形状の推定手法について説明している。また、実装した頬への触覚刺激提示を用いて、バーチャル環境のユーザに対して方向ナビゲーションが可能であることを示している。 第6章では、各章で得られたフェイシャルサーフェスインタラクションのための計測と刺激に関する知見をまとめ、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、バーチャル環境におけるフェイシャルサーフェスインタラクションのための顔表面計測と触覚刺激提示手法を提案し、その有効性を実証しており、インタラクティブメディア分野において、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5755号	氏 名	澤田 大智
主 論 文 題 名 :			
刺激応答性部位を有する両親媒性化合物が形成する超分子集合体の相転移			
本研究では、相転移挙動を示す分子システムの構築を目指し、pH、光、酸化還元応答性部位を有する両親媒性化合物を合成することで、水中で形成される分子集合体が相転移する系を構築した。また、それらと相互作用する化合物を混合することで、膜構成成分の組成が変化することで誘起される pH 応答性、経路依存性相転移、複数の相構造を有する分子集合体の相転移などの更なる特徴を持たせることを目指した。 第1章では、本論文の背景および目的を述べた。「生命とは何か？」という自然科学における根本的な問いに対して、化学の観点からは、生体分子またはそれらを模倣した合成分子によって生命らしさを追求するボトムアップ的なアプローチが試みられている。そのような観点でよく用いられる水中で形成される分子集合体の特徴を述べ、刺激応答性を有する分子からなる超分子集合体の相転移が、分子の変換によって誘発される例を述べ、生体内で見られるような階層性を持つ分子システムを構築した事例を示した。 第2章では、生体膜に類似した構造をもつベシクルの pH 応答性が、構成成分の組成によって変わる化学システムの構築を目指した。イミン結合を有する両親媒性化合物とオレイン酸からなるベシクルの挙動を調査した結果、強酸性条件に耐性があることを見出した。これは、イミンの加水分解に伴って膜構造が変化したことによると考えられた。 第3章では、刺激を加える順序に依存した経路依存性の相転移を誘発する分子集合体の構築を目指した。先に還元剤を添加し UV 照射すると、結晶がベシクルに相転移した後、ベシクルが融合し、先に UV 照射し還元剤添加すると、ワーム状の集合体がシート状の集合体に成長することを見出した。これは、アゾベンゼンの光異性化およびジスルフィドの還元に伴う構成成分間の相互作用が変化したことによると考えられた。 第4章では、カチオンおよびアニオン性両親媒性化合物を混合することで、その組成に応じて異なる分子集合体が形成され、それらが UV 照射によって相転移する系の構築を目指した。組成の変化により、ベシクルや分子が配向した相を持つ集合体が形成され、UV 照射によってコアセルベート液滴に相転移することが認められた。これはアゾベンゼンの光異性化に伴う分子変換によって誘起されたと考えられた。 第5章では、本論文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 5755 号	氏 名	澤田 大智
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	Ph. D. 堀田 篤
		慶應義塾大学教授	博士（農学） 奥田 知明
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 藤本 啓二
工学士，工学修士 澤田大智君提出の学位請求論文は「刺激応答性部位を有する両親媒性化合物が形成する超分子集合体の相転移」と題し，5章から構成されている。 生命システムの特徴から着想を得て，分子が自発的に秩序構造を生み出すプロセスを人工的に再現しようとする試みが，近年活発になされている．本論文では，非共有結合性の相互作用により形成される超分子集合体に注目し，pH，光，酸化還元などに応答する部位を有する両親媒性化合物を合成し，その超分子集合体形成能について検討している．そして，それら超分子集合体において，実際に外部からの刺激に応答した相転移が誘発されることを確認している． 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．「生命とは何か？」という自然科学における根本的な問いに対する，化学からのボトムアップ的なアプローチや，当該分野でよく用いられる水中で形成される超分子集合体の特徴，これまでに見出された刺激応答性を有する分子からなる超分子集合体の相転移現象を紹介しながら，生体内で見られるような階層性を持った分子システムを構築した事例を示し，本研究の立ち位置を明示している． 第2章では，両親媒性分子が形成する二分子膜袋状構造体であるベシクルの刺激応答性を精密に制御する手法の確立を目指して，酸性条件下で速やかに加水分解するイミン結合を導入したカチオン性の両親媒性分子からなるマイクロメートルサイズのベシクル（ジャイアントベシクル）の pH 応答性について検討している．このジャイアントベシクルは，弱酸から強塩基性の幅広い pH 条件で安定に存在した一方で，比較的強い酸性条件下では，設計通り速やかに崩壊することを見出している．また，オレイン酸を共存させたジャイアントベシクルは，イミンの加水分解に伴って強固な膜構造を形成するために，さらに強い酸性条件にも耐性があることを見出している． 第3章では，2つの刺激を与える順序にもとづいて異なる超分子集合体へと相転移するという，経路依存性をもった化学システムの構築を目指し，アゾベンゼン骨格の光異性化反応とチオールジスルフィドの酸化還元反応に伴う超分子集合体の変化を追跡している．アゾベンゼンおよびジスルフィド結合を有する両親媒性化合物は水中で結晶として存在し，これに対して先に還元剤を添加して紫外光照射すると，ジャイアントベシクルに相転移した後，それらが融合することを見出している．一方で，先に紫外光照射して還元剤を添加すると，結晶がワーム状の集合体となり，それらがシート状の集合体に成長し，本化学システムが経路依存性を有することを見出している． 第4章では，特定の条件下で化学反応を促進する超分子集合体が形成される化学システムの構築を目指し，アゾベンゼン骨格を有するカチオン性の両親媒性化合物とアニオン性両親媒性化合物からなる分子集合体の光応答性について検討を行っている．これらの組成の違いにより，ジャイアントベシクルや結晶といった種々の集合体が認められたが，紫外光照射下では，いずれも酵素反応を促進するコアセルベート液滴に相転移することを見出している． 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 pH，光および酸化還元応答性部位を有する両親媒性化合物を新たに合成し，それらからなる超分子集合体が，加水分解反応，光異性化反応，酸化還元反応による構成成分の分子変換にともない，その場の環境に応じて相転移することを示したものであり，有機物質化学ならびにコロイド・界面化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5756号	氏 名	難波江 佑介
主論文題名：			
Drag Reduction Effect by Traveling Wave-Like Wall Deformation in Turbulent Channel Flow (チャネル乱流における進行波状壁面変形による抵抗低減効果)			
持続可能な社会に必要な不可欠なエネルギーの効率的な利用のため、流体の流れに伴う摩擦抵抗低減のための流れの制御手法の確立は重要である。本論文では、直接数値シミュレーション(DNS)を用いて、壁面変形による2種類の主流方向進行波(スパン方向に一樣な進行波、およびウェーブマシン状進行波)の制御効果を、様々なレイノルズ数における十分発達したチャネル乱流において調査した。 スパン方向に一樣な進行波では、レイノルズせん断応力(RSS)の乱流成分の減少だけでなく RSS の周期成分による寄与が、バルク速度を増加させる、つまり抵抗を低減させる方向に働いた。DNS の結果により得られたスケーリングに基づいて、抵抗低減率の予測を行うための平均流速分布に対する半経験式の提案を行った。この半経験式による予測の結果、実現象に匹敵する高レイノルズ数 $Re_\tau \sim 10^5 - 10^6$ においても 20%–25% の抵抗低減率が期待できることが示唆された。 ウェーブマシン状進行波では、RSS の乱流成分の大幅な減少が確認された一方、ウェーブマシン状の壁面による主流方向に沿った大規模構造によって、一樣な進行波の場合では見られなかった正の RSS の周期成分が対数則領域に生成された。これらによって、一樣な進行波の場合よりも、ウェーブマシン状進行波の場合の方が抵抗低減効果が小さくなったと考えられる。 より高い抵抗低減効果を得るために、確率過程に基づくベイズ最適化を用いて、スパン方向に一樣な進行波の制御パラメータの最適化を行った。最適化の結果、従来のパラメトリックスタディの結果よりもはるかに高い 60.5% の抵抗低減を達成した。これらの結果は、パラメータを微調整することにより進行波状壁面変形制御の乱流摩擦抵抗低減効果が大幅に向上する可能性を示している。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5756 号	氏 名	難波江 佑介
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学），TeknD 深潟 康二
	副査	慶應義塾大学教授	Dr. -Ing. 小尾 晋之介
		慶應義塾大学准教授	Ph. D. 安藤 景太
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 小林 宏充
学士（工学）、修士（工学）、難波江佑介君提出の学位論文は、「Drag Reduction Effect by Traveling Wave-Like Wall Deformation in Turbulent Channel Flow（チャネル乱流における進行波状壁面変形による抵抗低減効果）」と題し、本編 6 章により構成されている。 様々な産業機器に現れる流体の流れに起因する流動抵抗はエネルギー損失の大きな要因である。このうち壁に沿う乱流の摩擦抵抗に関しては、これまでも壁面性状の工夫などの受動的な手法や、センサ・アクチュエータを用いたフィードバック制御手法などが研究されてきたものの、前者では効果が十分でなく、後者は実用デバイス製作が困難であることから、どちらもいまだ実用化には達していない。一方、ここ 10 年来、センサを用いず流れにアクチュエーションを加える進行波状壁面変形が精力的に研究されており、低レイノルズ数の乱流に対しては顕著な乱流摩擦抵抗低減効果が数値シミュレーションや風洞実験によって確認されている。しかしながら、実際の産業機器に現れる高レイノルズ数乱流におけるその効果は未知であり、今後実用化に向けた研究を推進するためには、高レイノルズ数乱流における制御効果を明らかにする必要がある。本論文の著者はこの点を解明すべく、異なるレイノルズ数のチャネル乱流の直接数値シミュレーション（DNS）を行うことで進行波状壁面変形による乱流摩擦抵抗低減効果を調査している。また、その効果について、レイノルズ数に依存しないスケールリング則を見出すことにより、高レイノルズ数乱流における制御効果を予測する半経験式を提案している。さらに、実際の進行波状壁面変形デバイスにおいて避けることが難しいスパン方向の振幅変化を考慮した DNS も行い、その効果を検討している。 第 1 章では、乱流の制御に対してこれまでに提案された数々の手法を分類し、それらの長所および短所を整理し、問題点を抽出することにより、本研究を動機づけている。 第 2 章では、本研究で用いる DNS の数値計算手法や計算条件、および制御効果の評価手法について述べるとともに、本研究における DNS 結果の健全性の確認を行っている。 第 3 章では、スパン方向に一樣な進行波状壁面変形を対象とし、異なるレイノルズ数のチャネル乱流に対して壁面変形のパラメータである振幅、波数、位相速度を様々に変化させた DNS を行い、抵抗低減効果および乱流統計量の変化に関して詳細な分析を行っている。さらに、制御された流れの平均流速分布に関してレイノルズ数に依存しない半経験式を提案し、高レイノルズ数における抵抗低減効果を予測している。これより、実用機器における高レイノルズ数乱流においても、本制御手法で 20-30%の抵抗低減が可能であることが示されている。 第 4 章では、スパン方向に振幅変化がある場合の進行波の DNS を行い、そのスパン方向波長が極端に短くならない限り十分な抵抗低減効果が得られることを示し、スパン方向に一樣な進行波の場合との抵抗低減メカニズムの相違点を明らかにしている。 第 5 章では、さらなる抵抗低減の可能性を探るべく、DNS とベイズ最適化を組み合わせることによって進行波パラメータの最適化を行っている。その結果、比較的低レイノルズ数のチャネル乱流に対して、周期的な流量変動を許す場合には 60%の抵抗低減も可能であることが示されている。 第 6 章は結論であり、本論文の結果の総括と今後の展望を述べている。 以上の研究結果は、従来手法に比して実用化可能性の高い乱流摩擦抵抗低減手法の構築の礎となるものであり、これを発展させ実用化させることによりカーボンニュートラル社会の達成にも資することが期待され、学術的にも工学的にも極めて有意義といえる。 よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第5757号	氏 名	寺島 康平
主論文題名： 自然環境に調和した太陽エネルギー利用を可能とする PV/T ソーラーパネルに関する研究			
現在再生可能エネルギーとして太陽光発電の普及が加速しており，世界における太陽光発電容量は 2050 年に 4.6 TW を上回る見込みである．しかしその一方で，現在の太陽電池の変換効率は良くても 20 %程度であり，残りの 80 %が外気温+30 °C 程度の高温の熱に変換されて大気を加熱し，周囲環境に影響を及ぼす可能性がある．また一般世帯における熱需要は全体の 56.2 % を占めており，熱供給をどのように行うかが脱炭素社会の実現に向けて重要である．そこで本研究では，太陽電池(PV)と集熱器(T)を組み合わせた PV/T ソーラーパネルの開発を行った．このパネルは太陽エネルギーを熱・電力に高効率に変換し，環境への熱負荷を削減することが可能である．本論文では，以下の研究成果について記述する． (1) 自然環境調和型 PV/T ソーラーパネルの開発 減圧沸騰集熱装置と太陽電池を組み合わせた新たな概念の PV/T ソーラーパネルを開発し，その性能を実験的に検証した．開発した PV/T ソーラーパネルは，夏季において太陽エネルギーの 71.3 %を利用可能であり，パネル表面温度を 45 °C 程度まで抑制できることを示した． (2) 自然環境に調和した日射利用を可能とする実用的かつ包括的な CIS PV/T ソーラーパネルの開発 新たに開発した扁平管型凝縮器および CIS PV モジュールを用いて，全ての機能を PV パネルとほぼ同等の面積に包括的に組み込んだ実用的な PV/T ソーラーパネルを開発し，その性能を実験的に検証した．このパネルは，小型化を実現しながら，夏季に太陽エネルギーの 73.5 %を変換可能で，環境への熱放射も通常の PV パネルと比較して 20 °C 程度抑制可能であることを示した． (3) 自然環境調和型 PV/T ソーラーパネルの導入による ZEH への貢献 自然環境調和型 PV/T ソーラーパネルの導入により，4 人家族構成の戸建住宅における一年間のエネルギー需要を賄える熱電供給設備のシステムデザインを試み，ゼロ・エネルギー・ハウス (ZEH) の可能性をモンテカルロ法を用いたシミュレーション計算により検証した．PV/T ソーラーパネルの導入面積が 24 m²，PV パネルの導入面積が 8 m² のときに，住宅の 98.8%のエネルギーを太陽エネルギーのみで供給可能であり，太陽電池のみを導入した場合と比較して，環境熱負荷エクセルギーを 49.1 %削減可能であることを示した．			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5757 号	氏 名	寺島 康平
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 伊香賀 俊治
	副査	慶應義塾大学名誉教授	工学博士 佐藤 春樹
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 高橋 正樹
		東京農工大学教授	博士（工学） 秋澤 淳
学士（工学）、修士（工学）、寺島康平君提出の学位請求論文は「自然環境に調和した太陽エネルギー利用を可能とする PV/T ソーラーパネルに関する研究」と題し、7 章からなっている。 持続可能な開発目標（SDGs：Sustainable Development Goals）が採択され、持続可能な社会の達成に向けた取り組みが世界的に加速している。その中でも脱炭素社会の実現は重要な課題として認識されており、パリ協定にて地球の気温上昇を産業革命前に比べて 2℃未満に抑制することが目標とされている。このような社会情勢から、現在再生可能エネルギーとして太陽光発電の普及が加速しており、世界における太陽光発電容量は 2050 年に 4.6 TW を上回る見込みである。しかしその一方で、現在の太陽電池の変換効率は良くても 20 %程度であり、残りの 80 %が外気温+30℃程度の高温の熱に変換されて大気を加熱し、環境に影響を及ぼす可能性がある。そこで本研究では、太陽電池(PV)と集熱器(T)を組み合わせた PV/T ソーラーパネルの開発を行った。このパネルは太陽エネルギーを熱・電力に高効率に変換し、環境への熱負荷を削減することが可能である。本論文では、以下の研究成果について記述している。 第 1 章では、序論として本研究の背景、目的と論文構成を示した。 第 2 章では、脱炭素社会に向けた国内外の動向を示した。 第 3 章では、本研究に関連した既往研究を示した。 第 4 章では、日射を電力・熱に高効率に変換でき、パネルからの熱放射を抑制する新たな概念の PV/T ソーラーパネルを開発し、その性能を実験的に検証した。開発した PV/T ソーラーパネルは、夏季において、太陽エネルギーの 71.3 %を利用可能であることを示した。 第 5 章では、自然環境に調和した太陽エネルギー利用を実現するために、全ての機能を PV パネルとほぼ同じ面積に包括的に組み込んだ、実用的な PV/T ソーラーパネルを開発し、その性能を実験的に確認した。このパネルは、小型化を実現しながら、夏季に太陽エネルギーの 73.5 %を変換可能で、環境への熱放射も通常の PV パネルと比較して 20℃程度抑制可能であることを示した。 第 6 章では、自然環境調和型 PV/T ソーラーパネルの導入によって、4 人家族構成の戸建住宅における一年間のエネルギー需要を賄える熱電供給設備のシステムデザインを試み、ゼロ・エネルギー・ハウス（ZEH）の可能性をシミュレーション計算により検証した。PV/T ソーラーパネルの導入面積が 24 m²のときに電力消費量が最小となり、住宅の 98.8%のエネルギーを太陽エネルギーのみで供給可能であることを示した。 最後に第 7 章では、本論文の結論と今後の展望を述べたものであり、エネルギー・環境工学分野において、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.5758	Name	TRABELSI, Abir
Thesis Title Risk Management in Supply Chain Contracts			
Our research explores the pricing and contracting strategies for seasonal product supply chains (SC). Such products have a long production lead time and a short selling season. In addition, the related customer demand is highly uncertain, and the salvage value is low. Therefore, an agreement that helps the buyers hedge against the demand uncertainty and the long lead time is needed. One suitable agreement is an option contract. This contract allows the buyer to reserve capacity (options) at the supplier at an early stage. Then, after updating his demand forecast, the buyer has the right, but not the obligation, to purchase (execute) from the reserved option. However, this contract moves all the demand risk on the supplier. Therefore, we study a combination of the option contract with a wholesale price contract (a commitment option contract). In the first part, we examine the effect of this agreement in hedging the demand uncertainty. We start by studying a commitment option contract in a two-stage single supplier- single buyer SC. The problem is a Stackelberg game with the supplier as a leader. We model the problem as a bilevel program and determine the supplier's optimal pricing strategy and the buyer's optimal order strategy under different decision scenarios. We found that the commitment option contract may guarantee better outcomes for both members than the wholesale price contract. Mainly due to the offered flexibility. The sensitivity analysis shows that the commitment option contract was effectively hedging against the early forecast inaccuracy. However, when the Stackelberg supplier makes all the price decisions, the study found that the supplier gets the SC's total expected profit and leaves the buyer with an infinitesimal profit. Therefore, in the second part, we study competition in commitment option contracts. The study considers two suppliers - one buyer SC when market demand is stochastic. The suppliers compete by offering a commitment option contract to the buyer. First, we determined the optimal ordering and selection strategy of the buyer. From this, we determined the optimal bidding strategy of the suppliers. Finally, we characterize the game equilibria. We found that contrarily to the Bertrand game where the lowest cost supplier is the winner. With the commitment option contract structure, multiple equilibria are possible. A supplier with a higher total option cost can still be selected. In addition, we visualized the positive effect of the competition in Stackelberg games on the buyer's outcome.			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5758 号	氏 名	TRABELSI, Abir	
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	松川 弘明
	副査	慶應義塾大学教授	Ph. D.	増田 靖
		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
上記の TRABELSI, Abir（トラベルシ・アビル）君の学位請求論文では、「Risk Management in Supply Chain Contracts（サプライチェーン契約におけるリスクマネジメント）」との題目のもとで、サプライチェーン契約におけるリスクマネジメントの手法を考察・提案している。 近年、サプライチェーンマネジメントの研究の1つの領域としてサプライチェーン契約問題が注目を浴びている。純粋な最適化はサプライチェーン上のすべての企業が統合意思決定を行うことであるが、市場経済の下ではそれが不可能であり、従って情報共有モデルが多く研究されてきた。しかし、競争が前提になっている場合には情報共有ができないことがあり、できたとしても隠れた行動をとる問題があることが指摘されている。このような背景のもとで、各企業が独立に意思決定を行うことを前提としながら、サプライチェーン契約手法を用いてサプライチェーンの最適化を実現する研究が行われてきた。 このような背景のもとで、本論文は、1年に1回限りの新製品の生産販売問題（One shot production problem）を対象とし、製品開発設計時点に比べて生産開始時点における需要予測精度が高くなる特徴を利用して、製品開発設計段階で一定量の確定注文を受け付けると同時に、生産開始時点で追加購入できる権利を提供するオプション契約の問題について研究を行っている。本論文の主な貢献は、1番目にバイヤーの製品開発段階の確定注文量、オプション購入量、オプション行使量を最適に決めるだけでなく、サプライヤーの販売価格、オプション価格、オプション行使価格も最適に定める手法と解法を提案したこと、2番目に2つのサプライヤーが競合するときの最適戦略が存在し、それぞれ異なるパラメータの組み合わせのもとで均衡が存在することを示し、均衡解を求める手法を提案したことである。 まず、1番目の貢献においては1つのサプライヤーと1つのバイヤーのオプション契約問題を対象に、バイヤーの利益を最大にする既存研究を拡張し、バイヤーが最適な意思決定を行うことを前提に（合理的仮説）サプライヤーの最適意思決定問題をモデル化している。ここで、サプライヤーの意思決定は製品の卸売価格、オプション価格、およびオプション行使価格の3つであるが、サプライヤーが利益を独占する問題がある。このような非現実的な問題を回避するために、本研究ではサプライヤーが3つの価格をセットで提供するようにし、卸売価格が高すぎる場合にはバイヤーがスポットマーケとで商品を購入することができる条件を加え、bi-level programming モデルとして定式化を行った。この問題は lower level problem と higher level problem に分かれ、lower level problem が higher level problem の制約条件になり、市販のソフトウェアでは解けない問題がある。そこで、本論文では Fischer–Burmeister 関数を用いて区間線形近似を行い、従来の NVP (newsvendor problem) の解を初期解に設定することで均衡解が得られるように工夫している。 次に、2番目の貢献においては2つのサプライヤーが1つのバイヤーに製品を製造販売する契約問題を対象に、上記1対1のモデルを拡張し、2つのサプライヤーが競合するときの最適意思決定問題をモデル化している。2つのサプライヤーは3つの価格をセットでバイヤーに提示するために、それぞれの価格が相手より大きい小さいかを考えて8つのケースに場合分けして均衡解を解くようにしている。3つの価格がすべて相手より不利/有利なときの最適解は明らかであるために、残りの6つのケースにおける均衡解を求めるアルゴリズムを提案し、数値実験を用いてサプライヤーが取るべき戦略について、歩調を合わせるべき場合も含めて解の導出および考察を行っている。 以上を要するに、本論文はサプライチェーン契約におけるリスクマネジメントについて、サプライヤーのリスクも考慮して最適に意思決定するモデルおよび解法を提案したものであり、学術的貢献は大きい。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。				

内容の要旨

報告番号	甲 第 5759 号	氏 名	遠藤 克浩
主論文題名：			
機械学習と量子コンピュータによる分子シミュレーションを用いた研究開発の高効率化			
分子シミュレーションは、分子の振る舞いを調べるための汎用的かつ強力な手法であり、材料開発や創薬など様々な分野の研究開発に用いられている。分子シミュレーションは、MD シミュレーションと MC シミュレーションに大別され、MD シミュレーションは分子の時間発展を計算し、MC シミュレーションは統計力学に基づく確率分布をサンプリングすることによってシミュレーションを行う。しかしながら、分子シミュレーションの適用範囲の拡大に伴って、様々な課題が生まれている。 本研究では、分子シミュレーションを用いた研究開発における主要な課題として次の3点、(課題1) MD シミュレーションを用いる場合、時間発展は逐次計算であるから並列化が難しく、長時間にわたるシミュレーションを実行することが困難であること、(課題2) MD シミュレーション実行結果から、有意義な知見を取り出すためには、専門家の高度な知識に基づく解析が必要となる難易度の高いものであること。(課題3) MC シミュレーションを用いる場合、ボルツマン分布のような複雑な構造を持つ確率分布を効率的にサンプリングすることが困難であること、に着目して機械学習や量子コンピュータを活用することでこれらの課題解決を試みた。 課題1に対して、深層生成モデルによる部分系の確率的時間発展を実行する代理モデルを構成し、短時間のMD シミュレーションから長時間のMD シミュレーションを精度よく予測する手法を開発した。その結果、ポリエチレン溶融体の平均二乗変位の計算を15倍高速化することに成功した。課題2に対して、複数の系のMD シミュレーション結果に対して、部分系のダイナミクスを統計集団とみなして、各統計集団間の距離の埋め込みと、それらの距離の大小に貢献する個別のダイナミクスを半自動的に抽出する機械学習手法を開発した。その結果、アミノ酸水溶液系において有用な解析を半自動で行うことに成功した。 課題3に対して、深層生成モデルを用いて、複雑な雑な構造をもつボルツマン分布に適した形へ提案分布を変形する手法を開発した。提案分布を構成するにあたって、原子同士が近接する配置を取り除くための解析的な変形手法や、自己学習により適切な変形方法を自動的に獲得する手法を提案した。その結果、LJ 粒子系において、カノニカルアンサンブルシミュレーションではステップあたり最大20倍の粒子移動量を達成し、グランドカノニカルアンサンブルシミュレーションでは最大30倍速度で粒子数に関する独立なサンプルを得ることに成功した。また、量子コンピュータによる情報処理の観点から、多様な分布を高速にサンプリング可能な手法を提案した。量子コンピュータによるサンプリングアルゴリズムの構成にあたって、自己学習によりサンプリングを高速化する枠組みの整理を行い、かつQFT回路を用いて具体的かつQuantum-inspiredなアルゴリズムを構成した。その結果、様々な分布のサンプリング高速化に成功した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 5759 号	氏 名	遠藤 克浩
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 泰岡 顕治
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）・TeknD 深淵 康二
		慶應義塾大学教授	博士（情報理工学） 山本 直樹
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 矢向 高弘
学士（工学）、修士（工学）遠藤克浩君の学位請求論文は「機械学習と量子コンピュータによる分子シミュレーションを用いた研究開発の高効率化」と題し、9章から構成されている。 分子シミュレーションは、分子の振る舞いを調べるための汎用的かつ強力な手法であり、材料開発や創薬など様々な分野の研究開発に用いられている。分子シミュレーションは、分子動力学(MD)シミュレーションとモンテカルロ（MC）シミュレーションに大別され、MDシミュレーションは分子の時間発展を計算し、MCシミュレーションは統計力学に基づく確率分布をサンプリングすることによってシミュレーションを行う方法である。分子シミュレーションに関してはその適用範囲の拡大に伴って、様々な新しい課題が出てきている。本論文では、分子シミュレーションを用いた研究開発における主要な3つの課題（課題1）MDシミュレーションの時間発展が逐次計算であることから、並列化が難しく長時間にわたるシミュレーションの実行が困難であること、（課題2）MDシミュレーション実行結果から有意義な知見を取り出すためには、専門家の高度な知識に基づく解析が必要であること、（課題3）MCシミュレーションを実行する場合、ボルツマン分布のような複雑な構造を持つ確率分布を効率的にサンプリングすることが困難であること）に着目して機械学習や量子コンピュータを活用することでこれらの課題解決を試みている。 第1章では本論文の諸言および目的、構成を、第2章では機械学習のための数学、第3章では機械学習・深層学習の基礎、第4章では分子シミュレーションの基礎について説明している。第5章から第8章に結果を示している。 第5章では、課題1に関して深層生成モデルによる部分系の確率的時間発展を実行するモデルを構成し、短時間のMDシミュレーションから長時間のMDシミュレーションを精度よく予測する手法を開発している。その結果、ポリエチレン溶融体の平均二乗変位の計算を15倍高速化することに成功している。 第6章では、課題2に関して複数の系のMDシミュレーション結果に対して、部分系のダイナミクスを統計集団とみなして、各統計集団間の距離の埋め込みと、それらの距離の大小に貢献する個別のダイナミクスを半自動的に抽出する機械学習手法を開発している。その結果、アミノ酸水溶液系において有用な解析を半自動で行うことに成功している。 第7章では、課題3に関して深層生成モデルを用いて、MCシミュレーションにおいてボルツマン分布に適した形へ提案分布を変形する手法を開発している。原子同士が近接する配置を取り除くための解析的な変形手法や、自己学習により適切な変形方法を自動的に獲得する手法を提案している。その結果、Lennard-Jones粒子系において、カノニカルアンサンブルシミュレーションではステップあたり最大20倍の粒子移動量を達成し、グランドカノニカルアンサンブルシミュレーションでは最大30倍速度で粒子数に関する独立なサンプルを得ることに成功している。 第8章では、同じく課題3に関して量子コンピュータによる情報処理の観点から、多様な分布を高速にサンプリング可能な手法を提案している。量子コンピュータによるサンプリングアルゴリズムの構成にあたって、自己学習によりサンプリングを高速化する枠組みの整理を行い、かつ量子フーリエ変換回路を用いて具体的かつQuantum-inspiredなアルゴリズムを構成している。その結果、様々な分布のサンプリング高速化に成功している。 最後に第9章で研究全体に関する結論を述べている。 以上要するに、本論文の著者は、機械学習および量子コンピュータを応用することによって分子シミュレーションを用いた研究開発を高速化・効率化する手法を開発した。その成果は、MD・MCシミュレーションの高速化・効率化のみでなく、工学分野において機械学習および量子コンピュータの応用研究に寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士(工学)の学位を受ける資格があるものと認める。			

2022（令和4）年3月までの新制博士学位授与者数は次のとおり。

[]内は内数。当該年度学期（2021年度秋学期）授与者数。

学位の種類	課程修了によるもの (課程博士・・・・・・甲)	論文提出によるもの (論文博士・・・・・・乙)	計
工学博士	451	389	840
博士（工学）	1,575 [32]	318 [0]	1,893 [32]
理学博士	26	8	34
博士（理学）	445 [10]	49 [0]	494 [10]
学術博士	0	1	1
博士（学術）	1 [0]	1 [0]	2 [0]
計	2,498 [42]	766 [0]	3,264 [42]

本書に記載した論文審査担当者の所属および職位は2021（令和3）年度秋学期のものである。

2022(令和4)年6月1日 発行

発行者 理工学研究科委員長 斎木 敏治

編集 慶應義塾大学理工学部学生課学事担当

〒223-8522
神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1