

# 博士學位論文

内容の概要及び審査の結果の要旨

第 20 号

2018 年 3 月

光産業創成大学院大学

はしがき

本編は学位規則(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、2018年3月に本学において学位を授与した者の論文内容の概要及び論文審査の結果の要旨を収録したものである。

学位記番号に付した甲は学位規則第4条第1項(いわゆる課程博士)によるものであり、乙は学位規則第4条第2項(いわゆる論文博士)によるものであることを示す。

## 目 次

学位番号	学位の種類	氏名	論文題目	頁
甲第 37 号	博士(光産業創成)	松井信二郎	ULEB照射源の販売事業拡大のための線量測定技術開発と製品開発プロセスの分析	3
甲第 38 号	博士(光産業創成)	木島 宏樹	顕微鏡3次元トラッキングシステムの開発と製品開発プロセスの省察的分析	7

氏名	松井信二郎
学位の種類	博士(光産業創成)
学位記番号	甲第37号
学位授与年月日	平成30年3月20日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	ULEB照射源の販売事業拡大のための線量測定技術開発と 製品開発プロセスの分析
論文審査委員	主査 准教授 内藤康秀 准教授 横田浩章 准教授 森 芳孝

### 論文の概要

本論文は、超低エネルギー電子線 (Ultra-Low energy Electron Beam : 以下ULEBと略記) 照射源の販売事業拡大のための線量測定技術開発とその経営学的分析の研究であり、全7章で構成されている。

第1章では、本研究の社会的背景、研究動機および課題設定に至るまでの概要について述べている。第2章では、著者所属企業Q社がULEB照射源の販売事業を始めるに至った背景、および本研究が対象とする技術的課題設定の過程を述べている。第3章では、電子線の工業利用における線量測定技術について述べている。第4章及び第5章で、査読付論文として学術雑誌に掲載された本論文の中心となる成果を述べている。

第4章では、市販のラジオクロミックフィルム線量計FWT-60-810の応答を、2 MeV電子線照射で校正して得た応答関数を用いて評価し、加速電圧50 kV、および70 kVのULEB照射に対し適用した。基準線量計に対するフィルム線量計の応答関数の不確かさは11%の範囲内に収まっていた。この応答関数を用いた結果、ラジオクロミックフィルム線量計の相対的エネルギー付与量が、10 kGyから100 kGyの範囲でフィルム応答との線形性をもって推定することができることを明らかにした。また、モンテカルロシミュレーションコードPENELopeによって計算された線量計へのエネルギー付与量を評価した結果、ULEB線量測定においても高エネルギー電子線の場合と同様にPENELopeが有効であることを示した。この結果により、高エネルギー電子線で得たラジオクロミックフィルム線量計の応答関数を用いることで、ULEBの線量測定が測定不確かさの範囲内で相対的に評価可能であり、工業用ULEBプロセスの設計段階でPENELopeが使用できることを示している。これらの成果は、米国物理協会のReview of Scientific Instruments誌に掲載された。

第5章では、第4章の成果を発展させている。加速電圧43 kVから70 kVまでのULEB線量測定において、高エネルギー電子線で校正されたFWT-60線量計の吸収線量に、PENELopeで計算された深度線量分布を適用することで、線量計内部の厚さ領域における相対的な線量分布を求めることができることを示している。この手法を工業用プロセスに応用するこ

とで、ULEB照射プロセスの特徴である表面数ミクロンの線量評価が市販の線量計で可能になると述べている。さらに、本手法により、プロセスにおける材料改質の任意厚さ評価が可能になると言及している。これらの成果は、エルゼビアグループのRadiation Physics and Chemistry誌に掲載された。

第6章は、販売事業拡大のための経営学的分析について述べている。著者所属企業の限られた知見と情報収集に基づいて手探りの状態で始めた未知の分野での新規事業が、どのようなプロセスを辿ってきたかを定性的に記述し、そこで起きた紛糾とその原因となった不確実性を明らかにすることによって、今後の事業開発における不確実性を回避するための仮説を提案している。その仮説とは、「新規事業における新製品開発では、製品開発プロジェクトの初期の時点で、開発者と、その製品が完成し利用されるまでに関係するすべての部署の関係者が開発者とコミュニケーションを行った上で製品開発を進めて行くこと」により、予期せぬ紛糾による製品開発プロセスの攪乱を低減することができるのではないかというものである。

第7章は本論文全体の結論を述べている。上記研究によって、今後市場の拡大が見込まれている工業用 ULEB 照射プロセスの設計・評価技術を確立したことで、ULEB 照射線源の普及を加速させるための技術的基盤が構築されたと述べている。さらに、経営学的分析にもとづいて導きだした仮説とその検証を継続することで、新規事業推進の効率向上とイノベーション創出に貢献できると述べている。最後に、ULEB 照射源の応用分野を拡大し、その販売事業を継続していくことは、新しい光産業を創成していくことであると唱えている。

### 審査結果の要旨

本論文は、超低エネルギー電子線 (Ultra-Low energy Electron Beam : 以下ULEB) 照射源の販売事業拡大のための線量測定技術開発及びその経営学的分析の研究成果を述べたものである。

近年、エネルギー70 keV以下のULEBが注目されている。ULEBは、照射源が従来設備と比較して大幅に軽量かつコンパクトであること、また、表面数ミクロンから数10ミクロンレベルの薄膜加工に適用できることから、大量生産のための製造ラインを備えた薄膜加工現場への導入が待ち望まれている。ULEB照射源を広く産業に普及させるためには、ULEB照射の特性に対応した吸収線量測定技術が求められる。一方、研究開始当初は、工業応用に適用可能な手法で、正確に測定・管理できる技術が確立されていなかった。

これらの課題に対し、申請者は、Review of Scientific Instruments誌に掲載されたように、高エネルギー電子線で得た市販のラジオクロミックフィルム線量計の応答関数を用いることで、ULEBの線量測定が測定不確かさの範囲内で相対的に評価可能であり、工業用ULEBプロセスの設計段階でモンテカルロシミュレーションコードPENLOPEが使用できること

を示した。さらに、この成果を発展させ、Radiation Physics and Chemistry誌に掲載されたように、高エネルギー電子線で校正されたFWT-60線量計の吸収線量に、PENELOPEで計算された深度線量分布を適用することで、線量計内部の厚さ領域における相対的な線量分布を求めることができることを示した。この手法を工業用プロセスに応用することで、ULEB照射プロセスの特徴である表面数ミクロンの線量評価が市販の線量計で可能になること、また、プロセスにおける材料改質の任意厚さ評価が可能になると結論づけている。

次に、販売事業拡大のための経営学的分析については、これまでの事業拡大のプロセスを定性的に記述し、そこで起きた紛糾とその原因となった不確実性を明らかにすることによって、今後の事業開発における不確実性を回避するための仮説を見出している。

本研究によって初めて、ULEBの線量評価に市販の線量計を適用できることが明らかにされた。その新知見に基づき複雑なULEB照射プロセスの解析の手段を得たことの学術的意義はきわめて大きい。さらに、ULEB照射源の普及を妨げていた最大の課題について解決の糸口を見出したことの産業的価値は非常に高く、博士（光産業創成）の学位にふさわしい内容である。

学術業績は、在学中に筆頭著者としての査読付論文が上記の2報ある。また、本研究に直接関係する在学中の特許出願等はないが、申請者の所属企業を交えた知財戦略についての検討が適切に為されている。

公聴会では、技術・ビジネス両面の多岐にわたる質問に対して適切に対応し、論文執筆及び公聴会での質疑応答における論理構成能力は、博士の学位に値する学力ありと判定した。

氏名	木島宏樹
学位の種類	博士(光産業創成)
学位記番号	甲第 38 号
学位授与年月日	平成30年3月20日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	顕微鏡3次元トラッキングシステムの開発と製品開発プロセスの省察的分析
論文審査委員	主査 教授 瀧口義浩 教授 増田 靖 准教授 石井勝弘

### 論文の概要

本学位論文の目的は、顕微鏡 3 次元トラッキングシステムを開発することと、新製品開発プロセスの省察的分析により効率的な製品開発マネジメントに関する知見を得ることである。顕微鏡 3 次元トラッキングシステムの開発では、非点収差法とプロファイルセンサを組み合わせた新しい手法を提案し、広い検出範囲にわたる高速かつリアルタイムの 3 次元位置検出を可能とした。同時に、顕微鏡画像による CamShift 法を用いた簡易トラッキング装置の開発も併せて行い、2 種類のトラッキングシステムの試作製品を完成させた。一方、新製品開発プロセスの省察的分析から、派遣される個人への提言と個人を派遣する組織への提言を示した。

第 1 章では、博士研究の背景として、顕微鏡トラッキングシステムの開発背景と、顕微鏡トラッキングの現状を述べた後、本論文の目的を示した。

第 2 章では、筆者が所属する企業のバイオ関連システム製品、光学顕微鏡の市場、既存の顕微鏡トラッキング製品、観察対象の各分析を行った。これらの分析を基に、①顕微鏡は既存製品を使用する、②自社駆動ユニット製品を積極的に採用する、③ユニット化して自社既存製品との接続を柔軟にする、④競争力のある価格帯で販売する、の 4 つの開発基本方針を定め、開発する製品のコンセプトを決定した。具体的には、安価な低速検出ユニットと高速トラッキングに対応できる検出ユニット、および駆動ユニットを統合する制御ソフトウェア開発をすることとし、駆動ユニットは所属企業の既存製品を採用することとした。

第 3 章では、カメラ画像と PC による画像処理を用いた簡易かつ安価な低速位置検出ユニットの開発に関して述べた。位置検出方法は、色情報を基に対象を自動認識する CamShift 法を用いた。直径 5~10 $\mu$ m の酵母菌を観察対象とした評価を行った結果、ゆっくりと移動する観察対象の長時間トラッキング用途には十分対応できることを確認した。

第 4 章では、非点収差法とプロファイルセンサを用いた高速位置検出ユニットの開発結果をまとめた。プロファイルセンサチップ制御回路、電子回路基板、PC 通信用ファームウ

エア、FPGA 演算回路のプログラム、外部機器信号出力インターフェイスを組み込んだプロファイルセンサモジュールを製作した。さらに観察対象への照明と結像光学系、および機構設計を行い、高速位置検出ユニットを試作した。ここで提案した手法は、簡易な方法で広い範囲にわたり観察対象の3次元位置を検出可能であり、最大 3.2kHz のデータ取得レートを有する。位置検出性能を評価した結果、 $-90\mu\text{m} < X < 90\mu\text{m}$ 、 $-90\mu\text{m} < Y < 90\mu\text{m}$ 、 $-9\mu\text{m} < Z < 9\mu\text{m}$  の範囲で直径  $45\mu\text{m}$  のポリスチレンビーズの3次元位置の検出が可能であった。

第5章ではシステムの制御ソフトウェアを開発し、第4章で開発した高速位置検出ユニットと自社駆動ユニットを統合し、顕微鏡3次元トラッキングシステムを完成させた。動きを制御したポリスチレンビーズでトラッキング性能を確認した。また、水中を浮遊する直径  $10\mu\text{m}$  のポリスチレンビーズの40分間のトラッキングを実証した。提案した手法は、クラミドモナスのような単純な球状の観察対象、蛍光タンパク質、蛍光ビーズおよび量子ドットなどへ適用可能であり、さらに、蛍光マーカを付着させることにより任意形状の観察対象にも適用可能であることを述べている。

第6章では、より効率的な新製品開発マネジメントに関する知見を得るため、第2章から第5章までの本学で実践した顕微鏡3次元トラッキングシステムの開発プロセスを省察的に分析し、それをセルフエスノグラフィーとして描き出した。「出身組織から離れて外部組織へ長期派遣される個人の動機づけはどのようにして形成され、変容していくのか」と「外部組織で遂行する自身のプロジェクトに対し、他者を円滑に参画させていく要因はどのようなものが考えられるか」という効率的に製品開発をマネジメントするためのリサーチ・クエストを設定し、内発的動機づけ理論、対話理論、実践共同体の諸概念を用い分析を行なった。1つ目のリサーチ・クエストに対する分析からは、内発的に動機づけられた者は他者への説得にも確かさと力を伴うことが明らかとなった。2つ目のリサーチ・クエストに対する分析からは、情報の密度と他者を説得する力がチームづくりの鍵となることが分かった。またこれらの知見に関して、今後の社会実装化を意図して個人と組織へ提言を行った。

第7章では本学位論文の成果をまとめ、また今後の展望についても合わせて述べている。

### 審査結果の要旨

本論文の新規性は、顕微鏡3次元トラッキングシステムのための非点収差法とプロファイルセンサを組み合わせた新しい3次元位置検出手法である。既存の顕微鏡3次元トラッキングシステムでは、高速度カメラと高速画像処理回路を用いて観測対象の3次元位置をリアルタイムに推定し、アクチュエーターへフィードバックを行う。この手法は高速な3次元位置検出が可能であるが、高価なシステムとなる。また、奥行方向の位置決定には、複雑な画像処理が必要となる。そこで、筆者は非点収差法を用いた3次元位置検出手法を採用した。



この手法は球形物体の像の非点収差による形状と位置の変化から、簡単な方法で3次元位置の検出が可能である。光の検出には通常4分割フォトダイオードが用いられるが位置検出範囲が狭く、顕微鏡トラッキングシステムにそのまま採用することは困難であった。そこで、検出にプロファイルセンサを用いることで広範囲にわたる3次元位置検出を可能とした。プロファイルセンサから出力されるXYZ方向への射影強度プロファイルのピーク位置とピーク値の4つの情報だけで観測対象の3次元位置の検出が可能となり、簡単な処理回路でリアルタイムの位置検出が可能となった。試作した位置検出ユニットの位置検出レートは3.2kHzであり、既存製品のそれを上回る性能を有している。この成果をまとめた論文は、日本光学会のOptical Reviewに受理されている。

事業実践では以下の成果を上げている。まず、所属企業のバイオ関連システム製品、光学顕微鏡の市場、既存の顕微鏡トラッキング製品、観察対象の各分析を行い、高価である既存製品と差別化し、市販の顕微鏡と所属企業の既存駆動ユニットを利用できるようにし、観察対象に応じて性能を選べるようにするという理由で、機能と性能別のユニットとして数種類のシステムを開発する方針を決めた。具体的には、カメラ画像とPCによるCamShift法を用いた簡易かつ安価な低速位置検出ユニット、および非点収差法とプロファイルセンサを用いた高速位置検出ユニットの2種類を開発し、これらに対応した個別の制御ソフトウェアの開発を行い、顕微鏡3次元トラッキングシステムとして組み上げ試作製品を完成させている。

さらに、博士研究で行った製品開発プロセスを今後活かすために、開発プロセスを省察的に分析し、今後の社会実装化を意図して個人と組織へ提言を行った。

本論文に関する学術研究成果としては、Optical Review に受理された査読付き論文1編と、国際会議European Conference of Biomedical Optics 2017と The Twelfth Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering (OIE17)の発表に伴うプロシーディングス2件がある。

本論文に関する公聴会においては、本成果を適切にまとめ発表を行い、すべての質疑に対する的確に回答した。

以上のことより、審査委員会は、本論文が本学の学位規則及び関連する内規等の基準を満たしていることを確認し、全員一致で博士（光産業創成）の学位授与に値すると判定した。