慶應義塾大学理工学部研究報告別冊第８３号

２０１７（平成２９）年度　　春　学　期

# 博士　（工学）<br>博士　（理学）　学位論文

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

# 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2017(平成29)年度春学期に博士の学位を授与した者の論文内容の要旨および論文審査の結果の要旨である。収録したものは次のとおり。

慶應義塾大学理工学部

| 学位の種類 | 学位記号・番号 | 授与年月日 | 氏　名 |
|---|---|---|---|
| 博士(理学) | 甲 第 4699 号 | 平成 29 年 4 月 12 日 | 設樂 久志 |
| 博士(理学) | 甲 第 4705 号 | 平成 29 年 5 月 24 日 | 中條 恵理華 |
| 博士(工学) | 甲 第 4712 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | 柘植 洋祐 |
| 博士(工学) | 甲 第 4713 号 | 平成 29 年 7 月 5 日 | 宮原 泰徳 |
| 博士(工学) | 甲 第 4714 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | 田村 仁優 |
| 博士(工学) | 甲 第 4719 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | 川口 貴弘 |
| 博士(工学) | 甲 第 4720 号 | 平成 29 年 7 月 31 日 | 室井 秀夫 |
| 博士(工学) | 甲 第 4721 号 | 平成 29 年 7 月 31 日 | 林谷 昌洋 |
| 博士(理学) | 甲 第 4722 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | (カルガ ディグヴィジャイ)<br>Kharga, Digvijay |
| 博士(理学) | 甲 第 4723 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | 西田 有延 |
| 博士(工学) | 甲 第 4724 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | (アブドゥル マナフ アフマド ロスリ ビン)<br>Abdul Manaf, Ahmad Rosli bin |
| 博士(工学) | 甲 第 4733 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | 伊藤 幸太 |
| 博士(工学) | 甲 第 4734 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | 安藤 大佑 |
| 博士(工学) | 甲 第 4735 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | 綱島 昇 |
| 博士(工学) | 甲 第 4736 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | 天神林 瑞樹 |
| 博士(工学) | 甲 第 4737 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | 島田 明男 |
| 博士(工学) | 甲 第 4738 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | 真部 研吾 |
| 博士(工学) | 甲 第 4739 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | 松永 卓也 |
| 博士(工学) | 甲 第 4740 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | 佐藤 宏亮 |
| 博士(工学) | 甲 第 4741 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | 山田 健太郎 |
| 博士(工学) | 甲 第 4742 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | (アリヤリット アタポーン)<br>Ariyarit, Atthaporn |

| 学位の種類 | 学位記号･番号 | 授与年月日 | 氏　　名 |
|---|---|---|---|
| 博士(工学) | 甲 第 4743 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | 松浦 勝也 |
| 博士(工学) | 甲 第 4744 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | 七森 泰之 |
| 博士(工学) | 甲 第 4745 号 | 平成 29 年 8 月 31 日 | 江面 篤志 |
| 博士(工学) | 甲 第 4746 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | 西村 聡史 |
| 博士(理学) | 甲 第 4747 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | 松谷 良佑 |
| 博士(工学) | 甲 第 4748 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | (キアヒャート マティアス)<br>Kirchhart, Matthias |
| 博士(工学) | 甲 第 4749 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | 西原 諒 |
| 博士(理学) | 甲 第 4750 号 | 平成 29 年 8 月 31 日 | 力丸 佑紀 |
| 博士(工学) | 甲 第 4751 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | 山田 雄基 |
| 博士(工学) | 甲 第 4752 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | (ボロメオ リア メイ ハリナ)<br>Borromeo, Ria Mae Harina |
| 博士(工学) | 甲 第 4753 号 | 平成 29 年 9 月 21 日 | (ルジエ バティスト ミシェル)<br>Rouzier, Baptiste Michel |

# 内容の要旨

| 報告番号 | 甲　第4699号 | 氏　名 | 設樂　久志 |
|---|---|---|---|

主 論 文 題 目 ：

線虫単一神経細胞での部位特異的応答の蛍光イメージング法による解明

単一神経細胞の情報処理はシナプスを介した局所的な情報伝達と、それに伴う細胞内でのタンパク質リン酸化や遺伝子発現制御によって行われる。これまで単一神経細胞の局所的な情報処理は、マウスやハエなどの生物種でその役割が明らかにされてきた一方で、線虫での報告例はほとんどない。しかしながら、近年線虫においても単一神経細胞の局所に注目した神経機能理解の重要性が報告された（Hendricks et al., 2012）。本論文では、におい感受とそれに伴う行動出力に重要な役割を担い、また神経細胞内での局所的な機能が重要であると考えられている感覚神経細胞 AWC と介在神経細胞 AIY に着目し、種々の蛍光イメージング手法によってこれら神経細胞の部位特異的な応答を明らかにした。

第 1 章は緒言で、単一神経細胞の局所的な情報処理研究の背景を述べ、線虫の神経機能を明らかにしてきた従来研究について説明し、続いて本研究の目的について述べた。

第 2 章では、介在神経細胞 AIY に注目し、AIY の膜電位応答と $Ca^{2+}$応答の部位特異性に関して述べた。AIY はにおい情報を受けると神経細胞の一部分である神経線維でのみ $Ca^{2+}$応答を示す特徴を持つが、膜電位イメージング法により $Ca^{2+}$応答を示さない細胞体でも膜電位応答を示すことが初めて明らかになった。線虫神経系では主に $Ca^{2+}$が膜電位を変化させるキャリアであると考えられてきた。従って、これらの結果は膜電位と $Ca^{2+}$の部位特異的応答性の違いだけではなく、膜電位と $Ca^{2+}$応答がいつも一致するわけではないことを示した。

第 3 章では、感覚神経細胞 AWC 内において、におい刺激による細胞内セカンドメッセンジャーである cGMP の応答に関して述べた。AWC はにおい刺激を受けたとき、におい感受とにおい順応に対して、異なる cGMP 応答を示すことが、変異体を用いた先行研究で示されている。しかし、実際に cGMP 挙動を可視化し明らかにした研究はなかったため、cGMP イメージング法を用いてその挙動を明らかにした。におい感受に重要である神経細胞先端では、刺激に対して一過的に cGMP は減少した。一方、他の部位では cGMP の上昇が観察された。このことは単一神経細胞内で cGMP が異なる役割を担うことを示唆する。

第 4 章は結言で、第 2・3 章で明らかにした線虫単一神経細胞の部位特異的な応答を例に取り、局所での神経機能を明らかにすることの重要性を述べている。また、線虫の神経細胞の少なさや接続関係が明らかになっている点を挙げ、他の生物ではできない単一神経細胞の情報処理解明の可能性について議論した。

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第4699号 | 氏　名 | 設樂　久志 |
|---|---|---|---|

| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 岡　浩太郎 |
|---|---|---|---|---|
| | 副査 | 慶應義塾大学准教授 | 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 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 内山　孝憲 |

学士（理学）、修士（理学）設樂久志君提出の博士学位論文は、「線虫単一神経細胞での部位特異的応答の蛍光イメージング法による解明」と題し、４章より成っている。

単一神経細胞の情報処理はシナプスを介した局所的な情報伝達と、それに伴う細胞内のタンパク質リン酸化や遺伝子発現制御によって行われている。これまで単一神経細胞の局所的な情報処理は、マウスやハエなどでその役割が明らかにされてきたが線虫での報告例は少ない。しかしながら、近年線虫においても単一神経細胞の局所に注目した神経機能理解の重要性が認識され始めてきている。本論文では、におい感受とそれに伴う行動出力に重要な役割を担い、また神経細胞内での局所的な機能が重要であると考えられている感覚神経細胞 AWC と介在神経細胞 AIY に着目し、種々の蛍光イメージング手法によってこれら神経細胞の部位特異的な応答を明らかにしている。

第 1 章は緒言で、単一神経細胞の局所的な情報処理研究の背景を述べ、線虫の神経機能を明らかにしてきた従来研究について説明し、続いて本研究の目的について述べている。

第 2 章では、介在神経細胞 AIY に注目し、AIY の膜電位応答と $Ca^{2+}$応答の部位特異性に関して述べた。AIY はにおい情報を受けると神経細胞の一部分である神経線維でのみ $Ca^{2+}$応答を示す特徴を持つが、膜電位イメージング法により $Ca^{2+}$応答を示さない細胞体でも膜電位応答を示すことを初めて明らかにした。線虫神経系では主に $Ca^{2+}$が膜電位を変化させるキャリアであると考えられてきた。従って、これらの結果は膜電位と $Ca^{2+}$の部位特異的応答性の違いだけではなく、膜電位と $Ca^{2+}$応答がいつも一致するわけではないことを示している。

第 3 章では、感覚神経細胞 AWC 内において、におい刺激による細胞内セカンドメッセンジャーである cGMP の応答に関して述べている。AWC はにおい刺激を受けたとき、におい感受とにおい順応に対して、異なる cGMP 応答を示すことが、変異体を用いた先行研究で示されている。しかし、実際に cGMP 挙動を可視化し明らかにした研究はなかったため、cGMP イメージング法を用いてその挙動を明らかにした。におい感受に重要である神経細胞先端では、刺激に対して一過的に cGMP は減少することを示した。一方、他の部位では cGMP の上昇が観察された。このことは単一神経細胞内で cGMP は異なる役割を担うと結論づけている。

第 4 章は結言で、第 2・3 章で明らかにした線虫単一神経細胞の部位特異的な応答を例として、局所での神経機能を明らかにすることの重要性を述べている。また、線虫の神経細胞の少なさや接続関係が明らかになっている点を挙げ、他の生物ではできない単一神経細胞の情報処理解明の可能性について議論している。

以上本論文は種々の蛍光イメージング法を利用することにより、単一神経細胞の役割を、モデル生物である線虫について明らかにすることに成功している。特に線虫神経回路研究ではあまり注目されていなかった膜電位及び細胞内セカンドメッセンジャーである cGMP の神経細胞局所での薬理について明らかにしたことにより、線虫神経回路研究において新規な知見を見出すことに成功した。これは神経科学研究に大いに資するものである。よって本論文の著者は博士(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4705号 | 氏　名 | 中條　恵理華 |
|---|---|---|---|

主 論 文 題 目 :

ビス（シクロオクタテトラエン）ランタノイド錯体の負イオン光電子スペクトルにおけるランタノイド依存性に関する理論的研究

ランタノイド（Ln）錯体の電子状態の理論解析には多くの課題が山積している。これは主に、内殻軌道でありながら開殻となる4f殻で複雑化している電子相関効果、スピン軌道（SO）相互作用、配位子場分裂などの理論的扱いの困難に起因する。本研究は八員環有機分子シクロオクタテトラエン（COT）を配位子とするビス（シクロオクタテトラエン）ランタノイド錯体$Ln(COT)_2$の電子状態解析を行ったものである。本塾化学科中嶋研究室で気相合成・測定された$Ln(COT)_2$の負イオン光電子スペクトルには、顕著なランタノイド依存性が見出されている。本論文では中心ランタノイド金属の電子構造およびLn-COT間結合距離の違いが錯体の電子状態に反映されると考え、負イオン始状態・中性終状態の電子状態に関するランタノイド依存性を、理論化学の手法を用いて解析した。

第一章では、ランタノイドとCOT、Ln-COT錯体の電子構造を概説した。また錯体の電子状態を理解する上で必要な群論の基礎事項を説明した。

第二章では、$Ln(COT)_2$錯体の負イオン光電子スペクトルの測定結果を、光電子スペクトルの理論と共に述べた。

第三章では、光電子スペクトルの理論計算手法としてKoopmansの定理、配置間相互作用（CI）法、摂動論を説明した。CI法と摂動論の詳細として、本研究で用いた完全活性空間自己無撞着（CASSCF）法、多配置擬縮重二次摂動（MCQDPT2）法、およびSO-MCQDPT法を説明した。

第四章では、負イオン光電子スペクトルの垂直脱離エネルギー（VDE）にKoopmansの定理を適用し、負イオン$Ln(COT)_2^-$における金属—配位子間の軌道相互作用を解析した。この錯体は強いイオン結合性を持つにも関わらず、この価電子軌道は、顕著な金属—配位子間軌道相互作用を示し、これはVDEのランタノイド依存性に反映される。二次摂動論による分析から、錯体内の強い静電相互作用、ランタノイド収縮、配位子軌道間の相互作用などの様々な因子が、軌道相互作用のランタノイド依存性に影響していることを明らかにした。

第五章では、SmからHoにかけての中期ランタノイド錯体の負イオン光電子スペクトルだけに現れるXピークの分裂を解析した。CASSCF法とMCQDPT2法によるスペクトルの計算から、このピーク分裂が中性$Ln(COT)_2$における特殊な4f—配位子間相互作用に起因することを示した。特にXピーク分裂の有無が負イオン始状態の4f電子配置に関連することを明らかにし、また分裂幅に対する4f軌道のエネルギーと空間的拡がりのランタノイド依存性の影響を議論した。

第六章では、SO-MCQDPT法によるXピークの計算結果を示し、第五章で議論したピーク分裂に対するスピン軌道相互作用の影響を分析した。

第七章では、以上の議論に関する結論を述べた。

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第 4705 号 | 氏　名 | 中條　恵理華 |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 藪下　聡 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 理学博士 | 佐々田　博之 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 理学博士 | 中嶋　敦 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 吉岡　直樹 |

学士（理学）、修士（理学）中條恵理華君提出の学位請求論文は、「ビス（シクロオクタテトラエン）ランタノイド錯体の負イオン光電子スペクトルにおけるランタノイド依存性に関する理論的研究」と題し、全 7 章からなっている。

ランタノイド（Ln）化合物が示す光学材料や磁性材料としての物性は、主に開殻 4f 電子に起因する。一方、4f 電子を含む第一原理計算は、強い電子相関効果とスピン軌道 (SO) 相互作用、弱い配位子場分裂のために今日でも困難を伴うものである。

中條君の論文は、八員環有機分子シクロオクタテトラエン（COT）を配位子とするビス（シクロオクタテトラエン）ランタノイド錯体 $Ln(COT)_2$の電子構造を解析したものである。この一連のランタノイド錯体は、本塾化学科中嶋研究室で気相合成・測定されたもので、特にその負イオン光電子スペクトル（PES）には、顕著なランタノイド依存性が見出されている。本論文は、その中心ランタノイド金属の電子構造および Ln-COT 間結合距離の違いに着目し、PES が示すランタノイド依存性を、理論化学の手法を用いて解析したものである。

第一章では、ランタノイドと COT、Ln-COT 錯体の電子構造を概説し、また錯体の電子状態を理解する上で必要な群論の基礎事項を説明している。

第二章では、$Ln(COT)_2$錯体の負イオン PES の測定結果を、その理論と共に述べている。

第三章では、PES の計算手法として Koopmans の定理、配置間相互作用（CI）法、摂動論を説明している。CI 法と摂動論の詳細として、本研究で用いた完全活性空間自己無撞着場（CASSCF）法、多配置擬縮重二次摂動（MCQDPT2）法、および SO-MCQDPT 法を説明している。

第四章では、負イオン PES の垂直脱離エネルギー（VDE）に Koopmans の定理を適用し、負イオン錯体 $Ln(COT)_2^-$ における金属-配位子間の軌道相互作用を解析している。この錯体は強いイオン結合性を持つにも関わらず、その原子価軌道は顕著な軌道相互作用を示し、これは VDE のランタノイド依存性に反映される。二次摂動論による分析から、錯体内の強い静電相互作用、ランタノイド収縮、配位子軌道間の相互作用など様々な因子が、軌道相互作用のランタノイド依存性に影響することを明らかにしている。

第五章では、サマリウムからホルミウムにかけての中期ランタノイド錯体だけ、その PES の X ピークが分裂する現象を解析している。CASSCF 法と MCQDPT2 法によるスペクトルの計算から、このピーク分裂が中性 $Ln(COT)_2$における特殊な 4f-配位子間相互作用に起因することを示している。特に X ピーク分裂の有無が負イオン始状態の 4f 電子配置に関連することを明らかにし、またこのピーク分裂幅が後期ランタノイドで減少する理由を、4f 原子軌道の安定化とその空間的拡がりの縮小を基に説明している。

第六章では、SO-MCQDPT 法による X ピークの計算結果を示し、第五章で議論したピーク分裂に対するスピン軌道相互作用の影響を分析している。

第七章では、以上の内容に対する結論を述べている。

以上要するに、本論文の著者は、ランタノイド錯体 $Ln(COT)_2$の電子構造の詳細を、様々な理論手法を駆使して解明している。本論文の対象分子は $Ln(COT)_2$に限定されているが、その研究成果や著者が考案した電子状態の解析手法は、一般の分子系にも広く応用可能な概念を含み、今後それらの特性の議論において、重要な指針を与えるものとして、分子科学の発展に寄与するところが少なくない。よって本論文の著者は博士(理学)の学位を受ける資格があるものと認める。

# 内容の要旨

| 報告番号 | 甲　第4712号 | 氏　名 | 柘植　洋祐 |
|---|---|---|---|

主 論 文 題 目 ：

交互吸着法を用いた新規自己組織化膜に関する研究とその応用

現在、薄膜技術は多くの先端技術を支える重要な技術であり、その応用はあらゆる分野に及んでいる。薄膜作製法として大掛かりな装置が必要なドライプロセスが今後も主流となるが、微細加工サイズが限界にきており、技術革新が必要になっている。そこで、ウェットプロセスである自己組織化法との融合が産業の製造方法に大きなパラダイムシフトを与えるとして、今後の研究の動向が期待されている。また、自己組織化法は複数の技術や材料を複合化できるため、科学的にも産業的にも利用価値が高い。そこで、本研究はその自己組織化法の一つである交互吸着法を用いて作製した新規自己組織化膜の特性を明らかにし、その膜の特徴を生かして機能性材料、特にガスセンサ、防汚コーティング、太陽電池を高機能化することを目的とした。

第1章では、本研究の背景と目的について、第2章では本研究で用いた薄膜作製法を中心に薄膜技術の概要について述べた。

第3章では、交互吸着法を用いて作製した新規自己組織化膜の特性について記述した。高アルカリ条件下で作製した未解離のアミノ基を多く有するこの高分子電解質膜は金属イオンと錯体を形成し、更に積層数が増すと金属イオンとアミノ基の配位結合に伴う反応誘起型相分離によって多孔質化する。この新たな手法を用いると、金属イオンの濃度と種類によって細孔径を制御できる。

第4章では、その新規自己組織化膜に固定化された準安定な金属イオンがより安定な物質と反応することを利用した水晶振動子ガス検出器について記述した。非常に低濃度（20ppb）からメチルメルカプタンに対して線形的に応答し、その他の悪臭ガス（アミン類, 芳香族炭化水素, アルコール）には応答しないことを見出し、高感度かつ高選択性であるガス検出器を開発することができた。

第5章では、金属イオンとSi-H基の酸化還元反応により潤滑油を電解質高分子膜に固定化した防汚コーティング（SLIC 膜）について新規構築した。SLIC 膜はエタノールを含侵したコットンで表面を摩耗しても潤滑液保持でき、有機溶剤で洗浄しても滑液性能を維持した。更に表面張力の低い液体（熱水やエタノール等）に対しても低い転落角を示し、付着防止効果が高いことを見出した。

第6章では、本研究で作製した多孔質膜を鋳型に用いて、色素増感太陽電池の多孔質 $TiO_2$膜を作製した結果を示した。厚膜化・多孔質化により電極の表面積が増加し、従来の多孔質高分子電解質膜を鋳型として用いた場合よりも変換効率を向上させることができた。

第7章では、交互吸着膜を buffer 層として用いた超親水性膜について記述した。この buffer 層によって化学溶液析出法で作製した $TiO_2$膜の基板との密着性が改善し、耐溶剤性を付与することができた。本研究で作製した $TiO_2$膜は光触媒反応により超親水・撥水パターニング膜も作製できる。

第8章では本研究を総括し、これらの機能性材料の今後の展望について述べた。

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第 4712 号 | 氏　名 | 栃植　洋祐 |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 白鳥　世明 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 佐藤　徹哉 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 今井　宏明 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 栄長　泰明 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 朝倉　浩一 |

学士 (工学)、修士 (工学) 栃植洋祐君提出の学位請求論文は「交互吸着法を用いた新規自己組織化膜に関する研究とその応用」と題し、8 章から構成されている。

現在、薄膜技術は多くの先端技術を支える重要な技術であり、その応用はあらゆる分野に及んでいる。薄膜作製法として大掛かりな装置が必要なドライプロセスが今後も主流となるが、微細加工サイズが限界にきており、技術革新が必要になっている。そこで、ウェットプロセスである自己組織化法との融合が産業における製造方法に大きなパラダイムシフトを与えるとして、今後の研究の動向が期待されている。また、自己組織化法は複数の技術や材料を複合化できるため、科学的にも産業的にも利用価値が高い。そこで、本研究はその自己組織化法の一つである交互吸着法を用いて作製した新規自己組織化膜の特性を明らかにし、その膜の特徴を生かして機能性材料、特にガスセンサ、防汚コーティング、太陽電池を高機能化することを目的としている。

第 1 章では、本研究の背景と目的について記述している。

第 2 章では、本研究で用いた薄膜作製法を中心に薄膜技術の概要について述べられている。

第 3 章では、交互吸着法を用いて作製した新規自己組織化膜の特性について記述している。高アルカリ条件下で作製した未解離のアミノ基を多く有するこの高分子電解質膜は金属イオンと錯体を形成し、更に積層数が増すと金属イオンとアミノ基の配位結合に伴う反応誘起型相分離によって多孔質化する。この新たな手法を用いて金属イオンの濃度と種類を変えることによって、細孔径をナノサイズからマイクロサイズまで制御している。

第 4 章では、その新規自己組織化膜に固定化された準安定な金属イオンがより安定な物質と反応することを利用した水晶振動子ガス検出器について記述している。非常に低濃度（20ppb）からメチルメルカプタンに対して線形的に応答し、その他の悪臭ガス（アミン類、芳香族炭化水素、アルコール）には応答しないことを見出している。

第 5 章では、金属イオンと Si-H 基の酸化還元反応により潤滑油を電解質高分子膜に固定化した防汚コーティングを新規に構築している。その膜はエタノールを含侵したコットンで表面を摩耗しても潤滑液を保持でき、有機溶剤で洗浄しても滑液性能を維持した。更に表面張力の低い液体（熱水やエタノール等）に対しても付着防止効果が高いことを見出している。

第 6 章では、本研究で作製した多孔質膜を鋳型に用いて、色素増感太陽電池の多孔質 $TiO_2$ 膜を作製した結果を示している。厚膜化・多孔質化により電極の表面積が増加し、従来の多孔質高分子電解質膜を鋳型として用いた場合よりも変換効率を向上させることができる。

第 7 章では、交互吸着膜をバッファー層として用いた超親水性膜について記述している。このバッファー層によって化学溶液析出法で作製した $TiO_2$ 膜の基板との密着性が改善した。更にこの $TiO_2$ 膜の光触媒反応を用いて超親水・撥水パターニング膜も作製している。

第 8 章では本研究を総括し、これらの機能性材料の今後の展望について述べられている。

以上要するに、本論文は交互吸着法を用いて金属イオンが担持された新規自己組織化膜を作製してその特性を明らかにし、その膜の特徴を生かして高機能性材料への応用を提案している。これらの技術と知見は、交互吸着法の技術革新につながり、自己組織化法を実用的に利用可能な製膜技術として位置づけることができる。したがって、薄膜関連技術分野において工業上、工学上寄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4713号 | 氏　名 | 宮原　泰徳 |
|---|---|---|---|
| 主 論 文 題 目 ：<br><br>自律型センサーネットワークを実現する超低消費電力無線システム | | | |

近年センサーネットワークは、無線技術の応用として広い分野で用いられるようになってきている。特に、家電製品を無線で連携して通信を行うスマートホーム、人体の生体情報をセンシングモニターする無線ネットワーク、ビルディングなど構造物の経年劣化をモニタリングして事前に事故を防止する無線システムなどが、様々な分野で注目を浴びてきている。これらセンサーネットワークはモバイル環境で用いることが多く電源供給の課題がある。近年電池に代わる電源として、無限に利用できるエナジーハーベスト発電技術が注目されている。エナジーハーベスト技術として太陽光発電や温度差を利用した半導体による発電技術が製品化されているが、起電力は 300－400 mV と非常に低い。一方、従来の無線部の高周波集積回路は 1.8 V の電源電圧で動作し、送信受信回路ともに消費電流が数十 mA の製品が多く、エナジーハーベストの電源では動作しない。そこで本研究では、エナジーハーベストの電源で動作する、超低電圧 (300－400 mV)で動作する無線システム及び高周波 CMOS 回路の開発を行い、無線部の低消費電力化を可能にし、自律型センサーネットワークの実現を目的とした。

第 1 章では、本研究の背景と無線センサーネットワークの課題と従来研究を述べた。

第 2 章では、無線センサーネットワークの高周波回路に用いる MOSFET トランジスタを超低電圧動作させるため、弱反転領域のトランジスタの最適化手法を述べた。

第 3 章では、超低消費電力の無線システムを実現するために、システムで重要な性能を求められる高周波回路の電圧制御発振回路及び高周波分周回路の新回路を提案した。LSI の試作及び実験により、電源電圧 280 mV で消費電力 202 μW の 2.4 GHz 発振及び電源電圧 300 mV で消費電力 34 μW の 2.4 GHz 分周動作を確認した。

第 4 章では、超低電圧で動作する超低消費電力の 2.4 GHz 帯周波数シフトキーイング変調の受信無線システムを提案した。このシステムには、新規に開発したカスコード型のフォールド型低雑音増幅器回路やトランスフォーマ帰還型電圧制御発振回路、疑似パッシブミキサー回路などを用いた Low IF 受信システムを開発した。LSI の試作及び実験により、電源電圧 300 mV で消費電力 1.6 mW 動作時に、受信システムの性能としてビットエラーレート $10^{-3}$において受信感度-95.5 dBm を確認した。

第 5 章では、超低電圧で動作する超低消費電力の 2.4 GHz 帯周波数シフトキーイング変調のクローズドループ位相同期型変調送信無線システムを新規に提案した。低消費電力を実現するために、新規に電圧制御発信回路の発振周波数を拡大するトランスフォーマ型容量バンクの新規回路を開発した。LSI の試作及び実験により、電源電圧 400 mV で消費電力 2.1 mW 動作時に、周波数シフトキーイング変調スペクトラム信号の出力レベル-6 dBm に於いて、-42 dBc @1.5 MHz の隣接妨害チャネル性能を確認した。

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た。

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第 4713 号 | 氏　名 | 宮原　泰徳 |
| --- | --- | --- | --- |

| | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 黒田　忠広 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 笹瀬　巌 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 眞田　幸俊 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 石黒　仁揮 |

学士（工学），修士（経営管理専門職）宮原泰徳君提出の学位請求論文は「自律型センサーネットワークを実現する超低消費電力無線システム」と題し，6 章から構成されている．

Internet of Things（IoT）の普及にはセンサーネットワークが欠かせない．モノに装着でき，信号を検出して無線でインターネットに接続できる小型端末が求められる．しかし，景観保全には電源配線は好まれず，また保守管理には電池交換は適さない．こうした課題を解決するために，自律して発電できる環境発電が注目されている．環境発電は太陽光や温度差を利用して発電するために起電できる電圧は 0.4 V 以下で電力は 5 mW 程度と低い．一方，センサーネットワークに用いられる従来の無線回路は，1.8 V の電源で動作し 50 mW 程度の電力を消費することが多く，環境発電では動作しない．本論文では，IoT 用の自律型センサーネットワークを実現することを目的として，環境発電で動作する超低消費電力無線システムを提案し，その有効性を実証している．

第 1 章は序論であり，背景となる技術と研究を概説して課題を整理している．

第 2 章では，トランジスタの弱反転領域の高精度なモデルを立て，トランジスタの寸法やしきい値電圧，バイアス電圧などを最適化することにより，低い電圧・電流で高周波回路を設計する手法を体系化し，3 章以降の回路設計の準備立てをしている．

第 3 章では，無線システムの主要回路である電圧制御発振回路（VCO）と周波数分周回路を低電圧で動作させる回路技術を提案している．VCO に用いられるコイルを磁界結合して変圧器を構成することにより，帰還利得を増大して低電圧での発振を可能としている．65 nm CMOS で試作したテストチップは，電源電圧 0.3 V，消費電力 0.2 mW で動作している．また，周波数分周回路の入力差動対を変圧器で受けることにより，電源とグラウンド間に直列接続されるトランジスタの数を 2 個から 1 個に減らしている．その結果，電源電圧を 0.5 V から 0.3 V に下げ，消費電力を 0.03 mW に削減することに成功している．

第 4 章では無線受信機を検討している．第 3 章で検討した VCO に加え，変圧器の正帰還で利得を高めた低雑音増幅回路や変圧器で入力差動対を結合したミキサ回路を提案し，電源とグラウンド間に接続されるトランジスタの数を 1 個に減らして回路の動作電圧を下げている．65 nm CMOS で試作したテストチップは，電源電圧を 0.6V から 0.3V に下げ，消費電力を 32.5 mW から 1.6 mW に削減し，なおかつ周波数変調された 2.4 GHz 帯の電波を受信感度−95.5 dBm で受信できることを実証している．

第 5 章では無線送信機を検討している．周波数分周回路の入力トランジスタを変圧器に置き換えて VCO と接続し，さらに VCO の共振器の容量切替え回路を変圧器に内蔵することにより，低電圧での周波数可変範囲を広げている．65 nm CMOS で試作したテストチップは，電源電圧を 1 V から 0.4 V に下げ，消費電力を 8.9 mW から 2.1 mW に削減し，VCO の周波数可変範囲を 180 MHz から 450 MHz に拡大し，なおかつ 2.4 GHz 帯の電波を隣接チャネル漏洩電力比−42.0 dBc で送信できることを実証している．

第 6 章は結論であり，各章において得られた知見をまとめ，残された課題を述べている．

以上要するに，本論文は自律型センサーネットワークを実現する超低消費電力無線システムを実用に供するための要素技術を研究しその有効性を実証したもので，集積回路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4714号 | 氏　名 | 田村　仁優 |
|---|---|---|---|

主 論 文 題 目 ：

広範囲空間における頭部姿勢変動に頑健なキャリブレーションフリー視線推定

コンピュータの性能向上とイメージセンサの低価格化に伴い，カメラが様々なデバイスに内蔵され，日常生活における応用が広がっている．ノートPCやタブレット，ショッピングモールや駅構内にあるデジタルサイネージでは，利用者の顔を捉えるカメラが機器に内蔵され，テレビ通話やジェスチャ認識，インタラクションやマーケティングに利用されている．このようにカメラの搭載されたデバイスは今後とも増える見込みである．これらの機器に搭載されたカメラに，キャリブレーション作業や使用時の頭部位置拘束のない視線推定機能が搭載されれば，様々な商業応用価値を生むと考えられており，その実現が期待されている．

本論文では，社会での実利用に即した視線推定手法を目的とし，キャリブレーションフリーかつカメラに対して広範囲な頭部位置で利用可能な注視点推定手法を提案する．従来の手法は，赤外線LEDや距離センサなど特別な装置を要求するものや，使用前のキャリブレーションを強いるものが多く，一般的な用途には適していなかった．近年，単眼カメラのみでキャリブレーションフリーを実現した手法が多数報告されているが，いずれも使用者の頭部位置のカメラ近傍への拘束や，目領域解像度が低い場合に大きな精度低下が発生するといった問題があり，実利用上の課題となっていた．これに対し本論文では，解像度に依存しない頑健な虹彩追跡手法を軸とし，顔特徴点検出，虹彩追跡，注視点推定から構成される広範囲空間内での視線推定を実現する手法を提案する．

第１章では，研究背景として，社会における視線推定の重要性や応用例を紹介し，その現状について述べる．また，関連する手法を挙げて，本研究の位置付けや研究目的を明らかにする．

第２章では，顔画像からの顔特徴点検出手法について説明する．顔特徴点検出では，自然環境下で撮影された様々な人種，顔向き画像を含むデータセットで学習した畳み込みニューラルネットワークにより，環境光変化や頭部姿勢変動に頑健かつ高精度な顔特徴点検出を実現する．さらに，視線推定のための前処理として，目領域のみを学習したネットワークにより詳細な目形状の推定について述べ，顔特徴点検出のために一般的に用いられるデータセットを用いて精度比較実験を行う．

第３章では，虹彩追跡について説明する．従来手法では外乱エッジや低解像度環境が課題であったが，提案手法では，３次元眼球モデルをもとに，虹彩エッジの強度および勾配方向に着目した尤度評価と密なサンプリングにより頑健な虹彩追跡を実現する．このように低解像度に強い追跡を実現する手法について述べる．

第４章では，注視点推定について解説する．広い空間内で非拘束視線推定を実現するため，独自の視線データセットを作成した．本データセットにより学習した回帰モデルによって，画面上の注視点を推定する方法について詳細に述べる．

第５章では，提案手法の有効性を検証する．第４章で作成した視線データセットによる検証を通して，従来のデータセットより低解像度の条件における注視点推定精度の比較を行う．

第６章では，本論文をまとめ，応用例とともに今後の課題と展望について述べる．

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第 4714 号 | 氏　名 | 田村　仁優 |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 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 | 工学博士 | 岡田　英史 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 田中　敏幸 |
| | | 慶應義塾大学准教授 | 博士（工学） | 満倉　靖恵 |

学士（工学）、修士（工学）田村仁優君提出の学位請求論文は、「広範囲空間における頭部姿勢変動に頑健なキャリブレーションフリー視線推定」と題し、６章から構成されている。

コンピュータの性能向上とイメージセンサの低価格化に伴い、カメラが様々なデバイスに内蔵され、日常生活における応用が広がっている。ノート PC やタブレット、ショッピングモールや駅構内にあるデジタルサイネージでは、利用者の顔を捉えるカメラが機器に内蔵され、テレビ通話やジェスチャ認識、インタラクションやマーケティングに利用されている。これらの機器に搭載されたカメラに、キャリブレーション作業や使用時の頭部位置拘束のない視線推定機能が搭載されれば、様々な商業応用価値を生むと考えられており、その実現が期待されている。既存の視線推定手法は、赤外線 LED や距離センサ等、特別な装置を用いたり、事前のキャリブレーション作業が必要なものが多かった。また、近年では単眼カメラのみでキャリブレーションフリーな視線推定を実現した手法が報告されているが、使用者の頭部位置の制限、目領域の解像度が低い場合における精度低下といった点が、実利用上の大きな課題となっていた。

本論文では、社会での実利用に即した視線推定手法の実現へ向けて、キャリブレーションフリーかつカメラに対して広範囲な頭部位置で利用可能な注視点推定手法を提案している。解像度に依存しない頑健な虹彩追跡手法を基盤とし、顔特徴点検出、虹彩追跡、注視点推定から構成される視線推定手法により、広範囲空間内におけるキャリブレーションフリーな視線推定が実現可能であることを示している。

第１章では、研究背景として、社会における視線推定の重要性や応用例を紹介し、その現状について述べている。また、関連手法を挙げ、本研究の位置付けや研究目的について述べている。

第２章では、顔画像からの顔特徴点検出手法について述べている。顔特徴点検出では、自然環境下で撮影された様々な人種、顔向き画像を含むデータセットで学習した畳み込みニューラルネットワークにより、環境光変化や頭部姿勢変動に頑健な顔特徴点検出を実現可能であることを示している。さらに、視線推定のための前処理として、目領域のみを学習したネットワークによる詳細な目形状の推定手法について述べ、顔特徴点検出のために一般的に用いられるデータセットを用いて精度比較実験を行い、従来手法からの検出精度向上を確認している。

第３章では、虹彩追跡について説明している。従来手法では外乱エッジや低解像度環境が課題であったが、提案手法では、３次元眼球モデルをもとに、虹彩エッジの強度および勾配方向に着目した尤度評価と密なサンプリングにより、低解像度環境においても頑健な虹彩追跡を実現している。

第４章では、注視点推定の手法について述べている。広い空間内で非拘束な視線推定を実現するため、独自の視線データセットを作成している。本データセットにより学習した回帰モデルによって、画面上の注視点を推定する方法について詳細に述べている。

第５章では、提案手法の有効性を検証している。第４章で作成した視線データセットによる検証を通して、従来のデータセットよりも低解像度の条件下における注視点推定実験を行い、提案手法が従来手法を上回る推定性能を有することを確認している。

第６章では、本論文をまとめ、応用例とともに今後の課題と展望について述べている。

以上要するに、本論文は顔特徴点検出、虹彩追跡、注視点推定手法から構成される視線推定手法により、広範囲空間内におけるキャリブレーションフリーな視線推定を実現可能であることを示したもので、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4719号 | 氏　名 | 川口　貴弘 |
|---|---|---|---|

主論文題名：

ルベーグサンプリングのもとでのシステム同定と状態推定に関する研究


システム同定と状態推定は，システムの入出力信号をもとにシステムのモデリングと内部状態の推定を行う方法である．従来のシステム同定や状態推定では，出力信号を時間に関して等間隔にサンプリングするのが一般的である．これに対して本論文では，信号があらかじめ定められた値になったときにサンプリングを行うルベーグサンプリングに着目する．ルベーグサンプリングを用いると，信号がサンプリングされなかったときにも「信号値が定められた値にならなかった」というサンプル点間情報を得ることができる．本論文では，この情報を用いたシステム同定法と状態推定法を提案する．提案法では，サンプル点間情報の活用により，データ数を減らしながらもモデリングや状態推定精度を高めることができる．

第1章では，本論文の目的について述べる．本論文の目的はルベーグサンプリングのもとでのシステム同定法と状態推定法を提案し，データ数を減らしても高精度なモデリングと状態推定を可能にすることである．

第2章では，本論文のもとになる数学的な基礎知識について述べる．特に，統計的な推定の基礎とそれに基づいたシステム同定法，状態推定法についてまとめる．

第3章では，ルベーグサンプリングのサンプル点間情報に対応する尤度関数を導出し，最尤推定に基づいたシステム同定法を提案する．また，提案法を用いたときのシステム同定結果の統計的な性質を明らかにする．数値例を通して提案法によるシステム同定精度を評価し，サンプル点間情報を用いることの有用性を示す．また，提案法を用いると，時間に関して等間隔なサンプリングを用いた場合に比べてデータ数が減少したときのシステム同定精度を高めることができることを示す．

第4章では，ルベーグサンプリングのもとでサンプル点間情報を活用した状態推定法を提案する．ルベーグサンプリングのサンプル点間情報を用いると，尤度関数が正規分布でなくなるため，従来の状態推定法を用いることはできない．そこで，非正規分布を扱える粒子フィルタを用いて状態推定を行うことを提案する．サンプル点間情報の活用により状態推定精度が向上することを数値例で示す．

第5章では，提案したシステム同定法と状態推定法の応用例として，二次電池への適用について述べる．本論文で提案したシステム同定法を用いて，二次電池の内部抵抗を特徴付ける未知パラメータの推定を行う．また，提案した状態推定法を用いて二次電池の充電率を推定する．二次電池の電気自動車での利用を模擬した数値実験を行い，提案法の有用性を示す．

第6章では，各章で得られた内容をまとめ，本研究の成果を述べる．

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲 第 4719 号 | 氏　名 | 川口　貴弘 |
| --- | --- | --- | --- |

| | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 足立　修一 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 博士(工学) | 内山　孝憲 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 大森　浩充 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士(工学) | 滑川　徹 |

学士（工学），修士（工学）川口貴弘君提出の学位請求論文は，「ルベーグサンプリングのもとでのシステム同定と状態推定に関する研究」と題し全 6 章から構成されている．

この論文は，信号があらかじめ定められた値になったときにサンプリングを行うルベーグサンプリングのもとでの，システム同定と状態推定について述べたものである．ルベーグサンプリングにおいて，信号がサンプリングされなかったときにも，信号値が定められた値にならなかったというサンプル点間情報を活用することを本論文では提案している．提案法を用いることにより，利用するデータ数を低減でき，しかも同定精度や状態推定精度を維持することが可能になる．

第 1 章では，ルベーグサンプリングのもとでのシステム同定法と状態推定法を提案し，データ数を減らしても高精度なモデリングと状態推定が可能であることを，本論文の研究の目的として述べている．

第 2 章では，本論文のもとになる数学的な基礎知識について述べている．

第 3 章では，ルベーグサンプリングのサンプル点間情報に対応する尤度関数を導出し，最尤推定に基づいたシステム同定法を提案している．また，提案法を用いたときのシステム同定結果の統計的な性質を明らかにしている．数値例を通して提案法によるシステム同定精度を評価し，サンプル点間情報を用いることの有用性を示している．さらに，提案法を用いると，時間に関して等間隔なサンプリングを用いた場合に比べてデータ数が減少したときのシステム同定精度を高めることができることを示している．

第 4 章では，ルベーグサンプリングのもとでサンプル点間情報を活用した状態推定法を提案している．ルベーグサンプリングのサンプル点間情報を用いると，尤度関数が正規分布に従わないので，従来の状態推定法を用いることはできない．そこで，非正規分布を扱える粒子フィルタを用いて状態推定を行うことを提案している．サンプル点間情報の活用により状態推定精度が向上することを数値例で示している．

第 5 章では，提案したシステム同定法と状態推定法の応用例として，二次電池への適用について述べている．本論文で提案したシステム同定法を用いて，二次電池の内部抵抗を特徴づける未知パラメータを推定し，提案した状態推定法を用いて二次電池の充電率を推定している．二次電池の電気自動車での利用を模擬した数値実験を行い，提案法の有用性を示している．

第 6 章は本論文のまとめである．

以上要するに，本研究の成果は，大量データをルベーグサンプリング法によって，本質的な情報を失うことなく，より少ないデータに効率的に削減する方法論を提示したことである．ルベーグサンプリングをシステム同定と状態推定という二つの推定問題に適用する方法を提案したことは，理論的貢献が大である．また，この方法論は実システムへの応用に展開できる可能性を十分に秘めている．

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4720号 | 氏　名 | 室井　秀夫 |
|---|---|---|---|

主 論 文 題 名 ：

モデルベース開発におけるシステム同定に関する研究

－同定入力選定と評価指標の提案－

モデルベース開発とは，制御対象を表現するプラントモデルと制御装置を表現するコントローラモデルを用いた，組込みソフトウェア開発の方法論である．プラントモデルは物理モデルを用いるケースが多いが, 分布定数系など複雑なモデルを扱う場合,計算に時間がかかる問題がある．この場合，モデルの低次元化手段としてシステム同定が利用される．システム同定をおこなうとき，特に同定入力設計やモデルの妥当性検証に注意が必要である．同定入力設計では，可同定性を満たす入力を印加しなければならない．しかし，制御対象が多入力システムである場合，可同定性に関する研究は少なく，同定入力設計が課題となる．また，モデルの妥当性評価では，同定されたモデルと物理モデルに対し，それぞれの出力波形を比較する．この比較を行うとき，適合率と呼ばれる指標がよく用いられる．しかし，適合率は負値を取る，低振幅波形に高い値を示す，といった課題がある．そこで，本論文では、多入力 1 出力システム（共通極システム）に対する同定入力としての M 系列設計法と、同定結果の評価に用いる指標について述べる．

第 1 章では、本論文の目的について述べる．本論文の目的は、前述の同定入力設計とモデル妥当性評価に関する課題の解決を図るものである。

第 2 章では，本論文の背景について述べる．具体的には，本論文の背景となる同定入力設計とモデルの妥当性評価の基礎的な事項および従来研究について述べる．

第 3 章では，共通極システムに対する入力設計について述べる．まず，共通極システムに対して，巡回シフト M 系列と呼ばれる 1 つの M 系列を巡回シフトして得られる信号を，確定的可同定性を満たすように印加する条件を導く．導いた条件は，従来の条件と異なり，極零相殺を許容するため，実質的には共通極を仮定しなくとも適用できる特徴がある．つぎに，条件に則った入力設計法を提案し，提案法が適切に機能することを数値例によって確認し，導いた条件の妥当性と，設計法の有効性を確認する．

第 4 章では，システム同定結果の時間領域での評価法について述べる．まず，適合率に代わる指標を提示するために，システム同定分野外で提案された代表的な指標を紹介し，それらの指標をいくつかのカテゴリに分類する．そして，この分類をもとに三角不等式を用いて RMSE（Root Mean Squared Error）を規格化する指標“$\mathrm{Tri}_2$”を提案する．$\mathrm{Tri}_2$ は正値のみを取り，低振幅波形に対し高い値を示さないため，適合率の課題を克服している．最後に，$\mathrm{Tri}_2$ を一般的なシステム同定結果評価に用いることを考慮して，線形回帰モデルに対して $\mathrm{Tri}_2$ に最良値を与える条件について解析し，予測値と測定値のノルムが一致する条件のもと，その誤差が最小となる解が最良値を与えることを導く．最後に，システム同定の結果評価を想定した出力に平均値が 0 の白色雑音が混入した状況下では，$\mathrm{Tri}_2$ が与える最良値が真値からバイアスすることを明らかにする．

第 5 章では，本論文の結論と今後の発展性について述べる．

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第4720号 | 氏　名 | 室井　秀夫 |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 足立　修一 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 博士(工学) | 内山　孝憲 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 大森　浩充 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士(工学) | 滑川　徹 |

学士（工学），修士（工学）室井秀夫君提出の学位請求論文は，「モデルベース開発におけるシステム同定に関する研究　－同定入力選定と評価指標の提案－」と題し全5章から構成されている．

モデルベース開発を行うためにはさまざまな技術が必要になるが，その中でも対象の入出力データからモデリングを行うシステム同定理論は重要な構成要素である．システム同定理論を実問題に適用するとき解決すべき課題の内，本論文では，共通極システムと呼ばれるクラスの多入力1出力システムに対する同定入力の設計法を提案し，システム同定結果の時間領域における評価に用いる指標について考察している．

第1章では，本論文が解決すべき課題と本論文の目的について述べている．

第2章では，本論文の背景となるシステム同定入力の選定と，時間領域におけるモデルの妥当性評価の従来研究について述べている．

第3章では，共通極システムに対する多入力1出力システム同定の入力選定問題について述べている．まず，共通極システムに対して，巡回シフトM系列と呼ばれる信号を，確定的可同定性を満たすように印加するための十分条件と必要条件を導いている．システム同定理論を実問題に適用するとき，この理論的解析の価値は非常に大きい．つぎに，その条件を満たす入力設計法を提案し，その提案法が適切に機能することを数値例によって確認している．

第4章では，システム同定結果の時間領域での評価法について考察している．従来からシステム同定理論で用いられている適合率（FIT ratio）に代わる指標を提示するために，まず，システム同定分野外で提案された代表的な指標を紹介し，それらの指標をいくつかのカテゴリに分類している．そして，この分類をもとに三角不等式を用いてRoot Mean Squared Error（RMSE）を規格化する指標Tri2を提案している．Tri2は正値のみを取り，また低振幅波形に対して高い値を示さない．これらの性質は適合率の課題を克服するものである．さらに，Tri2を一般的なシステム同定結果の評価に用いることを考慮して，線形回帰モデルに対してTri2に最良値を与える条件について解析し，予測値と測定値のノルムが一致する条件のもとで，その誤差が最小となる解が最良値を与えることを導いている．

第5章は本論文のまとめである．

以上要するに，本研究の成果は，モデルベース開発を行う上で重要な構成要素であるシステム同定理論を実問題に適用するときに解決すべき二つの課題を解決したこと，すなわち，多入力システムに対する同定入力選定を提案し，システム同定結果の時間領域における新たな評価法を提案したことである．前者に関しては，これまでほとんど研究されてこなかった多変数システムの同定入力の選定問題に対して理論的な解析結果を与えたことの意義は大きい．後者に関しては，時間領域におけるモデルの妥当性評価規範はシステム同定問題のみならず，さまざまな分野へ適用可能であり，その波及効果が期待できる．

よって，本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める．

# 内容の要旨

| 報告番号 | 甲　第4721号 | 氏　名 | 林谷　昌洋 |
|---|---|---|---|

主 論 文 題 目 ：

Optical Access/Intra Data Center Network with High Energy Efficiency and Reliability

（省電力化および高信頼化を実現する光アクセス/イントラデータセンタネットワーク）

近年、クラウドサービスの進展により、データセンタに流れるトラフィックが急増している。2019年には、データセンタに向かうトラフィックはアクセスネットワークにおいて8割を占め、また、データセンタ内のトラフィックでは、現在、7割がデータセンタ内に閉じている性質がある。上記背景を踏まえ、データセンタにアクセスするネットワーク（以下、アクセスデータセンタネットワーク）およびデータセンタ内ネットワーク（以下、データセンタ内ネットワーク）では増加するトラフィックに対応できるように、ネットワーク省電力化およびミッションクリティカルに対応する高信頼化を実現するネットワーク構成を考える必要がある。

現在のアクセスデータセンタネットワークでは一般的にPON (Passive Optical Network) が用いられている。しかし、データセンタに向かうトラフィックが急増し、ユーザ数が増加することを考慮すると、よりアグリゲーション型のアーキテクチャに改良する必要がある。本論文では、光スイッチを導入したアクセスデータセンタネットワークにおいて、大規模化を考慮したさらなる省電力化を行うアクセスデータセンタネットワークにフォーカスする。現在のイントラデータセンタネットワークでは、主に電気スイッチやルータが用いられている。しかし、データセンタ内のトラフィックが急増することを考慮すると、消費電力および大容量トラフィック対応のため、省電力化および大容量化が可能な光技術を導入する必要がある。本論文では、光技術を用いたデータセンタネットワークにおいて、データセンタ性能を考慮したさらなる省電力化、およびミッションクリティカルを考慮したマルチサービスの高信頼化を行うイントラデータセンタネットワークにフォーカスする。

そこで本論文では、省電力および高信頼を実現する光アクセス/イントラデータセンタネットワークを提案する。光アクセスデータセンタネットワークでは、ユーザの通信状態を考慮した光スイッチの切り替え回数を低減させ、大規模化を実現しながら省電力化を実現する。光イントラデータセンタネットワークでは、ネットワークおよびVM (Virtual Machine)の状況を考慮しながら光ネットワーク制御およびVM制御を行い、省電力化を実現する。また、障害通知により低優先のサービスを高速に停止させることにより、高信頼サービスの高速復旧を行う高信頼化を実現する。

本論文は以下のように構成される。第1章では、データセンタネットワークにおける課題を整理し、本論文の位置づけを明確化する。第2章では、関連するデータセンタネットワーク技術および省電力化および高信頼化の手法を紹介する。第3章では、アクセスデータセンタネットワークにおける省電力化について提案を行う。計算シミュレーションにより、光スイッチの切替回数を25%低減できることを示す。第4章では、イントラデータセンタネットワークにおける省電力化について提案を行う。計算機シミュレーションにより、従来手法と比較して、データセンタ性能を維持させながら、データセンタネットワークの消費電力を約40%削減できることを示す。第5章では、イントラデータセンタにおける高信頼化について提案を行う。計算機シミュレーションにより、従来方式と比較して低優先度のサービスを提供中に高優先度サービスの通信遮断時間を約60%低減できることを示す。最後に第6章において、本論文の研究の結論を述べる。

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第 4721 号 | 氏　名 | 林谷　昌洋 |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 山中　直明 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 笹瀬　巌 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 天野　英晴 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 津田　裕之 |
| | | George Mason University | Ph.D in Electrical Engineering | Bijan Jabbari |

学士（工学），修士（工学）林谷昌洋君の学位請求論文は，「Optical Access/Intra Data Center Network with High Energy Efficiency and Reliability（省電力化および高信頼化を実現する光アクセス/イントラデータセンタネットワーク）」と題し，全 6 章から構成される．

近年，クラウドサービスの進展により，データセンタに流入するトラフィックおよびデータセンタ内のトラフィックが急増している．トラフィックの増加により，データセンタネットワークの消費電力の増大および故障発生時の影響の拡大が想定される．上記背景を踏まえ，データセンタにアクセスするネットワーク（以下，アクセスデータセンタネットワーク）およびデータセンタ内ネットワーク（以下，イントラデータセンタネットワーク）において，ネットワーク省電力化およびミッションクリティカルに対応する高信頼化を達成するネットワーク構成を確立する必要がある．

本論文では上記の要求を実現するため，光スイッチ技術を導入したデータセンタネットワークに焦点を当てている．動的制御が可能な空間分割型光スイッチを導入した光アクセスデータセンタネットワークおよび動的制御が可能な光パケットスイッチを導入した光イントラデータセンタネットワークをベースに，省電力化および高信頼化を達成する研究を行っている．本論文は以下のように構成される．

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 章ではデータセンタネットワークの基盤技術，データセンタネットワークの省電力化および高信頼化の関連技術を提示し，これらに対する本研究の位置づけを明確化している．

第 3 章，第 4 章，および第 5 章では具体的な研究内容について述べている．第 3 章では，光アクセスデータセンタネットワークにおける省電力化について提案している．光アクセスデータセンタネットワークにおいて，ユーザの通信状態に応じた局側終端装置の稼働数最小化および時間スロットの集約的な割り当てによる宅内側終端装置のスリープ機会を最大化させる制御手法を提示している．計算機シミュレーションにより，従来アクセスネットワークと比較してネットワークの消費電力を最大 47%低減可能であることを示している．

第 4 章では，光イントラデータセンタネットワークにおける省電力化について提案している．光イントラデータセンタネットワークにおいて光スイッチのバッファ部分の消費電力が多くを占める．そこで，仮想マシン稼働状況およびネットワーク状況からデータセンタ性能を維持するように仮想マシンの集約および分散を行い，光スイッチのバッファ稼働数を最小化するデータセンタ制御手法を提示している．計算機シミュレーションにより，提案のデータセンタ制御手法を導入することにより，ネットワークの消費電力を最大 40%低減可能であることを示している．

第 5 章では，光イントラデータセンタネットワークにおける高信頼化について提案している．光イントラデータセンタネットワークにおいて，故障発生時に低優先サービスの停止に時間を要することで中優先サービスの復旧が遅れる問題がある．そこで，故障パス上の全ノードを経由する故障通知により低優先サービスを高速に停止させ，低優先サービスの影響を受ける中優先サービスの高速復旧を行う故障回復手法を提示している．計算機シミュレーションにより，低優先サービスの送出状況にかかわらず，中優先サービスの通信遮断時間が一定値に抑制されることを示している．

第 6 章は結論であり，本研究により得られた結果を総括している．

以上要するに，本論文は低消費電力かつ高信頼性を備えた光アクセス/イントラデータセンタネットワーク確立のために，装置稼働数最小化・スリープ機会最大化を行うネットワーク制御手法，光スイッチのバッファ稼働数を最小化するデータセンタ制御手法，低優先サービスの高速停止による中優先サービスの高速故障回復手法について提示している．これらの研究内容は，将来の社会インフラとしてのデータセンタネットワークの継続的発展を実現する上で，工学上・工業上寄与する所が少なくない．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.4722 | Name | Kharga, Digvijay |
|---|---|---|---|

Thesis Title

Strong-coupling Properties of an Ultracold Bose-Fermi Mixture with a Hetero-nuclear Feshbach Resonance

In this thesis, I theoretically investigate normal-state properties of a gas mixture of single-component Bose and Fermi atoms, with a tunable inter-species pairing interaction associated with a hetero-nuclear Feshbach resonance. Including Bose-Fermi hetero-pairing fluctuations associated with the inter-species interaction, I clarify single-particle properties of the system above the Bose-Einstein condensation temperature $T_{\rm BEC}$, from the weak-coupling regime to the strong-coupling regime. I also examine strong-coupling effects on thermodynamic quantities.

After an overview of cold atom physics, I present my formulation. I point out that the ordinary non-self-consistent $T$-matrix approximation (TMA), which has extensively been used for the study of strongly interacting ultracold Fermi gases, has room for improvement, when applied to a Bose-Fermi mixture. This is because TMA uses the bare Bose Green's function that does not satisfy the required gapless Bose excitations at the $T_{\rm BEC}$, in evaluating self-energy corrections. To overcome this, I improve TMA so that the gapless condition can be satisfied.

Using this improved $T$-matrix approximation (iTMA), I study single-particle excitations near $T_{\rm BEC}$. Hetero-pairing fluctuations are shown to couple Fermi atomic excitations with Bose atomic and Fermi molecular excitations. Although a similar coupling phenomenon is known in the unitary regime of an ultracold Fermi gas, while it causes the pseudo-gapped density of states in the latter Fermi system, such a phenomenon is found to be absent in a Bose-Fermi mixture even at the unitarity. A shallow pseudo-gapped density of state is only obtained in the strong-coupling regime.

I also examine strong-coupling effects on thermodynamic properties of a unitary Bose-Fermi mixture. To minimize ambiguity coming from approximate treatment of hetero-pairing fluctuations, I employ a combined iTMA with exact thermodynamic relations, where complicated iTMA calculations are only done to calculate Fermi and Bose chemical potential. Various thermodynamic quantities are then evaluated from the calculated chemical potential by using exact thermodynamic identities. I find that the specific heat at constant volume is a useful quantity for the study of strong-coupling properties of the system, because it is sensitive to hetero-pairing fluctuations, to exhibit anomalous non-monotonic temperature dependence.

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第4722号 | 氏　名 | Kharga, Digvijay |
| --- | --- | --- | --- |

| 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 | 理学博士 | 高野　宏 |
| | | 慶應義塾大学准教授 | 博士（工学） | 神原　陽一 |
| | | 慶應義塾大学准教授 | 博士（理学） | 渡邉　紳一 |

Bachelor of Science with Honours in Physics、Master of Science in Physics、Kharga Digvijay 君の学位請求論文は、「Strong-coupling Properties of an Ultracold Bose-Fermi Mixture with a Hetero-nuclear Feshbach Resonance」と題し、全5章より構成されている。

本研究が対象とするボース・フェルミ混合気体とは、ボース原子とフェルミ原子を混合し極低温まで冷却した量子気体を指す。この系は、フェッシュバッハ共鳴により、ボース原子とフェルミ原子との間にはたらく引力相互作用の強さを自在に制御できるという特徴を有しており、ボース原子ガス成分がボース・アインシュタイン凝縮を起こす一方でフェルミ原子ガス成分がフェルミ縮退状態となる弱結合極限から、両者が強く結合しフェルミ分子気体となる強結合極限までを統一的に研究できる系として注目されている。また、同じく相互作用制御が可能な冷却フェルミ原子気体との比較から、強結合効果に対する粒子の量子統計性（ボース、フェルミ統計）の影響が解明できるものと期待されている。しかし、冷却フェルミ原子気体の強結合物性の研究に有効である $T$ 行列近似(TMA)はボース・フェルミ混合気体の強結合領域を正しく記述できず、この系に適用可能な強結合理論の開発が当該研究分野において急務となっている。本研究は、この重要課題に対し、TMA が抱える困難の原因を突き止め、ボース・フェルミ混合気体に対する新しい強結合理論の構築に成功するという、非常に重要な成果を挙げている。さらに、この理論を駆使し、この系の1粒子励起や熱力学的性質に対する対形成揺らぎの影響を理論的に明らかにする、という成果も挙げている。

第1章は序論である。ボース・フェルミ混合気体とフェッシュバッハ共鳴、および、冷却フェルミ原子気体が説明された後、本研究の目的が述べられている。

第2章では、ボース・フェルミ混合気体に対する新しい強結合理論が説明されている。TMA の自己エネルギーに現れるボースグリーン関数が、ボース・アインシュタイン凝縮において成り立つべき条件（ギャップレス条件）を満たしておらず、これがボース・フェルミ混合気体の強結合領域を正しく記述できない原因であることを突き止めている。そして、それを改善することで、強結合領域のフェルミ分子気体状態を正しく記述できるようになることを具体的計算により示している。

第3章では、第2章で構築した理論を用い、ボース・アインシュタイン凝縮転移温度近傍におけるボース・フェルミ混合気体の1粒子励起を研究している。引力相互作用が強くなると、対形成揺らぎにより、フェルミ原子、ボース原子、フェルミ分子の励起が結合し、フェルミ原子やボース原子の1粒子励起スペクトルにこれら3種類の励起分散を反映したピーク構造が現れることを明らかにしている。更に、フェルミ原子気体では対形成揺らぎに起因する1粒子励起の結合は擬ギャップ現象を引き起こすが、ボース・フェルミ混合気体の場合、フェルミ分子の励起によりこの量子多体現象が抑制されることも明らかにしている。この成果は、粒子の統計性の違いが擬ギャップ現象の発現に大きく影響することを示すものであり、重要である。

第4章では、ユニタリ極限におけるボース・フェルミ混合気体の熱力学的性質を研究している。第2章で構築した理論とユニタリ極限で成り立つ普遍熱力学を組み合わせ、この相互作用強度における内部エネルギー、圧力、エントロピー、比熱の温度依存性を得ることに成功している。また、比熱が示す非単調な温度変化が対形成揺らぎに因ることを明らかにし、この系の対形成揺らぎを研究するうえで、比熱の温度変化の観測が非常に有効であることを理論的に指摘している。

第5章では、結論として本研究の成果がまとめられている。

本研究は、強結合ボース・フェルミ混合気体を扱える新しい理論の構築に成功しており、その成果は高く評価できる。様々な物理量に対し本研究が明らかにした強結合効果は、当該研究分野の今後の発展に大いに貢献するものである。また、フェルミ原子ガスとの比較研究で明らかとなった強結合領域での2つの系の類似性と差異は、広く強結合超流動現象の理解に資するものである。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4723号 | 氏　名 | 西田　有延 |
|---|---|---|---|

主 論 文 題 目 ：

ベクトル的世代を含む超対称模型における
フレーバー構造が及ぼすヒッグス質量と暗黒物質への寄与


２０１２年、欧州原子核機構の大型ハドロン衝突器実験においてヒッグス粒子が発見され、素粒子標準模型が予言した粒子が全て実験的に確認された。ヒッグス粒子は、電子や、陽子を構成するアップクォークやダウンクォークに質量を与える、質量の起源を説明する粒子である。ここで、クォークと電子は、水素原子のような物質を構成する素粒子である。標準模型は、他にも多くの実験結果を説明することができるため、大きな成功を収めている模型といえる。

しかしながら以下で述べるように、標準模型のみでは説明できない観測事実も数多く存在しているため、そのような事実の物理的起源を探ることは素粒子物理学に残された重要な研究の一つである。その中でも超対称性は新たな物理法則の有力候補とされている。超対称性はフェルミオンとボソンの間の対称性であり、新しい自由度を導入するため、暗黒物質の候補が現れる等、興味深い物理現象を提供することが知られている。

素粒子物理学における最大の謎の一つに、クォークや電子等の素粒子には、量子数は同じだが、質量のみが異なるコピーが存在するといったものがある。このコピーの概念は世代とよばれており、現在のところ実験で観測されているクォークや電子のコピーは共に３世代目までである。なぜ３世代目の素粒子までしか確認されていないのかは未だ謎に包まれたままである。従って、４、５世代目（これらをベクトル的世代と呼ぶ）の存在の可能性を踏まえて世代数の物理的理由を追求することは、今後の素粒子物理学の発展を見据えた、意義のある研究であると思われる。

本論文ではベクトル的世代を加えた超対称模型を新たに構築し、その中でヒッグス粒子の質量に対し、ベクトル的世代が重要な寄与を担っていることを見る。その時、模型構築において重要な指針となる２つの物理に注目する。ミュー粒子の磁気的性質(磁気能率)と、暗黒物質の残存量である。ミュー粒子の磁気的性質は、標準模型を用いた理論値と実験値のずれが報告されており、新たな物理が示唆されている物理量である。一方で暗黒物質は、現存する星々の形成、ひいては、我々人類の誕生のために必要不可欠な物質であることが知られているが、標準模型には候補が存在しない。

本論文の議論で重要となるのは世代間の質量を通じた状態の混合である。それは世代間の対称性によって支配されており、ヒッグス粒子の質量、ミュー粒子の磁気的性質、暗黒物質の残存量へ大きな寄与を出す。さらに、本模型での暗黒物質の候補は、ベクトル的世代に質量を与える機構と関連付いている。我々は、ヒッグス粒子の質量、ミュー粒子の磁気的性質、暗黒物質の熱的残存量を説明できるパラメータ領域では、ベクトル的世代の素粒子は観測にかからないということを明らかにした。従って、暗黒物質の存在が、素粒子の第３世代までしか実験で確認されていないことを支持していると言える。

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第 4723 号 | 氏　名 | 西田　有延 |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学専任講師 | 博士（理学） | 檜垣　徹太郎 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 博士（理学） | 岡　朋治 |
| | | 慶應義塾大学准教授 | 博士（理学） | 山本　直希 |
| | | 慶應義塾大学専任講師 | 博士（数理科学） | 服部　広大 |
| | | 京都大学准教授 | 博士（理学） | 吉岡　興一 |

学士(理学)、修士(理学)西田有延君提出の学位請求論文は、「ベクトル的世代を含む超対称模型におけるフレーバー構造が及ぼすヒッグス質量と暗黒物質への寄与」と題し、全 8 章より構成されている。

素粒子標準模型は様々な素粒子実験の結果を精度良く説明することができるため、成功を収めている模型である。一方で、実験精度や手法の向上により、標準模型では説明できない素粒子現象が存在することが知られている。電子など素粒子に質量を与えるヒッグス粒子の質量の起源、ミュー粒子の磁気的性質（異常磁気モーメント）の実験値、暗黒物質の起源もそれに含まれ得る。そのため標準模型を超えた新たな物理を探る事は、現実的な素粒子模型を構築する上で重要な課題である。本論文では、物質を構成する素粒子の質量の違いによる種類の数（世代）の謎に着目し、既知の 3 世代素粒子だけでなく、未発見の 4 世代目以降の素粒子 (ベクトル的世代)を加えた超対称模型を構築している。ベクトル的世代と 3 世代間の混合を、それらの間の自発的対称性の破れから決定し、ヒッグス粒子の質量、ミュー粒子の異常磁気モーメント、暗黒物質への影響について解析を行い、ベクトル的世代を含む模型がもたらす物理について研究を行っている。

第 1 章では、本論文の背景、目的と結果の概略を述べている。第 2 章では、超対称性を導入する動機について述べている。第 3 章では、超対称な模型の構成方法、超対称性の自発的破れの概略を説明している。第 4 章では、最小超対称標準模型の概略を述べ、その模型の下でヒッグス粒子の質量とミュー粒子の異常磁気モーメントの理論的評価方法ついて述べている。第 5 章では、ベクトル的世代を導入する動機を述べている。前章で説明したヒッグス粒子の質量とミュー粒子の異常磁気モーメントの 2 つは、最小超対称標準模型では同時に説明する事が理論的に困難である事に着目し、新たにベクトル的世代を導入する事を述べている。

第 6 章では、ベクトル的世代を加えた超対称模型の研究を行っている。ゲージ結合定数が、低エネルギー領域における模型の動力学を支配するという本模型の特徴に着目し、ヒッグス粒子、ミュー粒子それぞれがベクトル的世代と強く結合することを述べている。ベクトル的世代からの新たな寄与を評価することにより、ヒッグス粒子の質量とミュー粒子の異常磁気モーメントの 2 つの実験結果を同時に説明できることを明らかにしている。

第 7 章では、ベクトル的世代と 3 世代目までの世代間混合と暗黒物質の起源を詳細に研究している。本模型における世代間混合は、世代間対称性の自発的破れにより決定される。その時、電子など素粒子の質量や Cabbibo-Kobayashi-Maskawa 行列の実験値が再現される事を示している。さらに本模型において、ベクトル的世代の質量と超対称性と関連し、暗黒物質の候補が現れることを述べている。初期宇宙において、暗黒物質が熱的に生成されるとした場合に、ヒッグス粒子の質量、ミュー粒子の異常磁気モーメント、暗黒物質の残存量の実験観測値を同時に説明できることを明らかにしている。また、本模型で提案された暗黒物質の直接探索実験に関する展望が述べられている。第 8 章では、本論文の結論がまとめられている。

本研究では、ベクトル的世代を含む模型において世代間対称性の自発的破れを通じ、観測されている電子など素粒子の質量や、Cabbibo-Kobayashi-Maskawa 行列のみならず、ヒッグス粒子の質量、ミュー粒子の異常磁気モーメント、暗黒物質の熱的残存量を同時に説明した。同時にこれだけ多くの観測量を関連付ける事は初めての試みであり、ベクトル的世代が自然界に存在する可能性を広げた。現在行われている実験だけでなく今後の暗黒物質の探索を通じて、世代の違いに関する素粒子物理の謎を解明する糸口となる期待ができる。これらの研究成果は、今後の標準模型を超える新たな模型構築において、重要になる成果であると言える。

よって、本論文の著者は博士(理学)の学位を受ける資格があるものと認める。

# Thesis Abstract

| Registration Number | “KOU” No.4724 | Name | ABDUL MANAF, Ahmad Rosli bin |
|---|---|---|---|

Thesis Title

Development of Silicon-polymer Hybrid Lenses for Infrared Optical Systems


The demand for low-cost infrared (IR) optics has increased over the past decade. Ge has been primarily used for the IR lenses because of its excellent IR transmittance and refractive index; however, Ge is bulky, heavy, and expensive. As an alternative, Si is another IR material which is lighter and cheaper than Ge. However, as Si is a typical hard and brittle material, the ultraprecision machining of Si into complicated shapes, such as Fresnel lenses, is considerably difficult. When diamond turning is used for machining Si, the process is very time-consuming, and serious tool wear takes place. In recent years, IR polymers, such as high-density polyethylene (HDPE), have been developed which are much cheaper and easier to shape by thermal molding processes. However, the transmittance of HDPE is still very low, thus the thickness of HDPE lens must be extremely thin, which brings the problem that the lens stiffness becomes very low and thus the substrate is easily deflected. Accordingly, there is an urgent need for exploring alternative IR lens substrates. In this study, a novel IR optical lens substrate, namely, the Si-HDPE hybrid substrate, was proposed and developed. An extremely thin layer of HDPE was laminated to one side of a Si wafer by means of silane-crosslinking, and the mechanical strength is further improved by utilizing a mechanical lock structure. Thus, the resulting Si-HDPE hybrid lens substrate possesses the advantages of both materials, i.e., the high stiffness and IR transmittance of Si together with the high formability of HDPE. The hybrid substrate was fabricated by high-precision press molding where the pressure and temperature were strictly controlled. The surface integrity and form accuracy of the developed Si-HDPE hybrid substrates were experimentally investigated. The IR imaging evaluation showed that the hybrid substrate was useable for night vision and thermography.

Chapter 1 provided an introduction and an overview of the research background. The research significance and the research objectives were summarized.

Chapter 2 provided literature review of lens fabrication techniques, IR imaging systems, and the materials used for fabricating the IR lenses. Especially, methods that past researchers used for fabricating hybrid optical lenses were reviewed.

Chapter 3 detailed the steps of fabricating the Si-HDPE hybrid lens by press molding. The mechanism of combining HDPE to Si and the Si-HDPE interface phenomenon were investigated. The IR transmittance and other optical properties of the hybrid substrate were evaluated.

In Chapter 4, the fabrication process of a micro-structured HDPE layer on the hybrid substrate was presented. The effect of press molding parameters on lens surface integrity, form accuracy, and mold coating performance were examined. An in-situ observation system was established and numerical simulation of the forming process was detailed.

Chapter 5 described the IR imaging evaluation of the fabricated hybrid lenses. The lens performance was measured and tested using a home built IR imaging system. The captured night mode and thermography images demonstrated that the fabricated lenses were usable for IR imaging. The combination of different IR lens materials was also introduced to examine the compatibility of the Si-HDPE hybrid lens with other lens materials.

Chapter 6 consisted of the overall conclusions of the research and the future tasks.

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第 4724 号 | 氏　名 | アブドゥル　マナフ，アフマド　ロスリ　ビン |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 閻　紀旺 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 大宮　正毅 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 三木　則尚 |
| | | 慶應義塾大学准教授 | 博士（工学） | 田邉　孝純 |

学士（工学），修士（工学）ABDUL MANAF, Ahmad Rosli bin（アブドゥル　マナフ，　アフマド　ロスリ　ビン）君提出の学位請求論文は「Development of Silicon-polymer Hybrid Lenses for Infrared Optical Systems（赤外線光学システム用シリコン・ポリマ複合レンズの開発）」と題し，6 章から構成されている．

近年，高性能かつ低コストの赤外線光学レンズに対する需要が急増している．これまでに赤外線レンズ材料として単結晶ゲルマニウムが主に用いられているが，非常に高価であり，レンズの軽量化も困難である．Ge より軽くて安価な単結晶シリコンも赤外線レンズ材料として使用されているが，硬脆材料であるため，非球面レンズやフレネルレンズのような複雑形状の機械加工が極めて困難である．一方で高密度ポリエチレン(High density polyethylene : HDPE)を代表とする赤外線透過ポリマが開発され，低コストで赤外線レンズを量産できる可能性が高まっている．しかし，HDPE は赤外線透過率が低いため，レンズを非常に薄くしなければならない．その結果，レンズの剛性が低下し，変形しやすい問題がある．本論文の著者は，新たな赤外線光学レンズとして，厚さ数十μm の HDPE 層をシラン架橋結合によって Si ウエハ表面に付着させた Si-HDPE 複合レンズを提案し，圧力と温度の精密制御によって複合レンズの高精度成形を試みている．レンズの表面性状や形状精度そして Si-HDPE の界面現象における成形条件の影響を解明し，暗視画像と熱画像の両面から複合レンズの赤外線光学性能を検証している．以上の結果に基づいて，剛性，軽量性，成形性および光学性能などすべての面で優れた赤外線レンズを製造できる可能性を示している．

第 1 章は序論であり，本研究の背景，目的，本論文の構成などについて述べている．

第 2 章では，先行研究におけるレンズ成形技術，赤外線レンズに使用される光学材料，複合レンズの成形法などを紹介するとともに，それらの問題点を指摘している．

第 3 章では，本研究で提案した Si-HDPE 複合レンズのプレス成形法の概要を述べている．成形圧力と温度を変化させ，Si と HDPE の結合機構や界面現象などについて調査し，複合レンズ基板の赤外線透過率などの光学的特性の評価を行っている．

第 4 章では，複合レンズ上の HDPE 層へのマイクロ構造の高精度成形について述べている．成形プロセスのリアルタイム観察により，プレス条件がレンズの表面性状，形状精度および金型の離型膜の形態変化に与える影響について調査している．

第 5 章では，成形後の複合レンズの赤外線光学性能評価について述べている．評価システムを構築し，暗視画像と熱画像の両面から，複合レンズを用いた赤外線イメージング試験によって，本研究で開発した Si-HDPE 複合レンズの有効性を検証している．

第 6 章は結論であり，本研究で得られた主な成果をまとめるとともに，今後の展望について述べている．

以上要するに，本論文では Si-HDPE 複合レンズのプレス成形に対して重要な基礎データを実験的に取得している．そして，赤外線光学システム用薄型複合レンズの構造設計を行い，それを製造するための高精度成形技術を開発している．さらに，製作した複合レンズの赤外線光学特性を暗視画像と熱画像の両面から評価し，その有効性を明らかにしている．これらの知見は，生産加工学および応用光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4733号 | 氏　名 | 伊藤　幸太 |
|---|---|---|---|

主 論 文 題 目 ：

床面との接触によるヒト足部の3次元変形動態

ヒトの足部は，多数の骨，筋，靭帯から構成される複雑な筋骨格構造体であり，床面との力学的相互作用により機能的に変形し，安定かつ効率的な二足歩行の生成に寄与していると考えられている．しかし，ヒトの足部を構成する骨と軟組織が，床面との力学的相互作用によってどのように運動・変形するのかについては，計測の困難さゆえ現在のところ十分明らかになっていない．そこで本研究では，2方向X線透視システムを用いた3次元骨格動態計測と，ハイスピードカメラと画像相関法を用いた3次元体表面動態計測を通して，ヒト足部の3次元変形動態を明らかにすることを目的とした.

第1章では，本研究の背景と目的を述べた.

第2章では，2方向X線透視システムとモデルマッチング手法を用いた足部3次元骨格運動の計測手法を構築した．具体的に，CT断層画像に基づいて構築した3次元形状モデルを，輪郭の一致度が最大となるようにX線透視画像にマッチングし，歩行中の足部骨の3次元運動を計測する手法を提案した．歩行中の足部骨運動を計測する上で十分な精度を有していることを確認し，屍体足部の運動計測に本手法を適用してその有効性を示した.

第3章では，提案手法を用いて屍体足部に鉛直圧縮荷重を負荷したときの骨運動を計測し，床面との力学的相互作用による足部の生得的な変形特性を計測した．その結果，荷重下の足部において踵骨の外反とともに距骨は内転し，中足骨は外転することを明らかにした．このような骨格運動は，歩行時の身体鉛直軸まわりに作用するモーメントを打ち消す役割があると考えられ，ヒト足部構造の二足歩行適応の一端を明らかにした.

第4章では，歩行中の足部表面の詳細な変形動態を明らかにするために，ハイスピードカメラとデジタル画像相関法を用いた足部3次元主ひずみ分布の計測手法を構築した．デジタル画像相関法を運動中の足部に適用することで，力学的相互作用時の足部体表面変形および皮膚伸縮量を，非接触かつ高分解能で定量化できることを示した.

第5章では，提案手法を用いてヒト歩行時の足部体表面の3次元変形動態を計測し，世界に先駆けてその詳細を明らかにした．また，本手法が足部疾患の発症メカニズムの解明や早期診断に有効である可能性を示した.

第6章では，本研究で提案した2つの足部計測手法を用いて，屍体足荷重時の骨格運動と体表面動態の同時計測を試みた．その結果，足部の変形や表面伸縮は，基本的にはその内部に存在する骨の運動を反映することを明らかにした.

第7章では，各章で得られた足部変形動態に関する知見を整理し，その機能的意味を考察した．また今後の課題と展望を述べた.

第8章では，本論文の結論をまとめた.

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第 4733 号 | 氏　名 | 伊藤　幸太 |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 荻原　直道 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 大宮　正毅 |
| | | 慶應義塾大学准教授 | 博士（工学） | 竹村　研治郎 |
| | | 慶應義塾大学特任准教授 | 博士（医学） | 名倉　武雄 |

学士（工学），修士（工学），伊藤幸太君提出の学位請求論文は「床面との接触によるヒト足部の 3 次元変形動態」と題し，本論 8 章により構成されている．

ヒトの足部は，多数の骨，筋，靭帯から構成される複雑な筋骨格構造体であり，床面との力学的相互作用により機能的に変形し，安定かつ効率的な二足歩行の生成に寄与していると考えられている．しかし，ヒトの足部を構成する骨と軟組織が，床面との力学的相互作用によってどのように運動・変形するのかについては，計測の困難さゆえ現在のところ十分明らかになっていない．本論文は，二方向 X 線透視システムを用いた 3 次元骨格動態計測と，ハイスピードカメラと画像相関法を用いた 3 次元体表面動態計測を通して，ヒト足部の 3 次元変形動態を明らかにすることを目的としている．各章の内容は以下の通りである．

第 1 章は序論であり，研究の背景，関連研究の動向をまとめ本研究の目的を述べている．

第 2 章では，二方向 X 線透視システムとモデルマッチング手法を用いた足部 3 次元骨格運動の計測手法を構築している．具体的に，CT 断層画像に基づいて構築した 3 次元形状モデルを，輪郭の一致度が最大となるように X 線透視画像にマッチングし，歩行中の足部骨の 3 次元運動を計測する手法を提案している．本手法が，歩行中の足部骨運動を計測する上で十分な精度を有していることを確認し，屍体足部の運動計測に本手法を適用して，その有効性を示している．

第 3 章では，提案手法を用いて屍体足部に鉛直圧縮荷重を負荷したときの骨運動を計測し，床面との接触による足部の生得的な変形特性の解明を試みている．具体的には，荷重下の足部において踵骨の外反とともに距骨は内転し，中足骨は外転することを明らかにした．このような骨格運動は，歩行時の身体鉛直軸まわりに作用するモーメントを打ち消す作用があると考えられ，ヒト足部構造の二足歩行適応の一端を明らかにしている．

第 4 章では，歩行中の足部表面の詳細な変形動態を明らかにするために，ハイスピードカメラとデジタル画像相関法を用いた足部 3 次元主ひずみ分布の計測手法を構築している．デジタル画像相関法を運動中の足部に適用することで，力学的相互作用時の足部体表面変形および皮膚伸縮量を，非接触かつ高分解能で定量化できることを示している．

第 5 章では，提案手法を用いてヒト歩行時の足部体表面を計測し，世界に先駆けてその 3 次元変形動態の詳細を明らかにしている．また，本手法が足部疾患の発症メカニズムの解明や早期診断に応用可能であることが示されている．

第 6 章では，本研究で提案した 2 つの足部計測手法を用いて，屍体足荷重時の骨格運動と体表面動態の同時計測を試みている．その結果，足部の変形や表面伸縮は，その内部に存在する骨の運動を基本的には反映することを明らかにしている．

第 7 章は総合考察であり，各章で得られた足部変形動態に関する知見を整理し，足部構造の機能的意味を考察している．また今後の課題と展望を述べている．

第 8 章は結論であり，本論文の結果の総括を述べている．

以上のように，本論文は，床面との接触によるヒト足部の 3 次元変形動態を，提案手法を用いて詳細に明らかにしたものであり，ヒトの二足歩行と足部機能に関わる医工学分野において，工学上寄与するところが少なくない．また，こうした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な高度な研究能力および豊かな学識を有することを証したものと言える．

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．

# 内容の要旨

| 報告番号 | 甲　第4734号 | 氏　名 | 安藤　大佑 |
|---|---|---|---|

主 論 文 題 名 ：

A Study on High Throughput Large File Sharing System for a Global Environment and its Applications
（広域環境における大容量ファイルの高速共有システムとその応用に関する研究）

マルチメディアデバイスの発展とネットワーク・クラウド技術の発展に伴い、Full HD や UHD といった高精細映像コンテンツを誰でも簡単に作成できるようになってきた。しかしながら、現在においても、インターネットを利用して大容量ファイルを低ストレージコストかつ高速に世界規模で共有することは難しい。本論文では、高速かつ低コストな大容量ファイル共有を世界規模で実現する Content Espresso の設計・実装および Content Espresso を利用した二つの応用事例を示す。

１章では本論文の背景として、高精細映像を取り扱うデジタルコンテンツ制作業界の一般的な制作ワークフローを例に示しながら本論文が想定する環境における大容量ファイルの高速共有の難しさについて述べ、さらに本論文の貢献と本論文の構成について言及している。

２章では Content Espresso の設計について言及している。Content Espresso の基本的なメカニズムは 1) FEC を利用してあらかじめファイルに冗長データを付与する、2) ファイルと冗長データをそれぞれチャンクに分割し、分散設置されている Chunk Server へ保存する、3) ファイル取得の際は、保存されている全てのチャンクを UDP で直接クライアントに送信する、4) Chunk Server の故障やチャンク伝送中のパケットロス等でクライアントが受信できなかったチャンクは、FEC を利用してクライアント側で回復することである。この基本メカニズムを元に Content Espresso は設計されており、Content Espresso が Client、File Manager、Storage Allocator、Chunk Generator、Cluster Head、Chunk Server から構成されていることを述べている。

３章では Content Espresso の実装について言及している。Content Espresso のそれぞれのモジュールの動作について図を示しながら詳細に言及している。また、Content Espresso の要となる Chunk Generator における FEC 付加の処理及び Client におけるチャンクの受信と FEC による消失パケットの回復処理についてはスレッド構造を示しより詳細に言及している。

４章では Content Espresso の評価について言及している。Chunk Server 72 台を含む 79 台の実機を利用した計測環境を準備し、ネットワーク遅延やパケットロスがある世界規模のネットワークを想定した環境において、ファイル取得が高速に実現出来ることを示し、また、同様の条件下で生じるファイル書き込みの所要時間変化や、システムの可用性評価、メタデータサーバへの同時アクセス数の評価などを実施し、Content Espresso が広域環境で高速にファイル共有ができることを示している。

５章では Content Espresso の応用事例の一つ目として非圧縮 UHD 映像受信再生システム Demitasse の設計と実装について言及している。Demitasse を利用する事でフレーム分割され Content Espresso に保存された非圧縮 UHD 映像ファイルをクライアント側で取得しながら 30fps で再生可能であることを示している。

６章では二つ目の Content Espresso の応用事例として、遠隔コラボレーションシステム SAGE2 におけるファイル共有性能向上に言及している。Content Espresso を SAGE2 のファイル共有用ストレージとして組み込むことで、RTT が 10ms 以上の遠隔コラボレーション環境においてファイル共有性能を向上させることに成功したことに言及している。

７章では Content Espresso に関する関連研究を提示し、Content Espresso と他研究との関連性について、通信プロトコル、ストレージシステムの両方の点から論じ、Content Espresso の位置づけを明確なものとしている。加えて、Content Espresso が利用している FEC 符号の関連研究とパケット損失モデルの関連研究にも言及している。

最後に８章で本論文のまとめを述べ、さらに、本研究の今後の展開について述べている。

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第 4734 号 | 氏　名 | 安藤　大佑 |
|---|---|---|---|

| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学専任講師 | 博士(情報理工学) | 金子　晋丈 |
|---|---|---|---|---|
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 博士(工学) | 寺岡　文男 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士(工学) | 西　　宏章 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士(理学) | 河野　健二 |
| | | ハワイ大学マノア校教授 | Ph.D. | Leigh, Jason |
| | | 東京大学教授 | 工学博士 | 工藤　知宏 |

学士 (工学) , 修士 (工学) 安藤大佑君の学位請求論文は,「A Study on High Throughput Large File Sharing System for a Global Environment and its Applications（広域環境における大容量ファイルの高速共有システムとその応用に関する研究）」と題し，全 8 章から構成される.

近年, マルチメディアデバイスとネットワーク・クラウド技術の発展に伴い Full High Definition 映像 や Ultra High Definition (UHD) 映像といった高精細映像コンテンツを誰でも簡単に作成できるようになってきた．しかしながら現在においても，インターネットを利用してこのような大容量ファイルを低ストレージコストかつ高速に世界規模で共有することは難しい．本論文では，大容量ファイル共有を世界規模で高速かつ低コストに実現する Content Espresso の設計，実装，評価および Content Espresso の二つの応用事例を示している．本論文は以下のように構成される.

第１章では本論文の序論として，高精細映像を取り扱うデジタルコンテンツ制作業界の一般的な制作ワークフローを例に示しながら本論文が想定する環境における大容量ファイルの高速共有の難しさと本論文の概要を説明している.

第２章では Content Espresso の設計について言及している．Content Espresso の基本的なメカニズムは 1) 誤り訂正符号を利用してあらかじめファイルに冗長データを付与, 2) ファイルと冗長データをそれぞれチャンクに分割し，分散設置されている Chunk Server へ保存，3) ファイル取得の際は，保存されている全てのチャンクを UDP で直接クライアントに送信, 4) Chunk Server の故障やチャンク伝送中のパケットロス等でクライアントが受信できなかったチャンクは，誤り訂正符号を利用してクライアント側で回復することである．この基本メカニズムを元に Content Espresso は設計されており，Content Espresso が Client，File Manager，Storage Allocator，Chunk Generator，Cluster Head，Chunk Server から構成されていることを述べている.

第３章では Content Espresso の実装について各構成モジュールの動作について詳細に言及している.

第４章では Content Espresso の評価について言及している．Chunk Server 72 台を含む 79 台の実機を利用した計測環境を準備し，ネットワーク遅延やパケットロスがある世界規模のネットワークを想定した環境において，ファイル取得が高速に実現出来ることを示し，Content Espresso が広域環境で高速にファイル共有ができることを示している.

第５章では Content Espresso の応用事例の一つ目として非圧縮高精細映像受信再生システム Demitasse の設計と実装について言及し，非圧縮 UHD 映像ファイルをクライアント側で取得しながら 30fps で再生可能であることを示している.

第６章では二つ目の Content Espresso の応用事例として，遠隔コラボレーションシステム SAGE2 に Content Espresso をファイル共有用ストレージとして組み込み、ファイル共有性能を向上させることを示している.

第７章では Content Espresso の関連研究を提示し，通信プロトコル，ストレージシステムの両方の点から論じ，Content Espresso の位置づけを明確なものとしている.

最後に第 8 章は本論文の結論であり，本研究の今後の展開について述べている.

以上要するに, 本論文は大容量ファイルの共有を世界規模で高速かつ低コストに実施する手法とその応用事例を提示している．これらの研究内容は、肥大化するデジタルデータの世界規模の共有を実現する上で，工学上・工業上寄与するところが少なくない.

よって，本論文の著者は博士(工学)の学位を受ける資格があるものと認める.

# 内容の要旨

| 報告番号 | 甲　第4735号 | 氏　名 | 綱島　昇 |
|---|---|---|---|

主論文題名：

Coupling of Motion Components and Environmental Adaptation
for Multi-Degree-of-Freedom Motion Reproduction
（多自由度動作再現のための動作要素の結合と環境適応）


人口の減少などにより組立、製造工程などへのロボット制御技術の適用が望まれており、軌道のみならず力加減を含む動作を保存・再現可能な技術として位置／力ハイブリッド制御に基づく手法が提案されている。しかしながら従来研究の多くが単純な動作を対象としており、実用化のためには保存動作を用いてより複雑な動作を再現する能力を有する必要がある。本論文では多自由度動作の再現において適応性を向上させるため、複数の動作の結合再現手法および保存時と再現時の環境の違いを補償するための手法を提案した。

第1章では、本論文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、多自由度システムを用いて動作を扱う際の座標変換について述べた。モータ空間において動作情報を扱うことは、再現できるデバイスが限定されることにつながるため、汎用的に人間の動作を扱うという観点からは望ましいとは言えない。本章ではまず一般的な作業空間で動作を保存、再現することが可能であることを述べた。さらに、人間の動作を扱うため、デバイスの関節座標における情報を人間の構造に基づく情報に変換して保存再現する方法について述べ、人間の動作の種類に基づく情報に変換して保存再現する方法について述べた。デバイスから得られた情報を動作軸に変換することで、それぞれの動作軸に適した再現が可能になることを明らかにした。

第3章において、別々に保存された2つの動作を時系列において結合して再現する方法を提案した。相対的な情報で表される動作情報を滑らかに結合することで、2つの動作間の非連続な挙動が回避できることを確認した。本論文では、保存動作を扱う情報として、位置・力を用いた場合、ならびに加速度参照値を用いた場合における結合再現方法をそれぞれ提案した。

第4章では環境差分に対する再現方法を提案した。従来の動作再現制御は保存時と異なる環境において保存動作の忠実な再現が困難になることが知られている。本章では動作軸において環境位置が異なる場合および操作対象物が異なる場合の2つの条件において再現方法をそれぞれ提案した。それぞれの動作軸ごとに必要な制御を適用することで、デバイスー動作対象物間の差異および動作対象物ー外部環境間の差異に対して適応できることを明らかにした。ペグ・イン・ホール作業に適用し、異なる環境を用いた際にも保存時と同じタスクが再現されることを確認した。

第5章では、前章までに述べた手法を組み合わせることにより、複合タスクの再現が行えることを示した。あらかじめ複数の動作を保存し、再現時に環境差異によって動作を切り替えることで、環境に合わせた動作を再現することが可能になる。その際、本論文で提案する動作軸に基づいた動作結合手法が効果的であることを確認した。

第6章では、本論文を要約し、展望とともに結論を述べた。

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第 4735 号 | 氏　名 | 綱島　昇 |
| --- | --- | --- | --- |

| | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学准教授 | 博士（工学） | 桂　誠一郎 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 大森　浩充 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 村上　俊之 |
| | | 慶應義塾大学准教授 | 博士（工学） | 杉本　麻樹 |

学士（工学），修士（工学）綱島昇君提出の学位請求論文は「Coupling of Motion Components and Environmental Adaptation for Multi-Degree-of-Freedom Motion Reproduction」（多自由度動作再現のための動作要素の結合と環境適応）と題し，6 章から構成されている．

ロボットによる人間の動作の再現は，超高齢社会における製造分野の人手不足の解決のみならず，ものづくりのさらなる高度化にあたって実用性の向上が期待されている．人間の動作には速度情報のみならず，力情報も含まれているため，その再現を目的として，これまでに位置／力ハイブリッド制御に基づいた手法が提案されてきた．しかしながら，従来手法の多くが少ない自由度による単純な動作を対象としたもの，あるいは，動作保存時と再現時の環境が同一であるという条件下でのみ成立するものであったため，多自由度機構へ拡張した際の制御系設計論や環境適応性の獲得が必要とされていた．本論文では上記に鑑み，多自由度動作再現のための複数動作要素の結合再現手法ならびに動作保存時と異なる環境へ適応するための補償法を提案している．

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，多自由度デバイスを使用して人間の動作を保存・再現するための制御構造について定義している．使用するデバイスによらず汎用性の高い動作再現を行うため，デバイスの関節空間から作業空間への座標変換に加えて，動作の種類に基づいた機能モード空間への座標変換を階層的に構成した位置／力ハイブリッド制御の構造について示している．本制御構造を採用することにより，動作の機能要素ごとに適した再現制御法を選択し，動作全体で統合設計が可能になることを明らかにしている．

第 3 章では，複数の保存動作を時系列で結合して再現するための制御手法の提案を行っている．本章では結合の際の動作の連続性を考慮し，位置および力の双方を補間するフィードバック型ならびに加速度参照値を用いたフィードフォワード型の 2 種類の制御構成が可能になることを示し，それぞれの性能について評価している．

第 4 章では，動作保存時と再現時の環境の違いを補償するための適応手法について提案している．本章では，ペグ・イン・ホール作業を例として，把持対象物の重量が変化する場合ならびに初期位置が変化する場合のそれぞれについて再現手法を示している．具体的には，動作の機能要素ごとに第 3 章で示したフィードバック型，フィードフォワード型の制御を選択的に統合することで，デバイス－把持対象物間の差異および把持対象物－外部環境間の差異に対して適応できることを実験的に明らかにしている．

第 5 章では，前章までに示した手法を統合し，複合化された作業の再現手法を提案している．あらかじめ複数の動作を保存しておき，環境の差異に応じて再現データを切り替えることで，所望の作業の遂行が可能になることを実験により示している．このように，複数動作要素の結合再現と環境適応の双方において，本論文で提案する機能要素ごとの再現制御構造が効果的であ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，本論文では多自由度動作の再現における複数動作の結合ならびに環境適応のための制御構造を提案するとともに，理論と実験の双方からその有効性を実証しており，モーションコントロール分野において，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4736号 | 氏　名 | 天神林　瑞樹 |
|---|---|---|---|

主 論 文 題 目 ：

Development of Biomimetic Functional Materials by Wettability Control

(バイオミメティクスによる材料の濡れ性制御と高機能化に関する研究)

近年の分子科学・ナノサイエンスの急速な発展に伴い，自然界の優れた機能から着想を得る「バイオミメティクス」による材料・システム設計が注目を集めている．特に蓮の葉の撥水性に代表される生体機能から着想を得た濡れ性制御技術は，その汎用的な特性から工業・医療材料を初めとした幅広い分野への応用展開が期待されている．つまり本技術の課題は，生体機能を再現する手法の新規提案，及び機械耐久性や透明性などの応用先に合わせた機能性の付与である．

そこで本研究では，バイオミメティクスに基づく濡れ性制御技術を用いることで，生体機能を再現した材料の設計手法を新規提案した．さらに機能材料の濡れ特性を活かして防汚コーティング材，油水分離材，バイオセンサ，マイクロ流体デバイスの高機能化に着手した．

第1章では，バイオミメティクスによる機能性材料の背景を概説した．

第 2 章では，蓮の葉の表面構造の模倣による撥水性薄膜材料の設計手法を検討した．まず，工業的な用途に向けて撥水表面の課題である機械耐久性の改善手法を，撥水性ナノ粒子・接着樹脂による複合構造を用いて検討した．その結果，ナノ粒子と樹脂層による階層構造が，50 kPa の圧力下での摩耗に対して撥水性を維持することを見出している．次に，医療用途に向けた撥水性センサ材料の設計手法を考案している．

第 3 章では，水と油に対して選択的な濡れ性を有する撥水・親油性コーティング材料の設計手法を検討した．本技術は支持体の表面化学修飾による油水分離技術への応用が期待されているが，支持体の選択性や大面積製造に課題が存在する．そこでタイリクウズグモの巣が帯電して捕虫する特性から着想を得ることで，様々な支持体に対して化学修飾に依存することなく，貼り付け可能な撥水親油性自立シートを設計した．さらに撥水親油性自立シートを用いることで，ガソリンを含む 5 種の油と水の混合液に対して 99%以上の効率で分離することを可能とした．

第4章では，新規防汚表面として撥水液体保持平坦表面(SPLASH: Surface with π interaction Liquid adsorption, Smoothness, and Hydrophobicity)を開発した．SPLASH はウツボカズラの捕食器から着想を得た防汚表面技術を更に発展させたものである．ウツボカズラは内壁に潤滑液を分泌させることで餌を消化器に滑落させる特性があり，撥水性液体を表面に導入することで，水滴が滑落するコーティング材料の開発が可能である．従来は，多孔質表面を作製することで毛管力を利用して液膜保持を行っていたが，SPLASH は平坦表面に対して π 電子相互作用によって液膜保持を可能とした．SPLASH は滑落性能・機械耐久性に関して従来技術への優位性を示した．

第 5 章では，サボテンのとげの異方的な濡れ特性から着想を得た液体輸送表面の設計方法を検討した．サボテンのとげ上では，水滴はとげの先端から表皮に向かって一方向の移動を示す．そこで液体の付着力の異なる撥水パターニング表面を設計することにより，液体が設計した方向に輸送されるコーティング材を開発した．さらに本技術を用いて液体が付着残りを示すことなく輸送可能なマイクロ流体デバイスを構築した．

第6章では，本研究の成果を総括し，バイオミメティクスによる機能材料の展望について述べた．

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第 4736 号 | 氏　名 | 天神林　瑞樹 |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学教授 | 博士(工学) | 白鳥　世明 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | Dr. sc. nat. | チッテリオ　ダニエル |
| | | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 今井　宏明 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 朝倉　浩一 |

学士 (工学)，修士 (工学) 天神林瑞樹君提出の学位請求論文は「Development of Biomimetic Functional Materials by Wettability Control」(バイオミメティクスによる材料の濡れ性制御と高機能化に関する研究)と題し，6 章から構成されている．

近年の分子科学・ナノサイエンスの急速な発展に伴い，自然界の優れた機能から着想を得る「バイオミメティクス」による材料・システム設計が注目を集めている．特に蓮の葉の撥水性に代表される生体機能から着想を得た濡れ性制御技術は，その汎用的な特性から工業・医療材料を初めとした幅広い分野への応用展開が期待されている．つまり本技術の課題は，生体機能を再現する手法の新規提案，および耐摩耗性や透明性などの実用化に向けた機能性の付与である．

そこで本研究では，バイオミメティクスに基づく濡れ性制御技術を用いることで，生体機能を再現した材料の設計手法を新規提案している．さらに機能材料の濡れ特性を活かして防汚コーティング材，油水分離材，バイオセンサ，マイクロ流体デバイスの高機能化に着手している．

第 1 章では，バイオミメティクスによる機能性材料の背景を概説している．

第 2 章では，蓮の葉の表面構造の模倣による撥水性薄膜材料の設計手法を検討している．まず，工業的な用途に向けて撥水表面の課題である耐摩耗性の改善手法を，撥水性ナノ粒子・接着樹脂による複合構造を用いて検討している．その結果，ナノ粒子と樹脂層による階層構造が，50 kPa の圧力下での摩耗に対して撥水性を維持することを見出している．次に，医療用途に向けた撥水性センサ材料の設計手法を考案している．

第 3 章では，水と油に対して選択的な濡れ性を有する撥水・親油性コーティング材料の設計手法を検討している．本技術は支持体の表面化学修飾による油水分離技術への応用が期待されているが，支持体の選択性や大面積製造に課題が存在する．そこでタイリクウズグモの巣が帯電する特性から着想を得ることで，様々な支持体に対して化学修飾に依存することなく，貼り付け可能な撥水親油性自立シートを設計している．

第 4 章では，新規防汚表面として撥水液体保持平坦表面(SPLASH: Surface with π interaction liquid adsorption, smoothness, and hydrophobicity)を開発している．SPLASH はウツボカズラの捕食器から着想を得た防汚表面技術を更に発展させたものである．ウツボカズラは内壁に潤滑液を分泌させることで餌を消化器に滑落させる特性があり，撥水性液体を表面に導入することで，水滴が滑落するコーティング材料の開発が可能である．従来は，多孔質表面を作製することで毛管力を利用して液膜保持を行っていたが，SPLASH は平坦表面に対して π 電子相互作用によって液膜を保持することができる．SPLASH は滑落性能・機械耐久性に関して従来技術への優位性を示している．

第 5 章では，サボテンのとげの異方的な濡れ特性から着想を得た液体輸送表面の設計方法を検討している．サボテンのとげ上では，水滴はとげの先端から表皮に向かって一方向の移動を示す．そこで液体の付着力の異なる撥水パターニング表面を設計することにより，液体が設計した方向に輸送されるコーティング材を開発している．さらに本技術を用いて液体が付着残りを示すことなく輸送可能なマイクロ流体デバイスを構築している．

第 6 章では，本研究の成果を総括しバイオミメティクス機能材料の展望について述べている．

以上要するに，本論文は自然界が持つ様々な機能特性を模倣し，材料の濡れ性制御及び機能付与を行うことで，高機能性材料への応用を提案している．これらの技術と知見は，機能性材料の技術革新に繋がり，さらに本論文で見出した濡れ性制御技術による機能性材料は，工業分野の発展に大きく貢献するものである．したがって，本論文は材料科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4737 号 | 氏　名 | 島田　明男 |
|---|---|---|---|

主 論 文 題 名 ：

メニーコア環境におけるノード内通信の高速化および効率化を実現するタスクモデルの研究

近年，電力効率の観点から，コア単体の処理性能を向上させるよりも，コア数を増加させる CPU アーキテクチャが一般的になっており，High-performance Computing (HPC) システムを構成するノード 1 台あたりのコア数は飛躍的に増加してきている．一方，1 コアあたりのメモリ量は減少する傾向にある．このようなメニーコア環境では，同一ノード内で動作する並列プロセスの数が従来のマルチコア環境よりも増加する．よって，ノード内通信（同一ノード内の並列プロセス間の通信）の発生回数が，従来よりも多くなる．ノード内通信の性能が，並列アプリケーションの性能に従来よりも大きな影響を与えることになり，より高速なノード内通信が求められる．また，1 コアあたりのメモリ量は減少する傾向にあるため，ノード内通信に掛かるメモリ消費量の低減も求められる．しかし，従来のマルチコア環境向けのノード内通信では，並列プロセスのアドレス空間をまたいでデータ転送するために，通信遅延の増加やノード内通信に掛かるメモリ消費量の増加をまねいてしまう問題がある．

そこで, 本論文は, メニーコア環境において高速かつ効率的なノード内通信を実現するため, Partitioned Virtual Address Space (PVAS) と呼ぶ新たなタスクモデルを提案する．PVAS タスクモデルは, 並列処理をおこなうノード内の並列プロセス群を同一アドレス空間で動作させることを可能にする．並列プロセスを同一アドレス空間で動作させることで，アドレス空間をまたいでデータ転送することなく，ノード内通信を実行することが可能になり，高速かつメモリ消費量の少ないメニーコア環境向けのノード内通信を実現することができる．PVAS タスクモデルを Linux カーネルのメモリ管理を対象に実装した.

本論文では，PVAS タスクモデルを Message Passing Interface (MPI) の通信に適用し，PVAS タスクモデルの検証をおこなう．PVAS タスクモデルを MPI 通信に適用し，高速かつメモリ消費量の少ない，よりメニーコア環境に適した MPI ノード内通信を実現する．PVAS の適用は，MPI における連続データの送受信と不連続データの送受信を対象にしておこなう．実装は，MPI の Open Source Software (OSS) 実装の一つである Open MPI に，PVAS を利用するメニーコア環境向けのノード内通信モジュールを組み込むことでおこなう．これを，マイクロベンチマークとミニアプリケーションにより評価し，マルチコア環境向けの MPI ノード内通信モジュールを用いた場合と比較する．マイクロベンチマークによる評価では，連続データの送受信において，通信遅延が大きく改善することを示す．また，不連続データの送受信においても，小さなデータが多数不連続にメモリ上に配置される通信パターンを除き，通信遅延が大きく改善することを示す．連続データを送受信するミニアプリケーションによる評価では，最大で約 18%，実行性能が改善することを示す．不連続データを送受信するミニアプリケーションによる評価では，最大で約 21%，実行性能が改善することを示す．また，マイクロベンチマークによって MPI ノード内通信のメモリ消費量を測定し，最大で約 18%，メモリ消費量を削減可能であることを示す．これらの評価により，本論文で提案する PVAS タスクモデルによって，メニーコア環境において高速かつ効率的なノード内通信を実現可能であることを示す.

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第 4737 号 | 氏　名 | 島田　明男 |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学教授 | 博士（理学） | 河野　健二 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 寺岡　文男 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 山﨑　信行 |
| | | 九州大学教授 | 博士（工学） | 井上　弘士 |

学士（工学）、修士（工学）島田明男君提出の学位請求論文は、「メニーコア環境におけるノード内通信の高速化および効率化を実現するタスクモデルの研究」と題し、全 8 章で構成されている。

近年の HPC (High-Performance Computing) システムでは、メニーコアプロセッサの活用が進んでおり、ノード 1 台あたりのコア数が増加する傾向にある。一方でコアあたりのメモリ量は減少する傾向にあり、高い並列処理性能と低いメモリ消費量の両立が求められる。メニーコアプロセッサを採用するシステムでは、ノード 1 台あたりの並列プロセス数増加に伴い、アプリケーションの実行中に発生するノード内通信の回数が増加する。よって、ノード内通信の高速化とメモリ消費量低減が大きな課題となる。しかし、既存のノード内通信の方式では、アドレス空間をまたいだデータ転送を行うために、ノード内通信の通信遅延増加とメモリ消費量の増加を招いてしまう。本論文では、ノード上の並列プロセスを同一アドレス空間で動作させることで、ノード内通信の高速化およびメモリ消費量の低減を実現するタスクモデル「Partitioned Virtual Address Space (PVAS)」を提案している。また、PVAS によるノード内通信を、広く用いられている並列化モデル「Message Passing Interface (MPI) 」の通信に適用し、評価することで、有用性の検証を行っている。

第 1 章では、近年の HPC システムの動向とノード内通信の高速化およびメモリ消費量低減の必要性について論じ、本研究の提案と目標、論文の構成について述べている。

第 2 章では、既存方式と関連研究について述べている。既存方式の問題点が、アドレス空間をまたいだデータ転送に起因することを示している。また、関連研究と本論文の提案を比較し、研究の立ち位置を明確にしている。

第 3 章では、本研究で提案する新たなタスクモデルである PVAS の概要と設計について述べている。同一アドレス空間で並列プロセスを動作させることで、高速かつメモリ消費量が小さいノード内通信を実現可能としている。また、単一アドレス空間を分割し、並列プロセスで共有する手法について説明している。

第 4 章では、PVAS を Linux カーネルに実装する方法について述べている。

第 5 章では、MPI の概要と、PVAS を適用した MPI ノード内通信の実装について述べている。MPI には、連続データの送受信と不連続データの送受信があり、PVAS によるノード内通信を双方に適用する実装を示している。

第 6 章では、PVAS を適用した MPI ノード内通信と共有メモリを用いる既存の MPI ノード内通信をマイクロベンチマークとミニアプリケーションによって比較した結果について述べている。PVAS によって MPI ノード内通信を高速化し、連続データの送受信を実行するミニアプリケーションにおいては最大で約 18%、不連続データの送受信を実行するミニアプリケーションにおいては最大で約 21%、実行性能が向上している。また、マイクロベンチマークによる評価では、最大で約 18%のメモリ消費量低減を実現しており、PVAS の有用性を示している。

第 7 章では、研究に関する考察を述べている。

第 8 章では、本論文をまとめており、研究の成果が今後の HPC システムで有効に活用されることが期待できると結論付けている。さらに、研究の今後の展望について述べている。

以上、本論文は多コア化が進む HPC システムにおいて高い並列処理性能と低いメモリ消費量を両立する手法を実現しており、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4738号 | 氏　名 | 真部　研吾 |
|---|---|---|---|

主 論 文 題 目 ：

Development of Functional Slippery Liquid-Infused Porous Surfaces via Layer-by-Layer Method

（交互積層法による機能性滑性液体注入多孔質表面の構築）

　ウツボカズラの表面構造は、防汚表面に新しい着想を与え、滑性液体注入多孔質表面（slippery liquid-infused porous surfaces、SLIPS）として超疎水性表面を構築してきた。SLIPSは疎水性多孔質下地と潤滑油で構成される。その多孔質膜がナノ構造および低表面エネルギーである場合、含浸された潤滑液体がその下地に接着し、不活性な超疎水性表面の形成を可能にする。本研究では、交互積層法（layer-by-layer、LbL）によって機能化された下地層を用いることで、3つの機能性SLIPS、すなわち、高透過率反射防止性SLIPS、キトサン・アルギン酸ナトリウムで構成された生体適合性SLIPS、 温度応答性SLIPSを構築した。これらのSLIPSはそれぞれ、光学的透明性、抗血栓形成性、および調整可能な透過率・濡れ性を示した。この研究の結果は、機能性SLIPSが、革新的な医療機器、太陽電池、光学レンズ、スマートウインドウおよびその他の様々なデバイスの構築に有用であることを示唆する。

　第1章では、本研究の概要を説明した。

　第2章では、LbLとSLIPSに関する先行研究を紹介した。LbLについては、多孔質構造を作るための、LbLの基本事項および、それを応用した事例を説明した。 SLIPSの節では、表面濡れ性に言及した後、SLIPSの概説、および構築基準を説明した。

　第3章では、光学的に強化されたSLIPSを実現した。LbLにより形成された光散乱を減少させる反射防止膜上に潤滑油を滴下することで、それらがSLIPSの光学的作用に与える影響を調査した。

　第4章では、表面濡れ性に関して強化されたSLIPSを構築した。生分解性材料および生体適合性潤滑油を使用し、生体適合性SLIPSを作製した。アルギン酸ナトリウム／ポリビニルピロリドン間の水素結合LbL、およびキトサン／アルギン酸ナトリウム間の静電相互作用LbLを用いて下地を構築し、潤滑油としてアーモンド油を用いたSLIPSは抗血栓性能を示した。

　第5章では、光透過性と表面濡れ性を制御する応答性SLIPSを実現した。SLIPSは高性能のスマート表面の一つとして、高い撥液性を有しながら、切り替え可能な接着性と制御可能な透明性を示している。先行研究では、その制御は段階的な機械的刺激によって行われてきた。しかしながら、これまでのSLIPSは非反応性の潤滑油を用いていたことから、常温常圧下で作用する応答性SLIPSは実現されていなかった。そこで、温度変動に動的に適合することができるSLIPS構築を本章の目的とした。特に、ここでは、室温において水滴運動と光学的透明性を制御可能な温度活性化固化可能/流動パラフィン注入多孔質表面（temperature-activated solidifiable/liquid paraffin-infused porous surfaces、TA-SLIPS）を実現した。

　第6章では、本研究の結論と将来展望を示した。

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第 4738 号 | 氏　名 | 真部　研吾 |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 白鳥　世明 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | Dr. sc. nat. | チッテリオ　ダニエル |
| | | 慶應義塾大学准教授 | 博士（工学） | 石榑　崇明 |
| | | 慶應義塾大学教授 | Ph.D. | 堀田　篤 |

学士 (工学)，修士 (工学) 真部研吾君提出の学位請求論文は「Development of Functional Slippery Liquid-Infused Porous Surfaces via Layer-by-Layer Method」（交互積層法による機能性滑性液体注入多孔質表面の構築）と題し，6 章から構成されている．

近年，生物の優れた機能を模倣するバイオミメティクスが注目を集めており，その中でも特にウツボカズラの表面構造から着想を得た滑性液体注入多孔質表面（slippery liquid-infused porous surfaces，SLIPS）は，あらゆる液体を滑らせる表面として，今後の研究の発展が期待されている．本研究では，交互積層法（layer-by-layer，LbL）によって機能化された多孔質薄膜を用いることで，機能性 SLIPS を構築し，その膜の特性を活かして，医療機器，光学レンズ，スマートウインドウおよびその他の様々なデバイス表面の機能化が可能であることを示すことを目的としている．

第 1 章では，本研究の概要を説明している．

第 2 章では，LbL と SLIPS に関する先行研究を紹介している．LbL については，多孔質構造を作るための，LbL の基本事項および，それを応用した事例を説明している．SLIPS の節では，表面濡れ性に言及した後，SLIPS の概説，および構築基準を説明している．

第 3 章では，光学的に強化された SLIPS を実現している．LbL により形成された光散乱を減少させる反射防止膜上に潤滑油を滴下することで，それらが SLIPS の光学的作用に与える影響を調査している．

第 4 章では，表面濡れ性に関して強化された SLIPS を構築している．生分解性材料および生体適合性潤滑油を使用し，生体適合性 SLIPS を作製している．アルギン酸ナトリウム／ポリビニルピロリドン間の水素結合 LbL，およびキトサン／アルギン酸ナトリウム間の静電相互作用 LbL を用いて下地層を構築し，潤滑油としてアーモンド油を用いた SLIPS は抗血栓性能を示している．

第 5 章では，光透過性と表面濡れ性を制御する応答性 SLIPS を実現した結果について述べている．SLIPS は高性能のスマート表面の一つとして，高い撥液性を有しながら，切り替え可能な接着性と制御可能な透明性を示している．先行研究では，その制御は段階的な機械的刺激によって行われている．しかしながら，これまでの SLIPS は非反応性の潤滑油を用いていたことから，常温常圧下で作用する応答性 SLIPS は実現されていない．そこで，温度変動に動的に適合することができる SLIPS 構築を本章の目的としている．特に，ここでは，室温において水滴運動と光学的透明性を制御可能な温度活性化固化可能/流動パラフィン注入多孔質表面（temperature-activated solidifiable/liquid paraffin-infused porous surfaces，TA-SLIPS）を実現している．

第 6 章では，本論文の結論と将来展望が示され，本論文が今後の材料科学技術発展に寄与することを示唆している．

以上要するに，本論文では LbL による機能性多孔質薄膜を用い，それらを SLIPS に展開することで様々な機能を有する超撥液表面の構築に成功している．したがって，材料科学，表面科学分野の発展において工学上，工業上寄与するところが少なくない．よって，本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める．

# 内容の要旨

| 報告番号 | 甲　第4739号 | 氏　名 | 松永　卓也 |
|---|---|---|---|

主 論 文 題 名 ：

Development of Haptic End-effector for Medicine and Manufacturing

(医療および産業応用を目的としたハプティックエンドエフェクタの開発)

少子高齢化による労働力不足の解消や危険な環境における労働力として、ロボット技術の研究が進められている。人間の上肢は複雑な作業を実現可能であり、ロボットは人間の上肢の動作を実現することで、様々な作業が可能となる。特に、マスタ・スレーブ型の遠隔操作ロボットを応用した多自由度鉗子ロボットは、様々な機構が提案されている。より安全な作業の実現には力触覚技術が必要であるが、力触覚情報伝達装置の多自由度化は容易ではない。本研究では、人間の上肢の動作に対応した自由度を有する力触覚情報伝達装置として5自由度HEM$^2$（Haptic End-effector for Medicine and Manufacturing）を開発し、力覚情報に基づいた作業を実現した。

第1章では、本研究の背景および目的を述べた。遠隔操作ロボットおよび力触覚伝達装置の先行研究について概説した。

第2章では、外乱オブザーバによるロバストな加速度制御に基づいたロボットの動作制御について述べた。

第3章では、力触覚伝達装置のための制御系として、加速度制御に基づく4chバイラテラル制御、斜交座標制御、動作再現システムについて述べた。

第4章では、バックドライバビリティが高い機構を有する2自由度ハプティックロボットについて述べた。リニアモータで構成される2自由度ハプティックロボットのシリアルリンク機構は、多自由度の力触覚伝達装置に有用であり、また、スライダクランク機構を用いたエンドエフェクタは、リンクの寸法を適切に設計することで近似による制御の単純化が可能となることを確認した。

第5章では、軟性内視鏡ロボットへの搭載を目的として開発した小型ハプティック鉗子ロボットについて述べた。高減速比の機構はトルクの伝達効率が低下する原因となるため、出力を力センサで測定して伝達効率を導出し、反力オブザーバの推定値を補正することで推定精度を改善した。

第6章では、遠隔操作および動作再現において、人間の手、手首、腕に対応する動作をおこなう5自由度HEM$^2$について述べた。把持、直動、ロール、ピッチ、ヨー動作で構成される5自由度の動作により、複雑な作業を可能とした。シリアルリンク機構は慣性の増大の影響を受けるため、スライダクランク機構を備えたシリアルリンク機構とパラレルリンク機構および回転機構を並列に駆動する機構を提案し、自由度の増加にともなう力覚情報伝達性能の劣化を抑制した。複雑な作業の一つとして、2組の5自由度HEM$^2$を用いた遠隔操作で結紮を実現し、保存した触覚情報をもとに動作を再現した。

第7章では、本研究の結論を述べた。並列駆動機構を用いた5自由度HEM$^2$は、力触覚技術を応用して人間の手、手首、腕に対応した動作を実現可能であり、医療および産業分野において、より安全な作業の実現が期待される。

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第 4739 号 | 氏　名 | 松永　卓也 |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 大西　公平 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 村上　俊之 |
| | | 慶應義塾大学准教授 | 博士（工学） | 矢向　高弘 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 西　　宏章 |

学士（工学），修士(工学) 松永 卓也 君提出の学位請求論文は「Development of Haptic End-effector for Medicine and Manufacturing」(医療および産業応用を目的としたハプティックエンドエフェクタの開発)と題され，7 章から構成されている．

狭隘な空間で多くの自由度を確保し，精密な遠隔作業を行うロボットの要求が高まっている．特に外科手術支援では臓器の把持や手術糸の結紮などに見られるように，安全でかつ精密な動作が要求される．産業においても，組み立てや治具装着などで同様な要求がある．このような遠隔作業では作業者への力触覚フィードバックが不可欠であり，多自由度のハプティックエンドエフェクタの開発が望まれていた．そのような背景の下，本論文では人間の手首動作を模した力触覚フィードバックのある多自由度エンドエフェクタの開発，医療および産業応用への応用，および人間の作業情報の取得とそのプレイバックよる自動作業に関し，それぞれの開発結果が示されている．

第 1 章では，研究の背景と目的を述べ，従来の研究を概説している．

第 2 章では，ロバストなモーションコントロール下にあるロボットが加速度制御系になっていることをふまえ，運動学に基づく作業座標系の導入を行っている．

第 3 章では，多自由度機構による力触覚フィードバックの実現に大きな役割を果たす斜交座標系と動作データによる自動プレイバックシステムの制御構造と実現方法を示している．

第 4 章では，多自由度における基本要素であるシリアルリンクとスライダクランク機構について運動学解析を行い，設計方法を提案している．これらの基本要素は高いバックドライバビリティを有しており，これらを組み合わせることで力触覚フィードバックのある多自由度エンドエフェクタが簡易に設計できることを明らかにしている．

第 5 章では，バックドライバビリティを損なう高減速機構においても，予め測定した伝達効率を制御系に組み込むことで鮮明な力触覚フィードバックが可能になることを明らかにし，軟性内視鏡ロボットに搭載する外科手術支援小型エンドエフェクタに適用しその有効性を確認している．

第 6 章では，スライダクランクを用いたシリアルリンク機構と並進動作と回転動作を同時に駆動できる新しいパラレル機構とを備えた $HEM^2$（Haptic End-effector for Medicine and Manufacturing）と名付けられたエンドエフェクタを設計製作し，実証実験を行っている．$HEM^2$は人間の上腕を模しており，把持，直動，ロール，ピッチ，ヨーの 5 軸を有する．$HEM^2$を 6 軸の垂直多関節ロボットに搭載し，左右合わせて 22 軸を持つ双腕ロボットを構成する．これを用いた外科医による大動物 *in-vivo* 実験において，脆弱な臓器を損傷せず把持できること，力触覚フィードバックにより過大な力が生体組織に加わらないことを実証している．また，同じ $HEM^2$をはめあい作業やねじ締め作業などにも適用し，産業応用にも展開可能であることを実証している．さらにこれらの動作データを取得することで $HEM^2$による自動プレイバック作業が可能であることを実験的に証明している．

第 7 章は本研究の成果を要約し，今後の展望を述べている．

以上要するに，本論文では力触覚のある多自由度エンドエフェクタを開発し医療および産業応用における精密な遠隔動作や自動プレイバック作業が可能であることを示したもので，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4740号 | 氏　名 | 佐藤　宏亮 |
| --- | --- | --- | --- |

主 論 文 題 名 ：

酸化還元活性な有機結晶と導電性高分子の複合化と電荷貯蔵への応用

機能材料の特性向上には、ナノからマイクロメートルにおける形態制御や複合化が重要である。キノン誘導体(QN)などの酸化還元活性な有機低分子は、省資源かつ高容量な電荷貯蔵への応用が期待されている。しかし、これらの有機低分子の固体結晶は、低導電性と溶解性のために電極活物質としての利用が困難であった。先行研究では、分子設計による導電性の向上やカーボン材料への担持など、分子レベルでの構造と特性の関係が検討されていたものの、ナノメートル以上のスケールでの形態制御が特性におよぼす影響は十分検討されていない。一方、ポリピロール(PPy)などのπ共役高分子は、酸化還元活性と導電性を有しているものの、剛直な主鎖骨格に由来して不溶・不融のため形態制御が容易ではない。本研究では、PPy/QN 複合体の作製とナノからマイクロメートルのスケールにおける形態制御を行い、両成分の活用による高容量電荷貯蔵の実現を目指した。

第 1 章では、本研究の背景と先行研究について概説し、位置づけと目的を述べた。

第 2 章では、階層構造 PPy へ QN を導入することで作製したホスト - ゲスト構造の複合体について述べた。導入された QN は、約 50 nm の PPy ナノ粒子の間隙に存在していた。複合体内で導電性高分子に囲まれた QN は、電解液への溶出が抑制され、充放電反応を観測することができた。

第 3 章では、結晶成長と重合が同時進行することで誘起される相分離によって作製した海-島構造を有する複合体について述べた。相分離によって、約 100 nm の QN 相が約 50 nm の粒子からなる PPy 相に分散した海 - 島構造が得られた。海 - 島構造を有する複合体は、高電流密度においても両成分の充放電反応が観測されるようになり、ホスト - ゲスト構造の複合体よりも電気化学特性が向上した。

第 4 章では、溶解と重合の同時進行による、共連続構造を有する複合体について述べた。厚さ約 1 μm のシートがネットワーク状に連結した構造は、約 200 nm の連結した PPy 粒子の間隙に QN ナノ結晶が複合した構造で構成されていた。このような階層的な構造を有する複合体は、容量、くり返し特性、高速充放電特性のいずれにおいても海 - 島構造複合体よりも優れた電気化学特性を示した。これは、QN を利用した電荷貯蔵に関するこれまでの報告の中で、最も高い容量と高速充放電特性を示す材料の一つであった。

第 5 章では、PPy/QN 複合体作製後の PPy を単離し、PPy の形態と電気化学特性について検討した。ナノ構造とマクロな連続構造を両立することが、特性の向上に有効であることを示した。

第 6 章では、本研究を総括し、有機材料を用いた電荷貯蔵の今後の展望を述べた。

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第4740号 | 氏　名 | 佐藤　宏亮 |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学准教授 | 博士（工学） | 緒明　佑哉 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 今井　宏明 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 白鳥　世明 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 吉岡　直樹 |

学士（工学），修士（工学）佐藤宏亮君提出の学位請求論文は，「酸化還元活性な有機結晶と導電性高分子の複合化と電荷貯蔵への応用」と題し，6章から構成されている．

機能材料の特性向上には，ナノからマイクロメートルスケールにおける形態制御や複合化が重要である．キノン誘導体(QN)などの酸化還元活性な有機低分子は，省資源かつ高容量な電荷貯蔵への応用が期待されている．しかし，これらの有機低分子の固体結晶は，低導電性と溶解性のために電極活物質としての利用が容易ではない．本論文では，導電性高分子であるポリピロール(PPy)とQNの複合体の作製およびナノからマイクロメートルスケールにおける形態制御によって導電性の向上と溶解性の低減を行い，PPyとQN両成分の活用による高容量電荷貯蔵の実現を目指している．

第1章では，本研究の背景となる有機蓄電デバイスの作製に関するこれまでの研究概要と問題点および本論文の目的が述べられている．

第2章では，階層構造PPyへQNを導入することで作製したホスト-ゲスト構造の複合体について述べられている．導入されたQNは，粒径約50 nmのPPyナノ粒子の間隙に存在しており，複合体内で導電性高分子に囲まれることで電解液への溶出が抑制され，安定に充放電反応をおこすことが示されている．

第3章では，結晶成長と重合が同時進行することで誘起される相分離によって作製した海-島構造を有するPPy/QN複合体について述べられている．相分離によって，粒径約100 nmのQN相が粒径約50 nm のPPy相に分散した海-島構造が得られ，高電流密度においても両成分の充放電反応が観測されるようになり，第2章で得られたホスト-ゲスト構造の複合体よりも電気化学特性が向上することが示されている．

第4章では，溶解と重合の同時進行によって作製した共連続構造を有するPPy/QN複合体について述べられている．本手法によって，粒径約200 nmの連結したPPy粒子の間隙にQNナノ結晶が複合した構造が形成され，さらにこの構造は厚さ約1 μmのシートから成るネットワークを形成していることが見出されている．このような階層的な構造を有する複合体は，容量，くり返し特性，高速充放電特性のいずれにおいても第3章で得られた海-島構造複合体よりも優れた電気化学特性を有することが示されている．

第5章では，第2章から第4章で得られたPPy/QN複合体からPPyを単離し，PPyの形態と電気化学特性について検討している．ナノ構造とマクロな連続構造を両立することで，特性の向上が可能であることが見出されている．

第6章では，本研究で得られた知見の総括および既存技術との比較がなされ，有機材料を用いた電荷貯蔵における複合構造や形態の設計指針と今後の展望が述べられている．

以上要するに，本論文では，有機低分子を用いた電荷貯蔵デバイスの作製において，導電性高分子との複合と形態制御を行う新たな材料設計指針を開拓している．これらの知見は，材料化学およびエネルギー関連科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4741号 | 氏　名 | 山田　健太郎 |
|---|---|---|---|

主 論 文 題 名 ：

Paper-Based Analytical Devices with Simplified Signal Detection
for Medical Screening
（医療スクリーニングを目的とした簡易検出型ペーパー分析デバイス）

紙をベースとした分析デバイス（paper-based analytical device: PAD）は、尿検査試験紙や妊娠検査薬を例とし、手頃なコストで簡易的に行う医療検査に実利用されている。近年、デバイス基板である紙に試料溶液の流れ道（マイクロ流路）を設けたPAD（microfluidic PAD: μPAD）が、従来のμTASのように化学操作の自動化や多項目同時分析が行える、新規の分析プラットフォームとして注目を集めている。過去10年、様々な生体物質を測定するμPADの研究開発が世界的に行われてきたが、医療現場での実利用には至っていない。臨床サンプルを用いての実用性評価が不充分であることや、色や発光に基づいた分析結果を使用者に判りやすい形で表示する方法が不足していることが原因である。そこで本研究では、重要な臨床ターゲットとしてタンパク質に焦点を当て、涙液ラクトフェリンと尿アルブミンを目視で簡易的に検出可能な(μ)PADを開発し、臨床サンプルを用いて実用性を示すことを目的とした。

第1章では、紙をベースとした医療診断デバイス開発の歴史と、医療応用を指向したμPADsに関する最新の研究開発および課題について概説した。

第2章では、涙液タンパク質の一種であるラクトフェリンを、蛍光の強さを観測することで測定可能なμPAD開発について述べた。涙液中のラクトフェリン濃度は、ドライアイやシェーグレン症候群など、種々の疾患の指標として知られる。本研究では、蛍光性金属の一種であるテルビウム（$Tb^{3+}$）が、ラクトフェリンと結合して緑色蛍光を発する性質を利用し、抗体を用いることなくラクトフェリンを特異的に検出することに初めて成功した。開発したPADは、既存の分析技術であるELISA法と6%以内の誤差で、健常者涙液に含まれるラクトフェリンを正確に定量できることが分かった。コストは従来の1%以下となり、2.5 μLの試料を一度滴下するのみであるため、所要時間は数時間から15分に短縮された。

第3章では、第2章で開発されたラクトフェリン測定用μPADの定量分析の更なる利便化について述べた。直線状の流路から見られる蛍光の“線の長さ”をシグナルとすることで、アナログ温度計の要領で目盛りから直接ラクトフェリン濃度が測定可能なμPADを開発した。蛍光の強さを数値化するために用いていたカメラや、ソフトウェアによる画像の色解析が不要となり、目視による定量測定が可能となった。眼病患者の検体を含む18種類の涙液サンプルに含まれるラクトフェリン測定結果は、ELISA法と高い相関を示し、実用性の高いヒト涙液ラクトフェリン分析方法を確立した。

第4章では、尿タンパク質（アルブミン）を簡易的に測定する新規方法の提案について述べた。尿アルブミン測定は通常、尿検査試験紙の色変化を色見本と目視比較して行われる。本研究では、尿アルブミン測定結果を表す“文字”が表示されるPADを開発した。健常者の尿サンプルにアルブミンを添加し、複数のユーザーによる読み取りテストを行った結果、市販品の尿検査試験紙と同等の正確性が確認された。色弱のユーザーによる読み取り結果は、開発された文字表示型PADの方が市販の試験紙より正確であり、PAD使用者の幅を広げられる可能性が示唆された。

第5章では、開発されたデバイスの位置付けを、μPADの実用化への展望を交えたうえで述べることで、本研究の成果を要約した。

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第4741号 | 氏　名 | 山田　健太郎 |
| --- | --- | --- | --- |

| | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学教授 | Dr. sc. nat. | チッテリオ　ダニエル |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 白鳥　世明 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 三木　則尚 |
| | | 慶應義塾大学准教授 | 博士（農学） | 奥田　知明 |

学士（工学），修士（工学）山田健太郎君提出の学位請求論文は，「Paper-Based Analytical Devices with Simplified Signal Detection for Medical Screening」（医療スクリーニングを目的とした簡易検出型ペーパー分析デバイス）と題し，5 章より構成されている．

紙を基材とした分析デバイス（paper-based analytical device: PAD）は，尿検査試験紙や妊娠検査薬を例とし，低コストで簡易的な医療検査に利用されている．特に，紙基板に試料溶液の流れ道（マイクロ流路）を設けた PAD（microfluidic PAD: μPAD）は，化学操作の自動化や多項目同時分析が可能なため，近年注目を集めている．過去 10 年，さまざまな生体物質を測定する(μ)PAD の研究開発が世界的に行われてきたが，医療現場での利用にはまだ至っていない．臨床サンプルの複雑な組成の影響評価や，色や発光に基づいた分析結果を判りやすい形で表示する方法の不足が原因である．そこで本論文では，臨床ターゲットとして 2 種類の生体タンパク質を目視で簡易的に検出可能な(μ)PAD の開発と，臨床サンプルへの実用を目的として研究を行っている．

第 1 章では，紙を基材とした医療診断デバイス開発の歴史と，医療応用を指向した(μ)PAD に関する最新の研究開発状況および課題について概説している．

第 2 章では，涙液タンパク質の一種であるラクトフェリンを，蛍光発光の強さを観測することで測定可能なμPAD 開発について述べている．涙液中のラクトフェリン濃度は，ドライアイやシェーグレン症候群など，種々の疾患の指標として知られる．本研究では，蛍光性金属の一種であるテルビウム（$Tb^{3+}$）の緑色蛍光を利用し，抗体を用いることなくラクトフェリンを特異的に検出することに初めて成功している．開発したμPAD は，既存の分析技術である ELISA 法と 6%以内の誤差で，ヒト涙液ラクトフェリン濃度を正確に定量できる．コストは従来の 1%以下となり，2.5 μL の試料を一度滴下するのみであり，所要時間は数時間から 15 分に短縮されている．

第 3 章では，第 2 章で開発されたラクトフェリン測定用μPAD による定量分析の更なる利便化について述べている．蛍光読み取り時の蛍光ラインの長さをシグナルとし，アナログ温度計の要領で目盛りから直接ラクトフェリン濃度が読み取れるμPAD を開発している．蛍光発光の強さを数値化するために用いていたカメラや，ソフトウェアによる画像の色解析が不要となり，目視による定量測定が可能となった．眼病患者を含む様々なヒト涙液サンプルに含まれるラクトフェリン濃度の測定結果は，ELISA 法と高い相関を示し，実用性の高いヒト涙液ラクトフェリン分析方法を確立することに成功している．

第 4 章では，尿アルブミンを簡易的に測定する新規方法の提案について述べている．本研究では，尿アルブミン測定結果を表す数値が文字で表示される PAD を開発しており，市販品の尿検査試験紙と同等の正確性で尿アルブミンを測定することに成功している．特に，色弱のユーザーによる使用結果は，開発された文字表示型 PAD の方が市販品の尿検査試験紙より正確であり，かつ比色分析法を利用する PAD 使用者の利便性向上が図られていることを示していて実用性が高い．

第 5 章では，開発されたデバイスの位置付けを，(μ)PAD の実用化への展望を交えて述べることで，本研究の成果を要約している．

以上要するに，本研究では，簡易的で利便性の高い医療スクリーニング方法の開発に成功している．このような研究は，分析化学や医学分野へ貢献するものであり，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4742号 | 氏　名 | ARIYARIT, Atthaporn |
|---|---|---|---|

主 論 文 題 目 ：

Process Improvement of Thin Film Photovoltaic Devices with Studies on the Effect of Electron Transporting Layer

（薄膜太陽電池の作製プロセス改善と電子輸送効果に関する研究）

　エネルギー資源の枯渇や地球温暖化により、太陽電池の開発に期待が集まっている。太陽電池の普及における大きな課題は、他の発電システムに比べ発電コストが依然として高いことである。変換効率の向上は発電コスト低減化へ向けた、１つの有効なアプローチと考えられている。一般的には、新たな構造の提案やモジュール設計の工夫、新材料の利用による高い変換効率モジュール開発が行われている。

　そこで本研究では、次世代の発電デバイスとして期待されている有機薄膜太陽電池及びペロブスカイト太陽電池における変換効率の向上に取り組んだ。有機薄膜太陽電池の特徴としては、1) 無毒性材料の利用、2) スピンコートやディップコート、スクリーン法などのウェットプロセスによる作製、3) 半透明フレキシブルデバイス化が容易なこと、の３点が挙げられる。また、ペロブスカイト太陽電池の特徴としては、1)低温作製、2) 低コスト材料の利用、3) 高い変換効率、の 3 点が挙げられる。これら２つの太陽電池において $TiO_2$層は優れた電子輸送性能を示す。そこで、本研究においては、これらの太陽電池における $TiO_2$層の作製方法の検討を行い、デバイス評価による最適化を行った。各章の詳細は以下の通りである。

　第 1 章では、太陽電池の歴史と現在までの研究を紹介した。特に、有機薄膜太陽電池及びペロブスカイト太陽電池に着目し、各デバイスの特徴と従来の研究における課題を説明した。

　第 2 章では、無毒性溶液を用いたスプレー交互積層法による、$TiO_2$層の作製方法を報告した。焼成温度の違いによる影響を調査し、有機薄膜太陽電池への電子輸送層として応用できた。

　第 3 章では、有機薄膜太陽電池の基礎的な動作原理と作製方法を紹介した。FTO/$TiO_x$/PCBM:P3HT/PEDOT:PSS/Ag nano-network から成る半透明フレキシブル太陽電池を用いて、$TiO_2$層の膜厚制御による影響を明らかにした。

　第 4 章では、FTO/$SnO_2$/perovskite/Spiro-OMeTAD/Au 構造によるペロブスカイト太陽電池の低温作製を報告した。種々の作製条件においてラテン超方格法　(Latin-Hypercube-Sampling)、Kringing モデル、多目的最適化手法 NSGA-Ⅱを組み合わせた実験計画法を適用し、最適化を行った。その結果、ペロブスカイトの結晶性が発電効率に大きく影響することを明らかにした。

　第 5 章では、常圧下における $cm^2$スケールのペロブスカイト太陽電池の作製を報告した。従来の 2 ステップ法の改善を目指し、ダイナミックスピンウォッシュ法を導入した。この方法では、ペロブスカイト層の表面構造の制御が可能であることを明らかにした。また、第 4 章で紹介した最適化手法により、高密度 $TiO_2$層とメソポーラス $TiO_2$層の最適化を行い、高密度 $TiO_2$層の膜厚だけがフィルファクターに影響することが明らかになった。

　第 6 章では、本研究によって得られた成果を総括し、太陽電池のさらなる技術開発における展望を述べた。

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第 4742 号 | 氏　名 | ARIYARIT, Atthaporn |
|---|---|---|---|

| | | | |
|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学）白鳥　世明 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学）藤原　忍 |
| | | 慶應義塾大学准教授 | 博士（工学）石榑　崇明 |
| | | 慶應義塾大学准教授 | 博士（工学）野田　啓 |
| | | 慶應義塾大学招聘准教授（国際） | 博士（工学）ジロー　フレデリック |

学士（工学）、修士（工学）、ARIYARIT, Atthaporn 君提出の学位請求論文は「Process Improvement of Thin Film Photovoltaic Devices with Studies on the Effect of Electron Transporting Layer」（薄膜太陽電池の作製プロセス改善と電子輸送効果に関する研究）と題し、6 章から構成されている。

エネルギー資源の枯渇や地球温暖化により、太陽電池の開発に期待が集まっている。太陽電池の普及における大きな課題は、他の発電システムに比べ発電コストが依然として高いことである。変換効率の向上は発電コスト低減化へ向けた、1 つの有効なアプローチと考えられている。一方、ウェットプロセスで作製可能でフレキシブルデバイス化が容易な有機薄膜太陽電池や低温作製可能で高い変換効率が得られるペロブスカイト太陽電池が次世代の発電デバイスとして期待されている。また、これら 2 つの太陽電池において酸化チタン($TiO_2$)層は優れた電子輸送性能を示すことが知られている。そこで、本研究では有機薄膜太陽電池及びペロブスカイト太陽電池における変換効率の向上を目的として、これらの太陽電池における $TiO_2$ 層の作製方法の検討を行い、デバイス評価による最適化を行っている。各章の詳細は以下の通りである。

第 1 章では、太陽電池の歴史と現在までの研究を紹介し、特に有機薄膜及びペロブスカイト太陽電池の特徴と従来の研究における課題を説明している。

第 2 章では、無毒性溶液を用いたスプレー交互積層法による、$TiO_2$ 層の作製方法を報告している。焼成温度の違いによる影響を調査し、有機薄膜太陽電池への電子輸送層として応用している。

第 3 章では、有機薄膜太陽電池の基礎的な動作原理と作製方法を紹介している。透明電極/電子輸送層/活性層/ホール輸送層/銀電極 (FTO/$TiO_x$/PCBM:P3HT/PEDOT:PSS/Ag nano-network)構造から成る半透明フレキシブル太陽電池を用いて、$TiO_2$ 層の膜厚制御による影響を明らかにしている。

第 4 章では、透明電極/電子輸送層/活性層/ホール輸送層/金電極 (FTO/$SnO_2$/perovskite/Spiro-OMeTAD/Au) 構造によるペロブスカイト太陽電池の低温作製を報告している。種々の作製条件においてラテン超方格法、クリギングモデル、多目的最適化手法 NSGA-Ⅱを組み合わせた実験計画法を適用し、最適化を行っている。その結果、ペロブスカイトの結晶性が発電効率に大きく影響することを見出している。

第 5 章では、常圧下における $cm^2$ スケールのペロブスカイト太陽電池の作製を報告している。従来の 2 ステップ法の改善を目指し、ダイナミックスピンウォッシュ法を導入している。この方法では、ペロブスカイト層の表面構造を制御することができる。また、第 4 章で紹介した最適化手法により、高密度 $TiO_2$ 層とメソポーラス $TiO_2$ 層の最適化を行い、高密度 $TiO_2$ 層の膜厚だけがフィルファクターに影響することを見出している。

第 6 章では、本研究によって得られた成果を総括し、太陽電池のさらなる技術開発における展望を述べている。

以上要するに、本論文は有機薄膜太陽電池の薄膜作製プロセスの検討ならびペロブスカイト太陽電池の電子輸送層の構造および作製方法における最適化に関して、クリギングモデル、多目的最適化手法 NSGA-Ⅱを組み合わせた実験計画法を適用することの有効性をはじめて示している。したがって、エネルギーデバイス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4743号 | 氏　名 | 松浦　勝也 |
| --- | --- | --- | --- |

主 論 文 題 名 ：

火花点火機関における圧縮自着火の物理的・化学的過程がノックの生起におよぼす影響

火花点火機関は自動車，原動機付２輪車等の動力源として広く用いられるが，二酸化炭素排出量削減の社会的要求から熱効率改善が求められている．火花点火機関の熱効率はノックと呼ばれる異常燃焼によって制約を受け，耐ノック性能の改善は熱効率向上に直結する．この異常燃焼は伝播火炎にて燃焼が完結する前に壁近傍の予混合気が自着火することによって生ずる．つまりノックは燃料と空気の混合，圧縮による昇温などの物理的な過程に加え，化学反応の要素（着火遅れ特性）も併せ持つ．よって耐ノック性能向上のために未燃予混合気の圧縮自着火過程を物理過程，化学反応の両面から把握する必要がある．

本研究は未燃予混合気の温度・圧力履歴の変化が着火遅れにおよぼす影響を明らかにし，得られた知見をエンジン設計に適用し，考案した耐ノック性能向上手法の効果について検証する．

第１章では，過去に行われたノックおよび圧縮自着火に関する研究についてレビューし，本論文の目的とねらい，構成を述べた．

第２章では，燃焼試験装置，実験方法，素反応数値計算で用いる反応および計算モデルについて説明し，圧縮着火試験の実験結果と，計算結果とを比較することで，素反応数値計算の妥当性を検証した．

第３章では，計測期間の筒内圧力の各サイクルの挙動を調査し，ノックの生起・不生起，およびその強度は伝播火炎の燃焼位相によって一意に定まらないが，自着火時の温度・圧力に対するノック強度の依存性は高いことを明らかにした．さらに光学センサを用いることで，ノックの起点位置や定在波の形成過程を捉え，筒内圧力計測によるノック強度評価の妥当性を検証し，自着火位置とノック強度に関係性があることを示した．

第４章では，伝播火炎の熱発生履歴の変化の変数として燃焼開始時期，燃焼期間，燃焼重心を扱い，素反応数値計算により，これらの変数の変化が自着火時刻におよぼす影響について示し，併せて混合気の初期圧力，当量比に対する感度についても解析を行い，ノックを回避し最大出力を得る熱発生履歴について示した．

第５章では，急速圧縮装置を用い，圧縮行程の異なる時刻に燃料を筒内へ噴射することで，燃料が推移する温度・圧力履歴を変化させ，温度・圧力履歴が着火遅れにおよぼす影響を示した．

第６章では，ノック起点のガス流動を適度に強化することで局所的に熱伝達を促進させ，未燃予混合気の昇温の鈍化による着火遅れ時刻の遅延をねらいとするエンジン設計を行い，燃焼試験にてその効果を検証した．

第７章では，本研究の結論を述べた．

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第4743号 | 氏　名 | 松浦　勝也 |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学准教授 | 博士(工学) | 横森　剛 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 植田　利久 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 大森　浩充 |
| | | 慶應義塾大学大学院特任教授 | 工学博士 | 飯田　訓正 |

本論文は，自動車等の動力源として広く用いられている火花点火機関での耐ノック性能の向上を目的として，火花点火機関での圧縮自着火特性について実験および数値シミュレーションにより物理的・化学的過程の両面から明らかにし，得られた知見をもとにエンジンでのノック生起要因の検討，および耐ノック性能向上手法について提案・検証を行ったものである．本論文は全体で７章からなる．

第１章には，本研究の意義，目的が述べられている．本研究は，未燃予混合気の圧縮自着火過程が火花点火機関でのノックの生起におよぼす影響を検討するものであり，第１章では，その意義を示し，先行研究などを整理し，本研究の目的を述べている．

第２章には，本研究で使用した燃焼試験用エンジン，実験方法，素反応数値計算モデルの詳細が述べられている．また，使用する素反応数値計算モデルについて，試験用エンジンでの実験結果との比較から，その妥当性について検証を行っている．

第３章では，試験用エンジンでの筒内圧力計測から熱発生履歴のサイクル変動について検討を行い，ノックの生起および強度に対する支配因子の同定を行っている．結果，ノックの生起・不生起，およびその強度は，伝播火炎の燃焼位相には相関を示さないが，一方で自着火時の温度や圧力には強い依存性を有することを明らかにしている．また，光学計測によりノックの起点位置や定在波の形成過程を捉え，自着火の発生位置とノックの強度に関係性があることを明らかにしている．

第４章では，詳細化学反応計算を利用して，熱発生履歴の変化，すなわち燃焼開始時期・燃焼期間・燃焼重心の変化が，未燃予混合気の自着火過程に与える影響について明らかにしている．また，得られた知見をもとに，ノックを回避して機関の最大出力を得るために最適な熱発生履歴が存在することを示している．

第５章では，急速圧縮装置を用い，圧縮行程中の異なる時刻に燃料を筒内へ噴射することで，未燃混合気が経験する温度・圧力履歴を変化させ，それらの履歴が着火遅れにおよぼす影響について明らかにしている．

第６章では，上記の各章から得られた知見をもとに，耐ノック性能を向上させたエンジン設計を行い，実際のエンジン燃焼試験にてその効果を検証している．耐ノック性能の向上には，ノック起点位置でのガス流動を強化することで，未燃予混合気の昇温鈍化によって着火遅れ時刻を遅延させ，ノックの生起を抑制する方法を提案しており，その効果が有効であったことを示している．

第７章では，本研究の成果を結論としてまとめている．

上記のように，本論文の成果は，未燃混合気の圧縮自着火過程が火花点火機関でのノックの生起に与える影響ついて新たな知見を与え，また，実際のエンジン設計における耐ノック性能の向上に大きく貢献するものである．その成果は，工学上のみならず，工業上寄与するところが大きい．

よって，本論文の著者は博士(工学)の学位を受ける資格があるものと認める．

# 内容の要旨

| 報告番号 | 甲　第4744号 | 氏　名 | 七森　泰之 |
|---|---|---|---|

主 論 文 題 名 ：

宇宙機運用シナリオに基づくコントロールモーメントジャイロの駆動則に関する研究

宇宙機の姿勢制御用アクチュエータとして用いられるコントロールモーメントジャイロ(Control Moment Gyros, CMG)は同種のリアクションホイール(Reaction Wheel, RW)と比較し出力トルクの大きさや消費電力の面で大きなメリットがあるものの，トルク分解能の低さや機構の複雑さに起因する故障リスク，エネルギー貯蔵装置として用いた際の電力マネジメントが課題である．一方，CMG に関する多くの従来研究は単一姿勢マヌーバの成立性を目的とし，主に宇宙機からの要求トルクに対して所望のジンバル指令値を計算する際の逆行列計算における特異点問題を議論してきた．しかし CMG を搭載する宇宙機として特に高分解能地球観測衛星を対象とした場合，複数の時間スケールに対して宇宙機の実際の運用シナリオを考慮した新たな CMG 駆動則が必要となる．本論文では，多地点観測ミッションのための複数回連続姿勢マヌーバの成立性向上や宇宙機バスシステムの耐故障性・信頼性向上に寄与する新たな駆動則を提案する．

第 1 章では，本論文の背景および目的について述べた．

第 2 章では，宇宙機の姿勢運動およびダイナミクスについて定式化するとともに，CMG 駆動則に関する関連研究について述べた．

第 3 章では，連続姿勢マヌーバの実施（数十秒～数分程度）を想定し，可変速度 CMG(Variable Speed CMG, VSCMG)を用いて高速な姿勢変更と高精度な姿勢整定を両立させるモード遷移駆動則を提案した．提案手法では各姿勢マヌーバにおいて，一定速度 CMG モードで高速な姿勢変更を行い，終局時には CMG のジンバルを停止させ，トルク分解能に優れる RW モードへ切り替えて姿勢整定を行う．この際，後続の高速姿勢変更へ向けて CMG のトルク出力性能を考慮したジンバル角度の制御を行う．

第 4 章では，長期間にわたる連続姿勢マヌーバの繰り返し（数時間～数ヶ月程度）を想定し，CMG の故障につながる特異点近傍でのジンバルの急激な動きと，特異点を通過しない場合に生じるジンバル駆動量の偏り，および駆動量の総和を抑制する手法を提案した．提案手法ではジンバル軸の駆動パターンおよび駆動量が初期ジンバル角組合せに依存する性質に着目し，複数回の連続姿勢マヌーバの合間に一定間隔でジンバルのヌル運動を挿入することで適切な初期ジンバル角の値を持たせるような制御を実施する．

第 5 章では，周回軌道における姿勢マヌーバの繰り返し（数時間～数年程度）を想定し，VSCMG における Integrated Power and Attitude Control System (IPACS)と呼ぶエネルギー貯蔵機能とバッテリーを合わせてハイブリッドシステムとする電源構成を考案した．更に VSCMG/IPACS が姿勢制御機能を担う一方でバッテリーの劣化モードを抑制する電力マネジメントを行う手法を提案した．これにより，VSCMG/IPACS を用いて宇宙機に搭載されたリチウムイオンバッテリーの長寿命化を図れることを示した．

最後に第 6 章では，本論文の結論を述べた．

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第4744号 | 氏　名 | 七森　泰之 |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学准教授 | 博士(工学) | 髙橋　正樹 |
| | 副査 | 慶應義塾大学准教授 | 工学博士 | 中澤　和夫 |
| | | 慶應義塾大学准教授 | 博士(工学) | 石上　玄也 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士(工学) | 白坂　成功 |

学士（工学）・修士（工学）七森　康之君提出の学位論文は「宇宙機運用シナリオに基づくコントロールモーメントジャイロの駆動則に関する研究」と題し、全6章から構成される。

本論文は、宇宙機の姿勢制御用アクチュエータとして用いられるコントロールモーメントジャイロ(Control Moment Gyros, CMG)は同種のリアクションホイール(Reaction Wheel, RW)と比較して出力トルクの大きさや消費電力の面で大きなメリットがあるものの、トルク分解能の低さや機構の複雑さに起因する故障リスク、エネルギー貯蔵装置として用いた際の電力マネジメントが課題である。一方、CMGに関する多くの従来研究は単一姿勢マヌーバの成立性を目的とし、主に宇宙機からの要求トルクに対して所望のジンバル指令値を計算する際の逆行列計算における特異点問題を議論してきた。しかし、CMGを搭載する宇宙機として特に高分解能地球観測衛星を対象とした場合、複数の時間スケールに対して宇宙機の実際の運用シナリオを考慮した新たなCMG駆動則が必要となっている。本論文では、多地点観測ミッションのための複数回連続姿勢マヌーバの成立性向上や宇宙機バスシステムの耐故障性・信頼性向上に寄与する新たな駆動則を提案している。

第1章では、本論文の背景および目的について述べている。

第2章では、宇宙機の姿勢運動およびダイナミクスについて定式化するとともに、CMG駆動則に関する関連研究について述べている。

第3章では、連続姿勢マヌーバの実施（数十秒～数分程度）を想定し、可変速度CMG(Variable Speed CMG, VSCMG)を用いて高速な姿勢変更と高精度な姿勢整定を両立させるモード遷移駆動則を提案している。提案手法では各姿勢マヌーバにおいて、一定速度CMGモードで高速な姿勢変更を行い、終局時にはCMGのジンバルを停止させ、トルク分解能に優れるRWモードへ切り替えて姿勢整定を行っている。この際、後続の高速姿勢変更へ向けてCMGのトルク出力性能を考慮したジンバル角度の制御を行っている。

第4章では、長期間にわたる連続姿勢マヌーバの繰り返し（数時間～数ヶ月程度）を想定し、CMGの故障につながる特異点近傍でのジンバルの急激な動きと、特異点を通過しない場合に生じるジンバル駆動量の偏り、および駆動量の総和を抑制する手法を提案している。提案手法ではジンバル軸の駆動パターンおよび駆動量が初期ジンバル角組合せに依存する性質に着目し、複数回の連続姿勢マヌーバの合間に一定間隔でジンバルのヌル運動を挿入することで適切な初期ジンバル角の値を持たせるような制御を実施している。

第5章では、周回軌道における姿勢マヌーバの繰り返し（数時間～数年程度）を想定し、VSCMGにおけるIntegrated Power and Attitude Control System (IPACS)と呼ぶエネルギー貯蔵機能とバッテリーを合わせてハイブリッドシステムとする電源構成を考案している。更にVSCMG/IPACSが姿勢制御機能を担う一方でバッテリーの劣化モードを抑制する電力マネジメントを行う手法を提案した。これにより、VSCMG/IPACSを用いて宇宙機に搭載されたリチウムイオンバッテリーの長寿命化を図れることを示している。

第6章では、以上の内容をまとめ、本論文の結論を述べ、最後に今後必要な検討課題について述べられている。

以上のように、本論文は、多地点観測ミッションのための複数回連続姿勢マヌーバの成立性向上や宇宙機バスシステムの耐故障性・信頼性向上に寄与する新たな駆動則を提案したものである。その成果は宇宙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4745号 | 氏　名 | 江面　篤志 |
|---|---|---|---|

主論文題名：

レーザ誘起湿式改質法の開発とそれを用いた金属材料の表面改質

工業製品の高付加価値化のため，微細かつ複雑な部品が用いられるようになっており，その高機能化のためには，局所領域を対象とした表面改質法が必要である．そこで本研究では，局所領域を改質することが可能なレーザ誘起湿式改質法の提案および処理システムの構築，さらにそれを用いた金属材料の表面改質効果について検討することを目的とする．また，このような改質処理を用いて溶液中に浸漬させた基材にレーザ照射を施すことにより，溶液中の成分を含む改質層を形成し，金属材料に対し新たな機能を付与することを試みる．

第１章に，本研究の背景と従来の研究を概説した．

第２章では，レーザ誘起湿式改質システムの提案および構築を行った．構築したシステムを用いて，硝酸アルミニウム溶液に浸漬させたオーステナイト系ステンレス鋼に対して，レーザ照射処理を施した．その結果，高い硬さを有する $Fe^{2+}Al_2O_4$ で構成される改質層が形成されることが明らかとなった．

第３章では，レーザ出力やデフォーカス量などのレーザ照射条件が形成される改質層に及ぼす影響について検討した．その結果，単位面積当たりに入力されるエネルギーの増大とともに形成される改質層が厚くなることが明らかとなった．さらに改質層が形成した被処理面の摩擦摩耗試験を実施し，改質層が形成されていない面と比較して，耐摩耗性が向上することが明らかとなった．

第４章では，処理に用いる溶液の成分を変更し，形成される改質層の特性に及ぼす影響について検討した．硝酸アルミニウム溶液を用いて処理を施した場合には，厚い改質層が形成されることを示した．また，溶液の pH の低下とともに，形成される改質層に含まれる溶液成分の割合が増加することが明らかとなった．

第５章では，純チタンへの生体活性の付与を目的として，硝酸カルシウム溶液に浸漬させた純チタン材に対してレーザ照射を施した．その結果，試験片表面にカルシウムおよび酸素元素を含有した改質層が形成されることを示した．さらに生体擬似体液への浸漬試験を実施した結果，改質処理を施した試験片表面にハイドロキシアパタイトの析出が認められ，生体活性が向上することが明らかとなった．

第６章では，レーザ誘起湿式改質法を複雑な形状や大型部材へ適用するため，浸漬方式による溶液供給ではなく，溶液をミスト状にして供給する処理システムを構築し，その効果について検討を加えた．ミスト供給方式により形成した被処理面には，従来の浸漬方式と同じ物質で構成される改質層が形成されることを示した．さらに摩擦摩耗試験の結果，ミスト供給方式を用いて形成された改質層は未処理材と比較して摩耗量の減少が見られ，耐摩耗性にも優位性があることを明らかにした．

第７章は結言であり，本研究で得られた知見を要約し，今後の課題をまとめた．

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第4745号 | 氏　名 | 江面　篤志 |
| --- | --- | --- | --- |

| 論文審査担当者： | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| | 主査 | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 小茂鳥　潤 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 志澤　一之 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士(工学) | 青山　英樹 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士(工学) | 大宮　正毅 |
| | | 理化学研究所専任研究員 | 博士(工学) | 片平　和俊 |

学士(工学)江面篤志君提出の学位請求論文は，「レーザ誘起湿式改質法の開発とそれを用いた金属材料の表面改質」と題し，7 章から構成されている．

近年の工業製品は，高付加価値化のために微細かつ複雑な部品が用いられるようになってきている．このような製品の安全性確保と高機能化のためには，局所領域を対象とした表面改質を行うことが一つの有効な手段となりうる．このような観点から本研究では，数 mm オーダの局所領域の改質を可能とするレーザ誘起湿式改質法を提案している．この処理は，溶液中に浸漬させた金属にレーザ照射を施すことにより，溶液中の成分を含む改質層を形成させ，その表面に新たな機能を付与することを目的としたものである．

第 1 章は序論であり，本研究を実施するに至った社会的背景と本論文の意義を述べている．

第 2 章では，構築したレーザ誘起湿式改質システムの詳細を述べ，それを用いて，硝酸アルミニウム水溶液に浸漬させたオーステナイト系ステンレス鋼に対してレーザ照射処理を施し，その結果，高い硬さを有する $FeAl_2O_4$層が形成されることを示している．さらに，提案した処理により，表面改質層が形成されるメカニズムを明らかにしている．

第 3 章では，レーザ出力やデフォーカス量などの照射条件が，形成される改質層の特性に及ぼす影響について検討している．その結果，単位面積当たりに入力されるエネルギーの増大に伴って形成される改質層が厚くなることを指摘している．また，被処理面の摩擦摩耗試験を実施し，改質層が形成されていない面と比較して，耐摩耗性が向上することを示している．

第 4 章では，処理に用いる溶液の成分を変更し，形成される改質層の特性に及ぼす影響について検討を加え，硝酸アルミニウム水溶液を用いて処理を施した場合には，これまでよりも厚い改質層が形成されることを示している．また，溶液の pH の低下とともに，形成される改質層に含まれる溶液成分の割合が増加する傾向にあることを示している．

第 5 章では，純チタンへの生体活性の付与を目的とした研究を行っている．具体的には，硝酸カルシウム水溶液を用いたレーザ誘起湿式改質処理を行うことにより，被処理面にはカルシウムおよび酸素元素を含有した改質層が形成されることを示している．また生体擬似体液への浸漬試験を実施し，改質処理を施した表面には，ハイドロキシアパタイトの析出が認められることを述べている．

第 6 章では，提案した処理の実用化を視野においた検討を行っている．具体的には，レーザ誘起湿式改質法を複雑な形状や大型部材へ適用するため，溶液をミスト状にして供給する処理システムを構築し，その効果について検討を加えている．その結果，ミスト供給方式を用いても同様の改質層が形成され，耐摩耗性も向上することを明らかにしている．

第 7 章は結論であり，本研究で得られた知見を要約し，今後の課題をまとめている．

以上要するに本研究では，レーザを利用した新しい表面改質手法を提案するとともにその効果を実験的に明らかにし，さらに，その効果発現メカニズムを解明しており，材料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4746号 | 氏　名 | 西村　聡史 |
|---|---|---|---|

主 論 文 題 名 ：

Connectivity Design and Control of Multilateral Systems under Time Delay
（時間遅れの下でのマルチラテラルシステムの結合性設計と制御）

情報通信技術の向上により多くのシステムがネットワークを介して協調することが可能となり、多システム間の相互作用を取り扱うマルチラテラルシステムの制御が注目を集めている。従来、システム全体の重心位置（重心モード）およびシステム間の相対位置（相対モード）に関する運動を同時に制御することにより所望の機能を実現してきたが、ネットワーク伝送に伴う通信遅延の影響で、各運動への独立な制御器の配置が困難になることが問題となっている。そこで本研究では、通信遅延下のマルチラテラルシステムにおいて、システム間の結合性を設計することによって、各運動を非干渉化し機能設計に応用することを目的とする。

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、ネットワークを介したマルチエージェントシステムにおいて重心モードが 2 重積分特性を有するように相対モードの結合性を設計する手法を提案した。具体的には、遅延要素を含むグラフラプラシアンの行列式が零となるように結合性を設計することにより非干渉化が実現されることを明らかにした。

第 3 章では、マルチラテラルシステムの一例であるバイラテラル制御において、相対モードへの干渉を取り除くための重心モードの結合性の設計を行った。本手法ではむだ時間モデルを用いるため、伝送行列を用いてモデル化誤差が力覚伝送に与える影響を解析し、その低減法および安定性についても示した。

第 4 章では、バイラテラル制御およびマルチラテラル制御に対して両モードの結合性を統合して設計するための手法を提案した。モード空間へ写像を行うことで各運動を分離し、その際、座標変換行列が伝送経路におけるむだ時間要素を含むように座標変換行列を定義した。また、バイラテラル制御の評価指標である操作性および再現性の観点から制御系を解析し、通信遅延下においても提案法が高い性能を有していることを示した。

第 5 章では、前章で述べた座標変換行列を応用し、機械共振を有する系を用いたバイラテラル制御について述べた。波動方程式によるモデル化により機械共振系が等価むだ時間系とみなせるため、座標変換行列による結合性設計が可能となることを示した。

第 6 章では、マルチラテラル制御においてシステム間に存在する通信遅延時間に基づいて相対モードに関するトポロジーをデザインするための手法を提案した。隣接行列の最大固有値に対応する固有ベクトルを導出することにより、各システムが有する等価的な影響度を定量化し、本指標に基づいてスレーブの影響が最大となるよう結合性の再設計を行うことで力覚再現性能を回復できることを示した。

第 7 章では、力覚および温熱覚情報の多方向伝送を実現するための制御系を提案した。各感覚呈示に用いるアクチュエータの時定数の違いを補償するため、その差異を遅延要素とみなして座標変換中で考慮することによって温熱覚の同時呈示を実現した。

第 8 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。

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第4746号 | 氏　名 | 西村　聡史 |
|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査　慶應義塾大学　准教授　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　准教授　博士（工学）　矢向　高弘 | | |
| | 　　　慶應義塾大学　教授　博士（工学）　斎藤　英雄 | | |

学士（工学），修士（工学）西村聡史君提出の学位請求論文は「Connectivity Design and Control of Multilateral Systems under Time Delay」（時間遅れの下でのマルチラテラルシステムの結合性設計と制御）と題し，8章から構成されている．

情報通信技術の飛躍的な向上により，ネットワークを介した制御システムのさらなる多機能化が期待されている．特に，多くのシステムが相互作用しながら協調するマルチラテラルシステムの制御においては，時間遅れに起因する不安定化を回避した機能の設計が求められる．マルチラテラルシステムではその多自由度性を活かした多機能な設計が可能になるが，時間遅れの影響により所望とする機能間の非干渉化が困難とされていた．本論文では上記に鑑み，時間遅れの下でのマルチラテラルシステムの機能の非干渉化を実現するために，システム間の結合性の設計と制御系を提案している．

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，マルチラテラルシステムにおけるサブシステムの相対関係を制御する相対モードと全体平均を制御する平均モードを非干渉化するための手法を提案している．具体的には，遅延要素を含んだグラフラプラシアンを新たに定義し，その行列式が零になるように結合性を設計することで，非干渉化が実現されることを理論的に明らかにしている．

第3章では，バイラテラルシステムを対象として，相対モードと平均モードの非干渉化の設計方法論を示している．これは相対モードの結合性が与えられれば，第2章で示される理論に基づいて非干渉化された平均モードを得るための条件を自動的に決定できることを示したものである．さらに，この条件を満たす結合性の設計法として，時間遅れのモデルを必要とする場合としない場合の2種類の方法を示している．

第4章では，第3章で示した結合性の設計法をマルチラテラルシステムに拡張している．その上で制御系の評価指標である透明性の観点からシステムの性能を解析し，時間遅れの影響下においても高い安定性と制御性能を有していることを確認している．

第5章では，システムが機械的な柔軟性を有している場合へ理論を拡張している．機械共振に起因する振動の抑制には，むだ時間フィードバックが有効であることが知られており，本章では通信遅延と共振抑制のためのむだ時間を統合して設計する手法を提案している．

第6章では，マルチラテラルシステムのサブシステム間の時間遅れに基づいて，相対モードの結合性を合理的に設計するための手法を提案している．具体的には，隣接行列の最大固有値に対応した固有ベクトルを導出することで，各システムが有する影響度を定量化し，結合性の設計に応用できることを示している．

第7章では，本論文で提案した手法を力覚情報と温熱覚情報の多方向伝送に適用し，実験により性能の評価を行っている．それぞれの感覚呈示において異なる時定数を時間遅れとみなして統合設計することで，同時性を向上させることに成功している．

第8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，本論文では時間遅れの下でのマルチラテラルシステムの結合性と制御系の設計方法論を明らかにするとともに，理論と実験の双方から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4747号 | 氏　名 | 松谷　良佑 |
| --- | --- | --- | --- |

主 論 文 題 名 ：

Behavioral correlates of corticomuscular coherence and its underlying neural circuitry
（脳波筋電図コヒーレンスの運動学的特性とその神経回路基盤）

ヒトの随意運動は、大脳皮質運動野より発せられる運動指令が脊髄運動ニューロンに伝達され、筋収縮を引き起こすことで発現する。随意運動中、運動野近傍の脳波と対側筋の筋電図には、15-30 Hz（ベータ帯）の特徴的な律動が見られることが古くから知られており、この現象は脳波筋電図コヒーレンス（Corticomuscular Coherence, CMC）とよばれている。CMC は運動野から収縮筋へ向かう遠心性の神経活動だけでなく、筋紡錘等から大脳皮質へ向かう求心性神経活動も反映しており、感覚入力と運動出力の統合に関わる神経活動だと考えられている。

CMC は運動学習、運動履歴、注意、年齢等のさまざまな要因でその強度が変調し、健常成人間で個人差が生じている。また、同一被験者内でも運動中に CMC 強度は変動し、それに伴って脳波と筋電図の双方に顕著なベータ帯の周期的神経活動が観察される。以上のことから、CMC は運動機能を規定する一因子である可能性が考えられる。本研究では、運動生理学的実験を通じて CMC の運動機能上の特性を明らかにするとともに、その神経基盤となる皮質脊髄内の神経回路の機能特性を検討した。

第一章は序論である。まず、随意運動の発現に関わる神経系と、CMC に関するこれまでの生理学的知見をまとめ、その機能的意義について概説した。次に、CMC による皮質脊髄路のベータ律動が運動機能へ与えうる可能性について説明した。また、CMC の発生に関わると考えられる大脳皮質および脊髄内の神経回路と、その活動性の評価手法について説明した。最後に、本研究の目的と重要性を述べた。

第二章では、CMC が運動機能へ与える影響について、反応時間課題を用いた運動生理学的アプローチによって検討した。被験者は 15 名の健常成人を対象とし、一定張力維持状態から聴覚刺激に対して素早く発揮張力を上昇させる課題をおこなわせた。このときに得られた脳波および筋電図を観察したところ、同一被験者内でもその活動様式は時々刻々と変化していることを認めたため、運動反応前のベータ帯筋活動をもとに各試行を分類した。その結果、CMC が強い試行では反応時間が有意に延長していることを認めた。この結果は、CMC が運動神経系の活動を周期的に規定することで、新規の運動開始を遅らせることを示唆する。

第三章では、CMC の個人差の原因となりうる皮質内と脊髄内神経回路を二つの電気生理学的アプローチによって定量し、その関連性を検討した。経頭蓋磁気刺激の実験では、被験者は健常成人 11 名とし、等尺性示指外転運動中に二連発刺激によって誘発された運動誘発電位から皮質内抑制を評価した。各被験者の皮質内抑制と CMC の強度との間には有意な相関は得られなかった一方で、皮質内抑制と運動野近傍脳波のベータ律動の間には有意な相関が得られた。つまり、皮質内抑制は皮質ベータ律動の生成に関与しているものの、必ずしもその律動が皮質脊髄路を通して筋へと伝わっていないことが考えられる。次に、12 名の被験者に対して、ヒラメ筋の等尺性収縮中に二連発の末梢神経電気刺激を与え、誘発された H 反射から脊髄内の反回抑制を評価した。その結果、反回抑制と CMC との間に有意な相関が得られた。これは、反回抑制が強いほど CMC が小さいことを示しており、大脳皮質から伝わってきたベータ律動が脊髄内で反回抑制によって弱められながら筋へ伝わっていることが示唆された。

第四章は、結論である。本研究の成果を総括し、その重要性と今後の展望を述べている。

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第4747号 | 氏　名 | 松谷　良佑 |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学准教授 | 博士（工学） | 牛場　潤一 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 岡　浩太郎 |
| | | 慶應義塾大学准教授 | 博士（工学） | 舟橋　啓 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 本多　敏 |

学士（工学）、修士（工学）松谷良佑君提出の学位請求論文は、「Behavioral correlates of corticomuscular coherence and its underlying neural circuitry（脳波筋電図コヒーレンスの運動学的特性とその神経回路基盤）」と題し、全4章から成っている。

ヒトが骨格筋を持続的に収縮させている時、運動指令の生成を担う大脳皮質運動野の神経細胞群は、約20 Hzで同期的に活動することが知られている。また、この同期的神経活動は皮質脊髄路を経由して骨格筋へ伝達されるため、骨格筋の収縮強度もまた約20 Hzで変動している。この時、運動野の活動を頭皮脳波によって計測し、収縮筋から得られた表面筋電図に含まれる振幅変調成分との間でコヒーレンス（Corticomuscular coherence、以後CMC）を求めると、当該周波数帯域で統計的に有意なピークが得られる。このピーク値は運動神経系の活動の律動性を表す指標として現在広く用いられているが、その運動機能上の意味については不明な点も多い。本論文は、CMCの強度が時間変動することに着目し,CMCが高強度になる時間帯において運動反応時間が延長することを明らかにした。また、運動野や末梢感覚神経に対してパルス状の電磁気刺激を与え、これによって誘発される神経応答を解析することによって、CMCに関与する皮質脊髄内の神経回路を同定した。

本論文の第1章は序論であり、ヒトの脳における随意的な身体運動の生成過程、身体運動の生成過程で生じる頭皮脳波や表面筋電図の時系列信号としての特性、およびサルやヒトを対象としてこれまでに明らかにされてきたCMCの神経機構について概説している。

第2章では、提示された音刺激に反応して筋収縮強度を突発的に上昇させる聴性運動反応課題を設定し、CMCと反応時間の関係について検討している。CMCが観察される被験者とそうでない被験者の間では反応時間の差は認めなかったが、これには体格差や運動経験の差が影響していると考え、同一被験者内におけるCMCの時間変動との関係を調べたところ、CMC発生時に反応時間が有意に延長することを見出した。

第3章では、電気生理学的実験によってCMCの背後にある神経基盤を検討している。まず二連発パルス経頭蓋磁気刺激法によって、大脳皮質運動野にある抑制性介在神経細胞の活動強度を計測したところ、CMCと同一周波数の脳波振幅との間に正の相関を認めた。また、末梢運動神経軸索束を二連発電気刺激することによって脊髄内レンショウ細胞の活動強度を計測したところ、CMCとの間に正の相関を認めた。以上のことから、大脳皮質運動野で生成された律動的神経活動は、骨格筋に伝達される過程で脊髄内回路によって修飾され、CMCを形成しているものと考えられた。

第4章では、本研究を総括するとともに、ニューロフィードバック等の神経修飾技術を用いたCMC強度の調節が運動技能の向上に貢献する可能性について述べている。また、その実現に向けて必要な検討項目（例えばCMC強度と運動技能の間の因果性についての実証や、CMCの運動学上の効果量を考慮したスポーツ動作の選定など）について、主な課題を挙げながら言及している。

以上、本論文の成果は、筋収縮中に観察される頭皮脳波と筋電図の間の同期的、周期的な信号構造が運動反応時間の延長に関連していることと、その背後に大脳皮質および脊髄内の抑制性神経回路が関与していることを明らかにしたことであり、身体運動を支える神経機構の理解や制御を目指した運動生理学研究の更なる発展に寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。

# Thesis Abstract

| Registration Number | “KOU” No.4748 | Name | Kirchhart, Matthias |
|---|---|---|---|
| Thesis Title | Vortex Particle Redistribution and Regularisation | | |


Vortex methods are particle schemes that were first introduced as a tool to solve inviscid, unbounded flow problems in two- and three-dimensional space. In this thesis we briefly introduce the mathematical framework necessary to understand vortex methods and their benefits. When one tries to extend the method to viscous or bounded flows, however, one faces several additional problems. Our main contributions to the field address three of the problems encountered.

Our first contribution is a new scheme to handle unbounded, viscous flows. Based on the vorticity redistribution method, this scheme requires neither a frequent regridding of the particle field, nor makes use of the viscous splitting. It can thus be used with higher order time-stepping methods. Its consistency, stability, and conservation properties are proven. Together with the new heuristics of reduced operators and small neighbourhoods we demonstrate in numerical experiments that the method can be implemented efficiently on computers. The numerical results are in good agreement with the analysis.

As a second contribution we propose a new scheme to tackle the particle regularisation problem in bounded domains. This problem refers to the task of obtaining a smooth approximation of a function from a given particle field. To this end we construct a new class of globally smooth finite element spaces and prove their approximation properties. The global smoothness of these spaces will allow us to use them as test-functions for particle approximations. The regularisation problem is then modelled as a perturbation to a stabilized $L^2$-projection onto fictitious domains. After proving consistency, stability, and convergence of the method we show that optimal results are obtained when choosing σ proportional to h, where σ refers to the smoothing length and h to the particle spacing. As a consequence the complexity of the velocity computation can be reduced from $O(h^{-d})$ to $O(h^{-d/2})$. Numerical experiments confirm the analysis and that the derived error bounds are sharp.

Our third contribution are simple and efficient formulae to evaluate the Biot–Savart integral on three-dimensional domains using tetrahedral meshes. The derived formulae are exact for piecewise linear functions. Compared to the previously published formulae by Suh, the presented approach is numerically more stable and reduces the number of required arctangent evaluations from twelve to four. The increased stability is demonstrated in a simple numerical example.

We finish this thesis with concluding remarks on the results and possible interesting topics for future research.

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第4748号 | 氏　名 | Kirchhart, Matthias |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学教授 | Dr.-Ing. | 小尾　晋之介 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学），TeknD | 深潟　康二 |
| | | 慶應義塾大学専任講師 | Ph.D. | 安藤　景太 |
| | | 東京工業大学准教授 | 博士(工学) | 横田　理央 |

工学修士(MA), Matthias Kirchhart(マティアス キアヒャート)君提出の学位論文は Vortex Particle Redistribution and Regularisation（渦粒子の再配置と正規化）と題し本編 6 章により構成されている．

渦法（Vortex Method）は流体運動を記述する手法の一つで，一般に用いられるナビエ・ストークスの式から派生した流体の渦運動を追跡する方程式系により構成される．数値解析上の特徴として，格子生成を必要としない粒子法であることから，変形する固体表面に接する流体運動の扱いが容易であるなどの利点がある．一方で，渦法は自由境界の非粘性流れの記述を元に発展してきたため，粘性拡散や固体等の境界条件の取り扱いにおいて十分に理論的な整備がなされていない．本論文の著者は，主にこれら 2 つの点に着目して，数理的な考察に基づき，従来の手法に改良を加え，精度並びに安定性に優れた数値解析手法を提案している．

第 1 章では渦法の成り立ちについて広範な文献調査を行った．基礎理論の発展，数値解析の黎明期における展開，高速計算アルゴリズムの発達といった系統的な整理を行うとともに本研究の対象とする諸問題の位置づけについて述べている．

第 2 章では渦法の基礎理論について述べるとともに支配方程式を導出し提示している．後の章で個別に取り上げる運動学的性質と力学的性質のそれぞれを整理するとともに，本論文で取り上げる問題をより具体化している．

第 3 章ではまず粘性流れへの拡張を目的として拡散を表現するための渦粒子の再配置に関する新たな手法を提案している．従来の手法に対して優れている点は，計算途中での格子点への渦度の補間や時間進行の分割を行わないところにあり，高次精度の時間進行スキームが高い安定性とともに使用することができる．実際に行った数値解析により，著者が提案する理論解析に忠実な精度で数値シミュレーションが実行可能であることを示した．

第 4 章では，境界面での粒子の取り扱いにおいて新たな正規化の手法を導入することで，従来の手法において避けられてきた関数の連続性を保証することを提唱した．同時に，安定化の指針として渦粒子同士の距離と平滑化関数の特性距離の比例関係を確保することで，速度場の計算負荷を著しく減少させることを見出した．

第 5 章には数値解析技術上の新たな提案として，渦法の計算において最も負荷の高いビオ・サバール則の適用において体積積分をすべて面積分に置き換え計算効率を高める定式化を導いた．

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．

以上の研究成果は工学的応用が進む数値流体力学において，従来とは異なる道筋での発展の可能性を与えうる点で，学術的にも工学的にも極めて有意義といえる．この研究を契機として，更なる応用展開が期待される．

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4749号 | 氏　名 | 西原　諒 |
|---|---|---|---|

主 論 文 題 名 ：

Synthetic Coelenterazine Derivatives for Bioluminescent Imaging
（生物発光イメージングのための合成生物発光基質セレンテラジン誘導体）


緑色蛍光タンパク質 GFP や生物発光酵素に代表される発光タンパク質は、生体中の生命現象をその光で可視化する光イメージング技術としてライフサイエンス分野を牽引する基盤技術となっている。特に生物発光は、発光基質の酸化反応を酵素が触媒する酵素反応(生物発光)によって光を放出するため、蛍光測定での励起光由来の弊害なく、蛍光法以上に高感度かつ非侵襲的な光イメージングが期待される。しかし既存の生物発光イメージング技術では、発光輝度が低くイメージング技術としての感度が十分ではなく、生体組織透過性の高い近赤外領域(650-900 nm)での発光を示すものも少ない。本研究では、有機合成的手法に基づく発光基質セレンテラジン(CTZ)誘導体開発と遺伝子工学的手法に基づく赤色発光酵素の開発により、これらの課題を解決した。

第 1 章では、バイオ分析技術として有用な生物発光系及び既存の CTZ 誘導体の特徴について概説し、本研究の目的を述べた。

第 2 章では、生物発光基質 CTZ の化学修飾による高輝度生物発光システム開発について述べた。まず CTZ の 6 位に数種類の誘導化を施した新規基質の開発に成功した。更に新規基質がウミシイタケ発光酵素 RLuc の変異体(RLuc8.6-535)において高輝度発光を示し、その発光輝度は市販の CTZ 誘導体(DeepBlueC™)の約 25 倍であった。今後、世界で最も高輝度な青色生物発光基質としての利用が期待され、実際に生物発光酵素 ALuc を用いた金属イオンや細胞内タンパク質間相互作用解析等、バイオアッセイ系への応用も行なった。

第 3 章では、多成分同時分析のための RLuc8.6-535 または ALuc に特異的な CTZ 誘導体開発について述べた。多色発光イメージング技術は、生体分子の複合的な生理活性を異なる色で同時に観察する有用な手段である。しかし一般的に生物発光は、その発光スペクトル半値幅が広く、発光信号間のクロストークが懸念されるため、多色発光イメージングへの応用が困難となる。そこで CTZ の 2 位または 6 位置換基を改変した新規 CTZ 誘導体を合成、生物発光酵素 ALuc 並びに RLuc 誘導体に各々特異的に反応する新規基質開発を行った。これら新規基質と ALuc または RLuc 誘導体に基づくタンパク質間相互作用可視化プローブを組み合わせる事で、2 種類のタンパク質相互作用を同時に解析する新たなバイオ分析技術開発に初めて成功した。

第 4 章では、超高輝度生物発光系開発について述べた。CTZ6 位水酸基をアルキル化した誘導体を 20 種類合成し、RLuc8.6-535 変異体との発光特性を検討する事で、CTZ6 位置換基の酵素認識への効果をより詳細に調べた。結果として、市販品である DeepBlueC™の約 50 倍の発光輝度を持つ新規 CTZ 誘導体の開発に初めて成功した。更に新規高輝度基質は、高解像度での癌細胞の一細胞イメージングを可能にするだけでなく、赤色発光変異酵素(iRFP-RLuc8.6SG)と組み合わせる事で、マウス生体深部における癌細胞イメージングも実現した。

第 5 章では、赤色発光 CTZ 誘導体開発について述べた。第 2-4 章で述べた CTZ 誘導体は、単体でいずれも 400-500 nm に生物発光を示す青色発光基質であった。そこで CTZ 生物発光系の更なる発光波長の長波長化を目指し、CTZ6 位置換基に有機蛍光色素を修飾、BRET 機構に基づく CTZ からのエネルギー移動で蛍光色素が発光する分子を合成し、生物発光波長の長波長化に成功した。

第 6 章では、生物発光研究分野における新規基質の位置づけと、本研究がもたらす将来の展望を述べた。

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第4749号 | 氏　名 | 西原　諒 |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学教授 | Dr.sc.nat. | チッテリオ　ダニエル |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 栄長　泰明 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士（理学） | 藤本　ゆかり |
| | | 慶應義塾大学名誉教授 | 工学博士 | 鈴木　孝治 |
| | | 慶應義塾大学名誉教授 | 工学博士 | 西山　繁 |

学士（工学）、修士（工学）西原諒君提出の学位請求論文は、「Synthetic Coelenterazine Derivatives for Bioluminescent Imaging」（生物発光イメージングのための合成生物発光基質セレンテラジン誘導体）と題し、6章より構成されている。

発光基質を酵素が触媒する酸化反応によって光を放出する生物発光は、バイオイメージングで頻繁に用いられている蛍光測定で問題となる励起光由来のバックグラウンドシグナルの影響がない。そのため、生物発光測定法は蛍光測定法以上に高感度かつ非侵襲的な光イメージング法として近年注目されている。しかしながら、天然物を用いたこれまでの生物発光系では発光輝度が低いためにイメージング感度が十分ではなく、生体組織透過性の高い近赤外領域（650-900 nm）の波長で発光を示す生物発光系はほとんどない。そこで本研究は、有機合成的手法に基づく新規の発光基質セレンテラジン（CTZ）誘導体開発と遺伝子工学的手法に基づく赤色発光酵素開発との両技術開発により、これまでの課題を解決する新規人工生物発光系の開発を行なっている。

第1章では、生物発光によるバイオイメージング技術について概説し、本研究の目的を述べている。

第2章では、生物発光基質セレンテラジン（CTZ）の6位炭素から分子構造を拡張した新規CTZ誘導体の設計・合成とウミシイタケ発光酵素系における光学特性について述べている。開発した数種のCTZ誘導体のうち、6-pi-Phenyl-CTZは発光酵素RLucの変異体（RLuc8.6-535）が高輝度発光を示し、その発光輝度は市販のCTZ誘導体（DeepBlueC™）の約25倍を示している。

第3章では、多成分同時分析のための発光酵素RLuc8.6-535およびALucに特異的に反応するCTZ誘導体開発について述べている。2位または6位置換基を改変した15種類のCTZ誘導体を設計・合成し、酵素との網羅的構造活性相関を探求することで、発光酵素ALucまたはRLuc誘導体に特異的に反応する新規基質を見出している。更に、新規基質とALucまたはRLuc誘導体に基づくタンパク質間相互作用検出プローブと組み合わせることで、2種類のタンパク質相互作用を同時に解析することのできる新たなデュアルアッセイ系の創製に初めて成功している。

第4章では、CTZ6位水酸基をアルキル化した誘導体を20種類合成し、RLuc8.6-535変異体との発光特性を検討することで、CTZ6位置換基の酵素認識への効果をより詳細に調べている。このうち6-Al3OMe-2H-CTZは、生細胞においてDeepBlueC™の約50倍の発光輝度を示す高輝度基質であることが確認されている。新規高輝度基質は、高解像度での癌細胞のシングルセルイメージングを可能にするだけでなく、赤色発光変異酵素（iRFP-RLuc8.6SG）と組み合わせることで、マウス生体深部における癌細胞イメージングも可能にしている。

第5章では、赤色発光CTZ誘導体開発について述べている。第2−4章で述べたCTZ誘導体は、いずれも400-500 nmに生物発光を示す青色発光基質である。そこでさらなる発光波長の長波長化を目指して、CTZ6位置換基に有機蛍光色素を修飾し、BRET機構に基づくCTZからのエネルギー移動で蛍光色素が発光する分子を設計・合成することで、生物発光波長の長波長化に成功している。

第6章では、結論として各章で得られた内容を総括し、生物発光研究分野における新規基質の位置づけと、本研究がもたらす将来の展望を述べている。

以上要するに、本研究では、従来技術より優れた光学特性を持つ生物発光系の創製に成功しており、その実用性が立証されている。このような研究は、分析化学や生命科学分野へ貢献するものであり、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4750号 | 氏　名 | 力丸　佑紀 |
| --- | --- | --- | --- |

主 論 文 題 名 ：

Parameter Estimation of Simultaneous Spatial Autoregressive Model

（同時空間自己回帰モデルのパラメータ推定）

本論文は，空間の格子点上のデータに対する代表的なモデルの一つである同時空間自己回帰モデル(simultaneous spatial autoregressive model)のパラメータ推定に関しての研究成果をまとめたものであり，本文 4 章から成る．中心課題は，弱定常性と正規性の仮定のもとでの, 最尤法による効率的で漸近有効なパラメータ推定法の確立である．第一章は空間データとそれに対するモデルを紹介した後，同時空間自己回帰モデルのパラメータ推定に関係する既存の研究をまとめている．また，空間自己回帰モデルにおける弱定常性の必要十分条件の証明を与えている．第二章では，空間領域で表現された新しい近似対数尤度を提案する．その１つ目のポイントは，自己共分散行列を観測値から誤差への変換行列に巡回性を導入した上で近似したことである．その計算は行列演算のみで済むため，いくら多次元になってもパラメータ数が増えても計算の複雑さが増すことはない方法である．２つ目のポイントは観測値の二次形式に収縮率を導入したことである．収縮率の導入により，この近似対数尤度を最大化することによって得られる推定量は一致性，漸近有効性をもつ，つまり最適な推定法であることを証明している．また，独自に開発した乱数生成法により，従来の推定法と比較した結果，比較的少数のデータでもより精度のよい推定が得られることも示されている．第三章は，2 次モーメントからだけでは同時空間自己回帰モデルがいつでも同定可能ではないことが，パラメータ推定に関して大域的な問題を引き起こすことを明らかにしている．最尤解が複数存在するだけでなく，それらが重複度を持つときには，フィッシャー情報量行列が非正則になり，パラメータが推定不可能となることを証明している．さらに本章では，フィッシャー情報量行列が正則となるための必要十分条件をいくつか導出し，推定したパラメータが信頼できるかチェック可能としている．また，同時空間自己回帰モデルの下位モデである一方向モデルや対称モデルでは同定可能性の問題が起きないことを証明している．第四章は結論であり，本論文の結果をまとめるとともに，その結果に関連した残されたいくつかの課題について述べている．また，別タイプの空間自己回帰モデルである条件付き空間自己回帰モデルの場合にも同様な推定法を発見できるか，同定可能性の問題が起きるのか，今後の残された課題の一つであることを述べ締めくくっている．

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第 4750 号 | 氏　名 | 力丸　佑紀 |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学教授 | Ph. D. | 南　美穂子 |
| | 副査 | 慶應義塾大学准教授 | 博士（理学） | 白石　博 |
| | | 慶應義塾大学准教授 | 博士（情報理工学） | 小林　景 |
| | | 慶應義塾大学専任講師 | 博士（工学） | 林　賢一 |
| | | 慶應義塾大学名誉教授 | 理学博士 | 柴田　里程 |

学士（理学），修士（理学）力丸佑紀君提出の学位請求論文は，“Parameter Estimation of Simultaneous Spatial Autoregressive Model”（同時空間自己回帰モデルのパラメータ推定）と題し，全 4 章から構成されている．本論文は，空間の格子点上のデータに対する代表的なモデルの一つである同時空間自己回帰モデル(simultaneous spatial autoregressive model)のパラメータ推定に関する研究成果をまとめたものであり，弱定常性と正規性の仮定のもとでの，計算が容易で漸近有効なパラメータ推定法の確立を中心課題としている．同時空間自己回帰モデルは，各地点での値がその近傍のいくつかの値の線形結合と誤差で表されるとするモデルである．よく知られた時系列データに対する自己回帰モデルが過去の時点のみを近傍とするのに対し，同時空間自己回帰モデルは，前後左右の全方向の地点を近傍に含みうるものであり，そのため尤度関数の直接の評価が難しい．本論文では，計算が容易な近似対数尤度を提案し，導かれる推定量が一致性，漸近有効性，漸近正規性を持つことを証明している．また，パラメータの同定可能性について明らかにし，同時空間自己回帰モデルの本質的な難しさを示している．

第一章は序論であり，空間データと同時空間自己回帰モデルを紹介したのち，同時空間自己回帰モデルのパラメータ推定に関連する既存の研究を概説している．また，同時空間自己回帰モデルにおける弱定常性の必要十分条件について議論し，証明を与えている．第二章では，弱定常性と正規性の仮定のもとでの同時空間自己回帰モデルに対する近似対数尤度とそれに基づく推定量を提案している．この近似対数尤度の特徴の 1 つは，観測値から誤差への変換行列に巡回性を導入することにより，近似自己共分散行列が容易に計算できることである．そのため，近似対数尤度の計算はスペクトル密度を利用せず行列演算のみで行うことができ，パラメータ数が多くても計算の複雑さが増すことはない．提案する近似対数尤度のもう 1 つの特徴は，観測値の二次形式に縮小因子を導入したことである．これによりこの近似対数尤度の最大化によって得られる推定量が一致性，漸近有効性，漸近正規性をもつことが証明されている．数値実験では，独自に開発した乱数生成法により生成したデータに対して，従来の推定法と提案法による推定値を求めて比較し，提案手法は比較的少数のデータでもより精度のよい推定が得られることを示している．第三章は，同時空間自己回帰モデルの同定可能性について議論している．時系列データに対する自己回帰モデルの場合とは異なり，同時空間自己回帰モデルにおいては，異なる複数のパラメータ値が同じスペクトル密度関数を持つこと，つまりは，最尤解が複数存在することを示している．さらに，最尤解が重複度を持つときには，フィッシャー情報量行列が非正則になり，パラメータが推定不可能となることを証明している．また，フィッシャー情報量行列が正則となるための必要十分条件も導出している．第四章は総括であり，本論文の結果をまとめるとともに，その結果に関連した残されたいくつかの課題について述べている．

以上のように，本論文において力丸君は，厳密な尤度評価が難しい同時空間自己回帰モデルに対して，計算が容易な近似対数尤度と一致性，漸近有効性，漸近正規性を満たす推定量を提案し，また，同定可能性という同時空間自己回帰モデルの本質的な問題点を明らかにしている．これらの成果は、現象の記述としては自然だが厳密な解析は難しいとされてきた同時空間自己回帰モデルの応用の可能性を広げるものとして高く評価される．以上の理由により、本論文の著者は博士(理学)の学位を受ける資格があるものと認める．

# 内容の要旨

| 報告番号 | 甲　第4751号 | 氏　名 | 山田　雄基 |
|---|---|---|---|

主 論 文 題 名 ：

Sensorless Cutting Force Estimation in Ball-screw-drive System and Its Application to Chatter Avoidance

（ボールねじ送り駆動系におけるセンサレス切削力推定とびびり振動回避への応用）

近年、マスカスタマイゼーションに対応するため、生産システムの柔軟性とロバスト性に対する要求が一層高まっており、工作機械分野においては異常加工検知や加工最適化に必要不可欠な状態監視技術と、それに基づく安定化技術が求められている。状態監視において、低コストで持続可能性のある付加的なセンサを用いない切削力推定技術に対するニーズは高いが、推定精度・帯域の点で課題を残す。本研究は、ボールねじ送り駆動系を対象としたセンサレス切削力推定手法と推定切削力に基づきびびり振動を回避する安定化加工法の開発を目的とする。

第1章では、切削加工時における異常監視・回避技術と本研究の目的を示している。

第2章では、複数エンコーダを利用した2つのセンサレス切削力推定手法を提案している。マルチエンコーダ型外乱オブザーバを応用した切削力推定手法は、多慣性系の運動方程式に基づく推定手法であり、ステージ位置に応じて変動する剛性値に依存しない力推定を実現できる。モード分解型の切削力推定手法では、送り軸の運動を剛体モードと、機械要素間の相対運動に基づく振動モードの2つに分解し、各モード空間上で切削力推定を行う。

第3章では、切削力推定性能を評価するシミュレータと実験装置を説明している。また、切削力推定の誤差因子となる外力の位置依存性や、外力や位置/角度変動を波長領域で解析した結果に基づき、これらの補償方法を検討している。

第4章では、センサレス切削力推定における誤差因子の影響を評価している。具体的には、推定手法の違いや質量値の同定誤差、位相遅れ要素に起因する同期誤差、角度計測時の量子化誤差の影響をシミュレーションとエンドミル加工試験により評価している。上記の誤差因子を考慮した切削力推定システムを構築することにより、提案したマルチエンコーダベースの推定手法は、モータの電流参照値と回転角度を利用した外乱オブザーバを適用した従来手法よりも切削力の推定帯域が向上することを実験的に示している。

第5章では、モード分解型の切削力推定手法、特に振動モードでの切削力推定の有用性を評価している。回転ー並進間の相対運動を利用することで、切削力の送り方向成分だけでなく、静止摩擦力を下回る直交方向成分も含めた切削力推定が実現できることを実験的に示している。

第 6 章では、推定切削力を応用したパラレルターニングのためのびびり振動監視/回避手法を提案している。提案手法は、びびり周波数と主軸回転数から求められる最適ピッチ角差で加工することによりびびり振動を回避する。推定切削力に基づきびびり周波数を計測することで、センサレスかつ実加工中にびびり振動回避ができることを実験的に示している。

第 7 章では、結論として本研究で得られた成果を総括し、今後の展望について言及している。

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第 4751 号 | 氏　名 | 山田　雄基 |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学准教授 | 博士（工学） | 柿沼　康弘 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 青山　英樹 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 村上　俊之 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 閻　紀旺 |

学士(工学)，修士(工学)山田雄基君提出の学位請求論文は「Sensorless Cutting Force Estimation in Ball-screw-drive System and Its Application to Chatter Avoidance」（ボールねじ送り駆動系におけるセンサレス切削力推定とびびり振動回避への応用）と題し，7 章から構成されている．

近年，マスカスタマイゼーションに対応するため，生産システムの柔軟性とロバスト性に対する要求が一層高まっており，工作機械分野においては異常加工検知や加工最適化に必要不可欠な状態監視技術と，それに基づく安定化技術が求められている．状態監視において，低コストで持続可能性のある付加的なセンサを用いない切削力推定技術に対するニーズは高いが，推定精度・帯域の点で課題を残す．本論文の著者は，ボールねじ送り駆動系を対象としたセンサレス切削力推定手法と推定切削力に基づきびびり振動を回避する安定化加工法を提案し，シミュレーションと実験によりその有用性を明らかにしている．

第 1 章は序論であり，本研究の位置づけと工作機械における状態監視・異常加工回避技術の課題について概説し，本研究の目的を述べている．

第 2 章では，複数エンコーダを利用した 2 つのセンサレス切削力推定手法を提案している．第 1 の手法は，多慣性系の運動方程式に基づくマルチエンコーダ型外乱オブザーバを応用したものであり，ステージ位置に応じて変動する剛性値に依存することなく切削力推定できることを示している．第 2 の手法は，モード分解型の切削力推定手法であり，送り軸の運動を剛体モードと，機械要素間の相対運動に基づく振動モードに分解し，各モード空間上で切削力を独立に推定できることを示している．

第 3 章では，切削力推定性能を評価するシミュレータと実験装置を説明している．また，切削力推定の誤差因子となる外力の位置依存性，外力の周期変動，内挿分割に伴う位置/角度変動を補償する方法を検討している．

第 4 章では，センサレス切削力推定における誤差因子の影響を評価している．具体的には，推定手法の違いや質量の同定誤差，位相遅れ要素に起因する同期誤差，角度計測時の量子化誤差の影響をシミュレーションとエンドミル加工試験により評価している．提案したマルチエンコーダベースの推定手法は，モータの電流参照値と回転角度を利用した外乱オブザーバを適用した従来手法よりも切削力の推定帯域が向上することを実験的に示している．

第 5 章では，モード分解型の切削力推定手法，特に振動モードでの切削力推定の有用性を評価している．回転－並進間の相対運動を利用することで，切削力の送り方向成分だけでなく，静止摩擦力を下回る直交方向成分も含めた切削力推定が実現できることを実験的に明らかにしている．

第 6 章では，推定切削力を応用したパラレルターニングのためのびびり振動回避手法を提案している．推定切削力に基づき計測したびびり周波数と主軸回転数から導出される最適ピッチ角差で加工することにより，実加工中にびびり振動を自律的に回避できることを実験的に確認している．

第 7 章は結論であり，得られた成果を総括し，今後の展望について述べている．

以上要するに，本論文は，ボールねじ送り駆動系の工作機械におけるセンサレス切削力推定手法および複数工具同時加工における安定化加工法を開発したものであり，生産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.4752 | Name | BORROMEO, Ria Mae Harina |
|---|---|---|---|
| Thesis Title | Process-Based Quality Control Techniques in Crowdsourcing | | |

Crowdsourcing has become a popular approach to complete tasks that are tedious using manual methods or difficult for automatic ones. As crowdsourcing taps the capacities of humans, its possibilities are endless. However, the unpredictability of human behavior and the actuality of human error make it difficult to consistently achieve high-quality outcomes, posing quality control as a major challenge in crowdsourcing. Although many strategies have been proposed to optimize data quality, their effectiveness is dependent on each particular crowdsourcing application. To solve this, more techniques and experiments from which humans and algorithms can learn from are needed to be able to build a recommendation system that proposes quality management techniques depending on the attributes of the crowdsourcing application.

In this dissertation, I approach quality management in crowdsourcing based on the sub-processes involved, specifically: task design, task deployment, and task assignment. I first experimented on factors affecting task design. In particular, I tested the effect of task complexity on a data extraction task and crowd type on a sentiment analysis task. Experiments show that there is no significant difference in the quality achieved from simple and more complex versions of a data extraction task and that the performance of paid unpaid workers are comparable in a sentiment analysis task.　For task deployment, task deployment strategies were proposed along three dimensions: work structure, workforce organization, and work style. To semi-automatically implement these strategies in a crowdsourcing platform, a deployment tool was designed and developed. The effectiveness of the strategies when applied to text creation tasks were then studied and recommendations were drafted for both crowdsourcing researchers and practitioners.

Finally, for task assignment, a fuzzy clustering-based method for building a personalized summary of tasks, also known as composite tasks, for crowd workers was validated. As observed from the experiments, personalization improves the workers' overall experience and that diversifying tasks can improve the workers' output quality.

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第4752号 | 氏　名 | BORROMEO, Ria Mae Harina |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学准教授 | 博士（工学） | 遠山　元道 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 理学博士 | 藤代　一成 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 高田　眞吾 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 小原　京子 |
| | | 慶應義塾大学准教授 | 博士（工学） | 篠沢　佳久 |
| | | フランス国立科学研究センターディレクター Ph.D Sihem Amer-Yahia | | |

理学士、修士（工学）、Ria Mae Harina Borromeo 君提出の学位請求論文は「Process-Based Quality Control Techniques in Crowdsourcing（クラウドソーシングにおけるプロセスベースのデータ品質管理手法）」と題し、全6章からなる。本論文は、人間・機械系であるクラウドソーシングにおいて、人間による作業の不確実性、不均一性の影響を受ける処理結果のデータ品質を適切な水準に保つための手法について、プロセスの各段階におけるモデルおよび改善手法の提案と、実験による検証について述べたものである。

第１章は序論であり、クラウドソーシング基盤の現状とデータ品質に関する問題点を含む、本論文の背景と目的を述べている。

第２章ではクラウドソーシングプロセスの５段階、すなわちタスク設計、タスク配備、タスク割当て、タスク実行そして結果集計の各々に対し、既存の品質管理手法を分類し、分析している。

第３章ではクラウドソーシングにおけるタスク設計の段階について、データ品質管理に及ぼす影響について実験を行っている。実験は、タスクの複雑度と、クラウドのタイプの２要素に着目し、これらの結果品質に及ぼす影響を調査している。クラウドのタイプは Amazon Mechanical Turk に代表される報酬型と、Pybossa 等に代表される無報酬型の２分類である。これらについて、データ抽出タスクと極性判定タスクに関する実験を行い、観察している。

第４章では、文章生成タスクを題材として、タスク配備段階のモデルを提唱し、これのデータ品質に及ぼす影響を検証している。このモデルは他に類例を見ないもので、タスクをクラウド（人力）のみで行うか、アルゴリズムとのハイブリッドで行うかの２分類、直列か並列かの２分類、協力か独立かの２分類の直交的な組み合わせからなる。この実験を行うために、複雑なタスク配備を半自動化するためのツール CDeployer を開発して用いている。

第５章はタスク割当てに関し、個々の作業者の特性に着目し、ファジークラスタリングの応用によって複数のタスクをまとめて割当てるコンポジットタスク手法を提案し、実験によってその効果を検証している。

第６章は本研究で得られた内容を総括し、結論するとともに、今後の展望を述べている。

本研究で対象としているクラウドソーシングは、アルゴリズムで対処することの難しい認識や判断について、多数の人間の作業を統合する基盤である。その効果と有用性は過去１０年超の実績によって証明されているが、多くの人間による作業を統括することから必然的に処理結果のデータ品質についてのばらつきや信頼性の低下が問題となり、その改善について多くの研究が行われている。本研究では、クラウドソーシングの基本的なプロセスを５つのサブプロセスに分解し、その最初の３段階における品質改善手法を提案し、実験によってその効果を確かめている。特に第４章で述べているタスク配備における直交的モデルの提案とそれを実施するための CDeployer ソフトウェアの開発、および第５章で述べているコンポジットタスク手法は著者の独創的な提案であり、実験で確認された効果と共に幅広い応用分野において工学上寄与することが大きいことが示されている。スーパーグローバル事業で招聘されたこの分野の先端的研究者である Sihem Amer-Yahia のグループとの共同研究において、これらの成果は著者が中心となって得たものであり、自立して研究活動を行うために必要な高度な研究能力、並びにその基礎となる豊かな学識を有することを示したと言える。

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.4753 | Name | ROUZIER, Baptiste Michel |
|---|---|---|---|
| Thesis Title<br>Cruising Control of Electric Vehicle Using Situation Transition Based Driving Assistant | | | |


The increase of the number of cars registered around the world created several problems such as environment concerns or road traffic deaths. This thesis aims at proposing solutions to the road fatalities by using active driving assistance and remote control of road vehicles. The active driving assistant acts by offering an automated support to the human driver through torques on the pedal and steering wheel of the controlled vehicle. This support has a better reaction time and is not subject to focus loss. Application of remote control enables to shorten the duration of continuous driving sessions and to reduce the exhaustion of the driver. However remote control implies a communication time delay that can be a source of accidents. This is the reason why this thesis proposes a combination of remote control and active driving assistant that can react to the controlled vehicle's surrounding without time delay.

Chapter 1 presents the motivations of the thesis, the principle of the proposed driving assistant, and outlines some related works and the framework of this thesis.

Chapter 2 describes the methods used to analyze the car's environment to detect and locate possible threats. Several types of objects are detected through the use of a stereo camera system and different computer vision processes, which combination is design to improve the quality and speed of the detections. Methods to reach that real-time computation are described. Moreover, an information sharing protocol is also introduced.

In chapter 3, the methods used to compute the assisting torques based on the representation of the detected dangers by virtual potentials are explained. A control sharing is created between the human driver and the automated support. In order to improve the efficiency of the proposed method the effects of both the human and algorithm on the control of the car are modulated thanks to a fuzzy logic engine.

Chapter 4 describes the small and large scale vehicle systems used to validate the proposed method. A one seated electric vehicle was modified to enable the application of both driving assistant and remote control. This vehicle is used to test the behavior of the driving support in case of line crossing. However, it would be dangerous to test collision avoidance using a vehicle of this size and mass under remote control with time delay. That is why a 1/10th scale car is used to conduct those tests.

The results of the conducted experiments are analyzed in chapter 5, in order to verify if the proposed driving assistant offer the desired behavior. Moreover, it is difficult to choose evaluation criteria able to sort different propositions of driving assistant in function of their efficiency. This is why a method is proposed to realize such evaluation depending of the desired goal of the driving assistant.

Chapter 6 concludes the thesis, summarizes its results and contributions, and proposes possible directions for future work.

# 論文審査の要旨

| 報告番号 | 甲　第 4753 号 | 氏　名 | ROUZIER, Baptiste Michel |
|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 論文審査担当者： | 主査 | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 村上　俊之 |
| | 副査 | 慶應義塾大学教授 | 工学博士 | 大西　公平 |
| | | 慶應義塾大学准教授 | 博士（工学） | 矢向　高弘 |
| | | 慶應義塾大学教授 | 博士（工学） | 西　宏章 |

学士（工学），修士（工学） ROUZIER, Baptiste Michel 君提出の学位請求論文は「Cruising Control of Electric Vehicle Using Situation Transition Based Driving Assistant」（状況変遷型運転支援による電気自動車の走行制御）と題し，6 章から構成されている．

世界各国において車社会が定着し車の利用台数が増加している現在において，環境保全や交通事故回避等は社会的な重要課題となっている．本研究では，遠隔操作を含めた電気自動車走行の安全性向上を目指し，周囲環境認識に基づいたポテンシャルフィールドを用いた運転支援制御の構築法を提案している．提案する運転支援制御においては，周囲環境の認識情報に応じて生成されたポテンシャルフィールドに基づき，ペダルおよびステアリングホイールの制御トルクを調整することによって，ドライバーへの危険提示と同時に操作の自動支援を実現している．そのため，ドライバーへの良好な操作誘導が運転時の集中力低下を招くことなく実現できる．さらに，提案手法の遠隔操作システムへの拡張応用では，操作者の操作負担を低減することも可能であり，遠隔操作において致命的となる通信遅延による操作の不安定化も改善できることを示している．

第 1 章では，本研究の目的を述べ，関連研究と本研究の位置付けを概説している．

第 2 章では，提案する運転支援制御の基礎理論を示し，さらに自動車走行時の周囲環境の危険性を特定化するための環境分析手法を説明している．特に，ステレオカメラを用いたコンピュータビジョンの処理プロセスにより，障害物を中心とした複数オブジェクトのタイプ検出を行い，さらにポテンシャルフィールドを考慮したこれらの統合化による環境認識システムの構築手法を提案している．また，リアルタイム検出のための情報共有プロトコルも導入している．

第 3 章では，検出されたオブジェクトに基づいたポテンシャルフィールドの生成法を示し，運転支援制御への適用手法を提案している．また，ドライバーおよび運転支援制御による操作入力を，トルク次元において適切に融合するため，ファジー論理に基づいた融合手法を示している．ファジー論理に含まれるパラメータを調整することで，遠隔操作を含めた多様な状況での運転支援制御が可能となり，これは提案手法の特徴の一つともなっている．

第 4 章では，提案手法を検証するにあたって利用した実機実験システムの構成を示している．一人乗り電気自動車において，運転支援制御と同時に遠隔操作も可能なシステムとするため，ステアバイワイア機構による実機構築を行っている．本実機電気自動車では，提案手法による車線変更時の運転支援制御を検証しその有効性を確認している．また，障害物回避の検証においては実験時の危険性を考慮し，1/10 スケールの小型車を利用した実験を行い，通信遅延が発生する場合においても安全な操作が行えることを実証している．

第 5 章では，提案する運転支援制御を適用した際のドライバーの操作において，運転操作の誘導に関連する評価指標を示し，その操作評価を行うことで提案する運転支援制御の有効性を確認している．また，多様な状況に応じた適切な評価指標の調整手法も示している．

第 6 章では結論を述べ, 得られた成果の重要な貢献を要約し, 今後の展望について総括している．

以上要するに，本論文の著者は，遠隔操作を含めた電気自動車の運転支援制御において，ドライバーとの親和性および周囲環境を考慮した安全性，操作性の向上手法を示し，実機実験によりその有効性を実証したもので，これらの研究は自動車の安全走行に配慮したメカトロニクス技術応用分野において，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．

2017（平成29）年9月までの新制博士学位授与者数は次のとおり。

| 学位の種類 | 課程修了によるもの<br>(課程博士・・・・・甲) | 論文提出によるもの<br>(論文博士・・・・・乙) | 計 |
|---|---|---|---|
| 工学博士 | 451 | 389 | 840 |
| 博士（工学） | 1,316 | 314 | 1,630 |
| 理学博士 | 26 | 8 | 34 |
| 博士（理学） | 364 | 49 | 413 |
| 学術博士 | 0 | 1 | 1 |
| 博士（学術） | 1 | 1 | 2 |
| 計 | 2,158 | 762 | 2,920 |

本書に記載した論文審査担当者の所属および職位は2017（平成29）年度春学期のものである。


2017(平成29)年12月1日　発行

発行者　　理工学部長　伊藤 公平

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