

博士論文

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

2018 年 3 月

光産業創成大学院大学

光産業創成研究科

木島宏樹

## 要旨

# 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

本論文の目的は、顕微鏡 3 次元トラッキングシステムの開発と、より効率的な新製品開発マネジメントに関する 2 つの新規知見を得ることである。

まず、第 1 の目的である顕微鏡 3 次元トラッキングシステムの開発のため、非点収差法とプロファイルセンサを組み合わせた顕微鏡観察対象の新しい 3 次元位置検出技術を提案した。この手法は、観察対象は球形の単純な形状に限定されるが、従来のトラッキング技術と比べて、高速かつリアルタイムの 3 次元位置検出を広い検出範囲で可能とする。この提案手法を用いた位置検出ユニット、およびその統合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を完成させた。

筆者は光学精密機器メーカーに所属し、バイオ関連システム製品の設計・開発を行ってきた。昨今、光学顕微鏡市場の飽和、競合メーカーの市場進出、など多数の要因でその売上の伸び悩みが目立ち始めていた。このような状況下、筆者は「顕微鏡 3 次元トラッキングシステム」の開発を目的として光産業創成大学院大学（以下、光産創大）に派遣されることになり、対応するビジネスプランを作成し、それによる受験を行った結果、入学の許可を得た。

本論文では、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った。これらの分析を基に製品コンセプトを決定し、次の 4 つの基本方針で開発を開始した。すなわち、①顕微鏡は既存製品を使用、②自社駆動ユニット製品を積極的に採用、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、である。顕微鏡 3 次元トラッキングシステムは、観察対象を認識しその位置情報を推定する「検出ユニット」と、顕微鏡の視野とピントを調整する「駆動ユニット」、そして 2 つを統合して制御しトラッキングを行う「制御ユニット」で構成される。駆動ユニットは筆者の所属企業が保有する既存製品を採用する。性能の異なる複数の検出ユニットと制御ユニットを新しく開発する。これによって、顧客ニーズに応じてユニット選択ができるようになり、競争力のある価格帯での販売が可能となる。具体的には、低速かつ安価な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した。

はじめに、カメラ画像とコンピューター（PC）を用いた画像処理による簡易的な位置検出ユニットを開発した。色情報を基に観察対象を自動認識する CamShift 法を用いた位置検出ソフトウェアを開発し、実装した。直径  $\phi 5 \sim 10 \mu\text{m}$  の酵母菌を観察対象とした実験を行い、トラッキング機能の確認を行った。移動速度が低速である観察対象の場合は、位置検出から駆動系へのフィードバック制御には高速応答性能は要求されないため、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と考えられる。

次に、非点収差法とプロファイルセンサを用いた位置検出技術の開発を行った。非点収差法は、簡単に観測対象の3次元位置を検出することができる。またプロファイルセンサは、高速カメラ相当の最大3.2kHzのデータ取得レートで投影プロファイルデータを出力する高性能のCMOSイメージセンサである。この2つを組み合わせることで、観察対象の3次元位置を広い検出範囲で簡易かつ高速で検出できる。プロファイルセンサチップ制御回路、電子回路基板、PC通信用ファームウェア、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。その評価実験を行ったところ、 $-90\mu\text{m} < X < 90\mu\text{m}$ 、 $-90\mu\text{m} < Y < 90\mu\text{m}$ 、 $-9\mu\text{m} < Z < 9\mu\text{m}$ の範囲で直径 $\phi 45\mu\text{m}$ のポリスチレンビーズの3次元目標位置の検出と推定が可能であった。

最後に開発したトラッキングシステムを使用して、直径 $\phi 10\mu\text{m}$ のポリスチレンビーズを水中に懸濁させ40分間連続してトラッキングを実証した。提案された方法の使用は、クラミドモナスのような単純な球状の観察対象に限定される。蛍光タンパク質およびビーズおよび量子ドットも適用可能である。蛍光マーカを付着または埋め込むことにより、開発された追跡システムは、任意形状の観察対象にも適用することができる。

第2の目的は、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ことである。光産創大で実践した顕微鏡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。特に分析の中で「動機づけ」と「チーム作り」の2点に着目し、それぞれの点に対してリサーチ・クエスチョンを設定した。分析には、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た。動機づけの観点では、自身が発する言葉には他者への説得力が合わせて求められることが示された。明確な動機づけを有する者、つまり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が伴うことが分かった。また、チームづくりの観点では、情報の密度と他者を説得する力がその鍵となることが示された。すなわち、より濃密なコミュニケーションがそれらを生み出す要因と考えられる。また実践活動を基にした事例から省察的に導かれた知見を、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。

本研究は、所属企業、光産創大を含む外部組織、また関係する個人の支援を受けるかたちで進められた。製品開発では、顕微鏡観察対象の新しい3次元位置検出技術を得ることができた。また製品開発プロセスを省察的に分析したことで、実践活動において成果を上げるには、「内発的動機づけ」が重要であることが示された。今後の製品開発を含む実践活動においては、その内発的に動機づけられた状態を導く「内的説得力のある言葉」に留意していこう。これは、より効率的な製品開発マネジメントの実践であり、ひいては光産創大が目指す光産業創成への貢献につながる活動になると固く信じている。

# Abstract

## **Development of Microscope Three-Dimensional Tracking System and Reflective Analysis of Product Development Process**

The purposes of this thesis are the development of a three-dimensional tracking system for use with optical microscopes and acquisition of knowledge about efficient product development process management.

First, the author proposed a new three-dimensional position detection method using the astigmatic lens method with a profile sensor. The proposed method enables high-speed, real-time three-dimensional position detection within a wider detection area than that of a conventional tracking technique, although the target for observation is limited to having a simple spherical shape. A position detection unit was developed using the proposed method with integrated control software and the unit was assembled for use with a three-dimensional tracking system for optical microscopes.

The author is a member of staff at a precision optical equipment manufacturer and has designed and developed system products related to biotechnology. In recent years, sluggish sales have become more noticeable because of a variety of factors, including saturation of the optical microscope market and the entry of several competitors to an already busy market. Under these circumstances, the author was dispatched to study at the Graduate School for the Creation of New Photonics Industries (GPI) with the aim of developing a "microscope three-dimensional tracking system". The author was admitted to GPI after preparing a business plan and taking the entrance examination.

The author analyzed the company's existing products, the general optical microscope market, other microscope tracking products, and the types of objects to be observed. As a result, the author adopted the following policies for development of the microscope three-dimensional tracking system: 1) a new microscope was not to be developed; 2) a drive unit from an existing product was to be adopted; 3) the developed product was to be unitized to enable connection with existing products; and 4) the product was to be available for sale in a competitive price range. The microscope three-dimensional tracking system is composed of three units: a "detection unit" that recognizes the target to be observed and estimates its three-dimensional position, a "drive unit" that adjusts the field of view and the focus, and the "control unit," which integrates the first two units and executes the tracking procedure. The development procedure adapts the company's existing products. The author developed new detection units with different performance capabilities and a new control

unit. These newly developed units enable selection of units according to an individual user's needs with costs in a competitive price range. Specifically, the author developed a low-speed and low-cost tracking and detection unit, a high-speed tracking and detection unit, and software that integrates and controls both the detection and the drive units.

The author developed a simple position detection unit using camera images and personal computer (PC) image processing software. Position detection software using the CamShift method was implemented to enable automatic recognition of an observation target based on color information, along with a feedback control process for the microscope stage. These units were assembled to produce a simple tracking system. Tracking experiments were carried out using a yeast fungus with a diameter ranging from 5 to 10  $\mu\text{m}$  as an observation target to confirm the accuracy of the tracking performance. For observation of a slowly moving object, high-speed position detection and feedback processes are not required and the slow tracking system is thus useful for applications such as long-term tracking of a slowly moving target.

Next, the author developed position detection units using the astigmatic lens method and a profile sensor. The three-dimensional position of a target under observation can be detected using the astigmatic lens method via simple calculations. The profile sensor is a high-performance complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) image sensor that outputs the required projection profiles at a data acquisition rate of 3.2 kHz. The combination of these two units allows rapid detection of the three-dimensional position of the target under observation over a wide detection range. The author developed a profile sensor module that contained a control circuit composed of a profile sensor chip, PC communication functions, an arithmetic calculation circuit, and a signal output interface to the drive unit. In addition, a prototype high-speed position detection unit with new illumination, imaging optical and mechanical systems was also designed. As a result of experiments using a 45- $\mu\text{m}$ -diameter polystyrene bead as a target, the detection area range parameters were confirmed to be  $-90 \mu\text{m} < X < 90 \mu\text{m}$ ,  $-90 \mu\text{m} < Y < 90 \mu\text{m}$ , and  $-9 \mu\text{m} < Z < 9 \mu\text{m}$ .

Finally, using the developed tracking system, tracking of a 10- $\mu\text{m}$ -diameter polystyrene bead that was suspended in water for 40 min was demonstrated. Use of the proposed method is currently limited to simple spherical targets, such as *Chlamydomonas*. However, by attaching or embedding fluorescent proteins, beads and quantum dots to act as fluorescent markers, the developed tracking system can also be applied to arbitrarily-shaped targets.

The second purpose of this thesis was to acquire knowledge about more efficient processes for new product development management. The process used at GPI for development of the microscope three-dimensional tracking system was analyzed reflectively, and the author describes this process as a self-ethnography. The analysis focused specifically on two subjects, "motivation" and "team building", and a research question was set for each subject. In the analysis, the author adopted the

concepts of intrinsic motivation theory, dialogue theory, and community of practice. From the motivation viewpoint, it was found that the words of speakers must have the power to convince others. Those speakers who are strongly and intrinsically motivated are reliable and have the power to persuade others. In addition, from the team building viewpoint, it was demonstrated that the power to convince other people and the density of information exchange are both important. In other words, high-density communication plays an important role in team building. The author also offered suggestions to both individuals and organizations with the intention of improving social practice in business fields in the future, using knowledge that was reflectively derived from the case study based on the author's own practical activities.

This study was carried out with considerable support from the affiliated company, other organizations including GPI, and other related individuals. In the product development phase, the author was able to realize new three-dimensional position detection technology for microscope observation targets. In addition, through reflective analysis of the product development process, the author found that "intrinsic motivation" is important to enable results to be achieved in practical activities. In further practical activities, including future product development processes, the author will pay attention to the "internally persuasive discourse" that leads to motivation. The author is convinced that this approach will provide a more effective practice for product development management and will eventually contribute to increased creativity in the photonics industry.

# 目次

第1章 序論.....	1
1-1. 製品開発に至る背景.....	1
1-2. 顕微鏡トラッキングシステムの現状.....	1
1-3. 本論文の目的と概要.....	3
1-4. 本論文の構成.....	4
第2章 製品コンセプトの検討.....	7
2-1. はじめに.....	7
2-2. バイオ関連システム製品の現状.....	7
2-3. 顕微鏡市場の分析.....	8
2-4. 顕微鏡トラッキングシステム市場の現状.....	10
2-5. トラッキング観察対象.....	12
2-6. 新製品開発コンセプト.....	15
第3章 画像処理を用いた位置検出ユニットの開発.....	19
3-1. はじめに.....	19
3-2. 画像処理による位置検出技術.....	19
3-3. 結果と考察.....	22
3-4. 結論.....	24
第4章 高速位置検出ユニットの開発.....	26
4-1. はじめに.....	26
4-2. 高速位置検出ユニットの構成.....	27
4-2-1. 非点収差法による位置検出.....	29
4-2-2. プロファイルセンサモジュール.....	32
4-3. 位置検出ユニットの検出性能評価実験.....	32
4-4. 結論.....	37
第5章 顕微鏡3次元トラッキングシステムの開発.....	39
5-1. 目的.....	39
5-2. 制御ソフトウェアの開発.....	39
5-3. トラッキング実験の結果と考察.....	42
5-3-1. 動きを制御した観察対象のトラッキング.....	42
5-3-2. 浮遊ビーズのトラッキング実験の結果と考察.....	50
5-4. 結論.....	53
第6章 製品開発プロセスの省察的分析.....	55
6-1. はじめに.....	55
6-1-1. 目的.....	55

6-1-2. 背景としての所属企業概況と筆者の実務状況.....	55
6-1-3. 光産創大への派遣.....	56
6-2. 課題設定.....	56
6-2-1. リサーチ・クエスチョン1.....	56
6-2-2. リサーチ・クエスチョン2.....	56
6-3. 先行研究と研究手法.....	57
6-3-1. 省察的实践.....	57
6-3-2. 動機づけ理論・対話理論.....	58
a. 内発的動機づけ理論.....	58
b. 対話理論.....	59
6-3-3. 実践共同体の概念.....	60
6-3-4. セルフエスノグラフィー（現場研究）.....	61
6-4. 実践事例.....	62
6-4-1. 背景.....	62
6-4-2. 事例.....	63
6-5. 分析と考察.....	70
6-5-1. リサーチ・クエスチョン1に対する分析と考察.....	70
6-5-2. リサーチ・クエスチョン2に対する分析と考察.....	72
6-6. 結論.....	75
第7章 結論.....	78
謝辞.....	81
業績目録.....	83



# 第 1 章 序論

## 1-1. 製品開発に至る背景

筆者の所属企業は、レンズやミラー、光学フィルターなどの光学素子とそれを精密に位置決めする保持機構部品、また光学に関連する自動制御装置や観察装置など多種多様な製品を長年提供してきた光学精密機器メーカーである。製品は研究・開発・検査・生産とあらゆる設備と工程で利用されている。ユーザーは大学や研究機関、民間企業に至るまでその裾野は広い。筆者は其中で主にバイオ関連システム製品の設計・開発を行ってきた。

バイオ関連システム製品は、既存の顕微鏡に取り付ける光学部品と機構部品を中心とした構成になっている。ユーザーが使用する環境に対して、柔軟に組み込めることが特徴である。特に顕微鏡用自動 XY ステージシステムはその代表的製品である。その精密位置決め能力とシンプルな取扱方法により安定的な売上を誇っていた。

ただし昨今は、その売り上げの伸び悩みが目立ち始めている。連動する生物顕微鏡市場の飽和、試料操作の自動化を望むユーザーへ製品が浸透、競合メーカーの市場進出、など多数の要因が考えられたが、決定的な打開策を見出すことはできなかった。

このような状況下、既存ステージシステムに替わる新製品が待たれていた。バイオ関連システム製品はユーザー特注品から正規製品に至るケースがある。今回も、共通した技術要望に対応するニーズ案件が複数回重なることがあった。それは、照明と対物レンズ、カメラなどを統合した所属企業の観察ユニットと精密ステージを連動させ、自動制御することで、その観察対象を常時視野内に保持し、焦点合わせを行う特注装置である。この技術を具体化するためには、観察対象の自動検出技術と精密ステージへのフィードバック制御技術が必要であったが、当時の筆者所属企業にはその技術開発に対応しきれなかった。

そのような所属企業のバイオ製品の背景があり、筆者が 2015 年 4 月より光産業創成大学院大学（以下、光産創大）に派遣されることになった。ここで顕微鏡 3 次元トラッキングシステムを新規開発することになった。

## 1-2. 顕微鏡トラッキングシステムの現状

光学顕微鏡は生物・医療などの研究に多用されており、さまざまな生命現象を鮮明に映す有力な観察・計測装置の一つである。ただし、その観察領域は非常に狭く、視野範囲で直径数 100 $\mu\text{m}$ 、焦点奥行方向に数  $\mu\text{m}$  ほどで、視野範囲を超えて移動する対象の継続的な観察は難しい。このような問題に対して、観察対象を常に自動的に視野中心に捕捉するトラッキング装置が開発された。

H.C.Berg は 1971 年に大腸菌を観察するため、顕微鏡における 3 次元トラッキングシステムを開発した[1]。これが最初に提案された顕微鏡トラッキングシステムである。観察対象

の位置は、異なる位置からの散乱光を集める 6 本の光ファイバーを用いて検出し、そこから観察対象の位置情報を取得し、その位置情報を基に電動ステージを動かすことでトラッキングを行う。この顕微鏡トラッキングシステムは、この他にも細胞の動きや細菌の研究などの研究に用いられている[2]。

現在は、高速イメージング技術とリアルタイム画像処理技術の向上により、高速カメラや特殊な画像処理、そしてリアルタイム制御処理技術などを多用した顕微鏡トラッキング技術も開発されている[3,4,5]。高速カメラを用いた追尾システムは、H.C.Berg の顕微鏡追跡システムと比較して広範囲な検出範囲を有する。専用の演算装置や複雑な画像処理技術の実装が必要になるが、顕微鏡観察下の微生物などに対して焦点位置合わせ技術も含めて高い能力を示している。

顕微鏡 3 次元トラッキングシステムは、多少の違いはあるが大別して、「検出」、「制御」、「駆動」の各ユニット、そして「顕微鏡」で構成される。図 1.1 は、顕微鏡トラッキングシステムの構成を示している。検出ユニットは、観察対象を認識し、その 3 次元位置情報を推定する。高速カメラが主に使用される。制御ユニットは、検出ユニットと駆動ユニットの制御を行う。トラッキングを行う場合には、検出ユニットで得られた位置情報を基に、観察対象を視野の中心に焦点が合うように駆動ユニットに信号を送る。PC 上のソフトウェアで制御を行う場合は、信号の遅延のため、観察対象に対する応答性能は遅くなる。そこで、高速タイプでは、検出ユニットから直接駆動ユニットに信号を送るものもある。これは、応答速度の速さを生かした観察対象の高速トラッキングなどに利用される。駆動ユニットは、顕微鏡に取り付けられる XYZ ステージで、通常このステージを制御するドライバ・コントローラもセットとして考える。試料を直接操作する場合や、対物レンズなど観察光学系の位置調整を行う場合などがある。

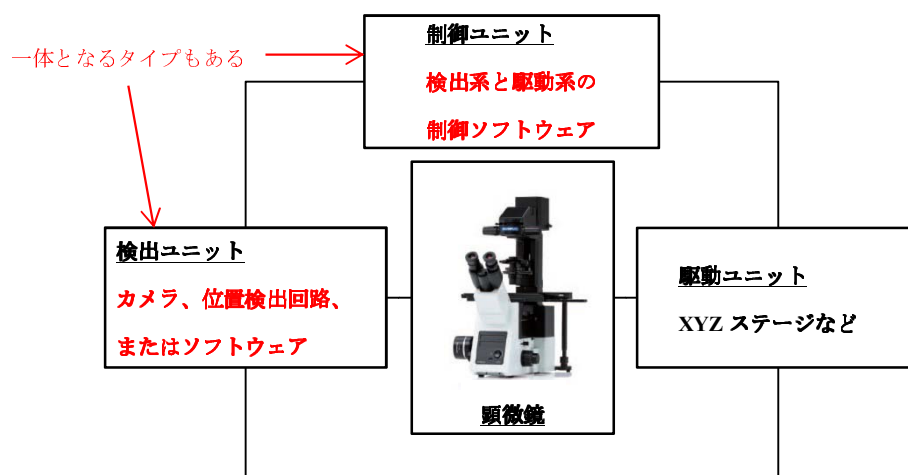


図 1.1 顕微鏡トラッキングシステムの主要構成

### 1-3. 本論文の目的と概要

本論文では、下記2つの目的を設定した。

- 顕微鏡3次元トラッキングシステムを開発すること
- 新製品開発プロセスを省察的に分析し、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

まず第1の目的である「顕微鏡3次元トラッキングシステムを開発すること」に対して、自社の分析と顕微鏡市場の分析、既存の顕微鏡トラッキング製品の分析、観察対象の分析を行い、そこから以下の4つの開発方針と製品コンセプトを決定した。

- ① 顕微鏡は、既存メーカー製品を使用
- ② 自社駆動ユニット製品（XYZステージ等）を積極的に採用
- ③ 開発はユニット化し、自社他製品との柔軟性を確保
- ④ 競争力のある価格帯で販売

そこでこの開発方針と製品コンセプトを基に、2種類の位置検出ユニットの開発を行った。開発する位置検出ユニットは、通常のカメラとPCを利用した画像処理による低速だが安価な位置検出ユニットと、非点収差法とプロファイルセンサを利用した高速位置検出ユニットである。非点収差法は、簡便な方法で高速に3次元位置検出が可能であるが、従来の4分割フォトダイオードを検出器に用いる方法では、顕微鏡トラッキングシステムとしては検出範囲が狭い。そこで新たな検出器にプロファイルセンサを用いることで、高速性を維持したまま検出範囲を拡大した。2種類のユニットを使い分けることで多種多様な顕微鏡観察対象や導入コスト等の顧客ニーズに対応できる。最後に制御ユニットの開発を行い、自社の駆動ユニットと開発した位置検出ユニットを組み合わせ、顕微鏡3次元トラッキングシステムを完成させた。

次に第2の目的である「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こと」に対して、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。特に分析の中で「動機づけ」と「チーム作り」の2点に着目し、より効率的に製品開発をマネジメントするためのリサーチ・クエスチョンをそれぞれ以下のように設定した。

#### ○リサーチ・クエスチョン1

「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」

## ○リサーチ・クエスチョン 2

「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」

そしてそれぞれの課題分析と合わせ、ここで得られたより効率的な製品開発マネジメントに関する知見を組織レベルに落とし込むため（社会実装化）、個人と組織への提言を提示するものとする。

### 1-4. 本論文の構成

本論文の構成について以下に説明する。図 1.2 は本論文の構成をブロック図として示したものである。

第 1 章では、本研究の背景として、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。最後に本論文の構成を示した。

第 2 章では、新製品開発コンセプトの検討について述べた。

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的で低速だが安価な位置検出ユニットを開発し、その評価を行った。

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を開発し、その試験評価の結果を示した。

第 5 章ではシステムの制御ソフトウェアを開発し、第 2 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。さらに、ポリスチレンビーズを観察対象としてトラッキングを行い、その試験評価の結果を示した。

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。そこから得られた製品開発マネジメントに関する知見を、社会実装化するために、個人と組織への提言としてまとめた。

第 7 章では本論文をまとめ、また今後の展望についても合わせて述べた。

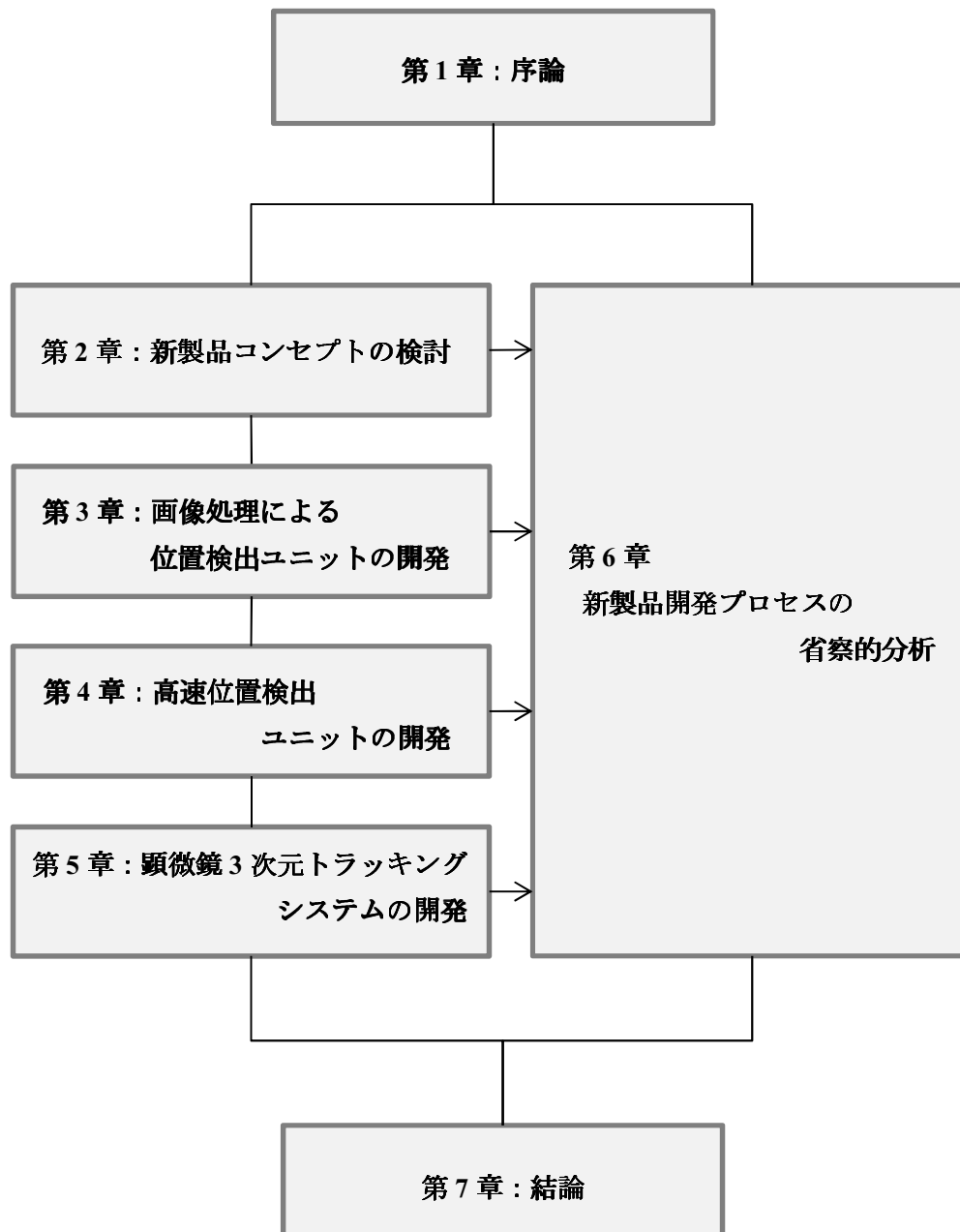


図 1.2 本論文の主要構成

【参考文献】

- [1] H.C. Berg, How to Track Bacteria, Rev. Sci. Instrum **42**(6), 868-871 (1971)
- [2] L. Turner, L. Ping, M. Neubauer, H. C. Berg, Visualizing Flagella while Tracking Bacteria, Biophys J. 111, 630-639 (2016)
- [3] B. Liu, M. Gulino, M. Morse, J. X. Tang, T. R. Powers, K. S. Breuer, Helical motion of the cell body enhances *Caulobacter crescentus* motility, PNAS 111(31), 11252-11256 (2014)
- [4] Y. Arai, K. Wakabayashi, M. Kikkawa, H. Oku, M. Ishikawa, Three-Dimensional Tracking of Chlamydomonas in Dark Field Microscopy, Journal of the Robotics Society of Japan **31**, 1028-1035 (2013)
- [5] M. Maru, Y. Igarashi, S. Arai, and K. Hashimoto, Fluorescent Microscope System to Track a Particular Region of *C. elegans*, IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 347-352(2010)

## 第2章 製品コンセプトの検討

### 2-1. はじめに

本章では、本研究で開発する「顕微鏡 3 次元トラッキングシステム」の製品コンセプトを検討する。

そこで、自社のバイオ関連システム製品の現状、顕微鏡市場、顕微鏡 3 次元トラッキングシステム製品について分析し、観察対象の検討を行う。そして、それらの分析結果をもとに、本論文で開発する「顕微鏡 3 次元トラッキングシステム」の製品コンセプトを決定し、さらに開発項目を明確にする。

### 2-2. バイオ関連システム製品の現状

筆者が所属する企業では、顕微鏡に取り付けた利用を前提とした各種のシステム製品を取り揃えている。図 2.1 に示すのは、その代表的な製品の一部である。これらの製品は顕微鏡システムの構成デバイスとして特徴的な役割を各々持っている。

図 2.1(a)の顕微鏡用自動 XY ステージシステムは、顕微鏡試料を視野方向に精密操作するものである。その分解能は  $0.1\mu\text{m}$  であり、高精度な位置決め再現性をもつ。既存の顕微鏡についている手動 XY ステージの代わりに、取り付けて使用することができる。主にタイムラプス観察などに利用されている。ソフトウェア制御が可能である。

図 2.1(b)の顕微鏡用シャッターシステムは、照明光源の光路内で開閉して ON/OFF する機能を果たす。顕微鏡の照明光源の光路の途中に挿入して使用する。特に照射時間を厳密に制御・管理する場合に有効で、蛍光観察の用途などに利用されており、ソフトウェア制御が可能である。

図 2.1(c)の顕微鏡対物レンズ用ピエゾステージシステムは、対物レンズの焦点合わせに利用される。分解能は  $10\text{nm}$  で高い焦点合わせ能力と再現性を持つ。既存顕微鏡の対物レンズに取り付けて使用する。これはタイムラプス観察などで顕微鏡用自動 XY ステージシステムと組み合わせて利用される。ソフトウェア制御が可能である。

図 2.1(d)は、赤外線遺伝子発現システムで、遺伝子組み換えされた単一細胞を、赤外線レーザーを集光し加熱するユニットである。既製の顕微鏡ポートに着脱し、レーザー光を導入する。ソフトウェア制御には対応していない。

図 2.1(e)は、マイクロマニピュレーションシステムで、近赤外線レーザー照射とビーム操作を行う。レーザー光の放射圧で捕捉した試料に対して引っ張りや押し付けなどを行うことが可能である。既製の顕微鏡ポートに着脱し、レーザー光を導入する。ソフトウェア制御には対応していない。

ここまで所属企業のバイオ関連製品の現状を見てきた。それぞれが顕微鏡システムの単

機能製品として位置づけられている。しかし、複数の製品を統合して制御するソフトウェアは提供していないため、統合システムとしての製品力が弱い。ユーザー自身が、複数の製品を制御するシステムを作成し利用している場合はあるが、バイオ関係のユーザーでそのようなシステム開発が可能な場合は多くない。よって、これらの製品の統合ニーズは存在している。統合制御ソフトウェアとして提供が可能になれば、それに連動して既存製品の販売増加にもつながると期待できる。本論文で開発する 3 次元トラッキングシステムの制御ソフトウェアはこれらの製品の統合ソフトウェアとして拡張できる可能性がある。

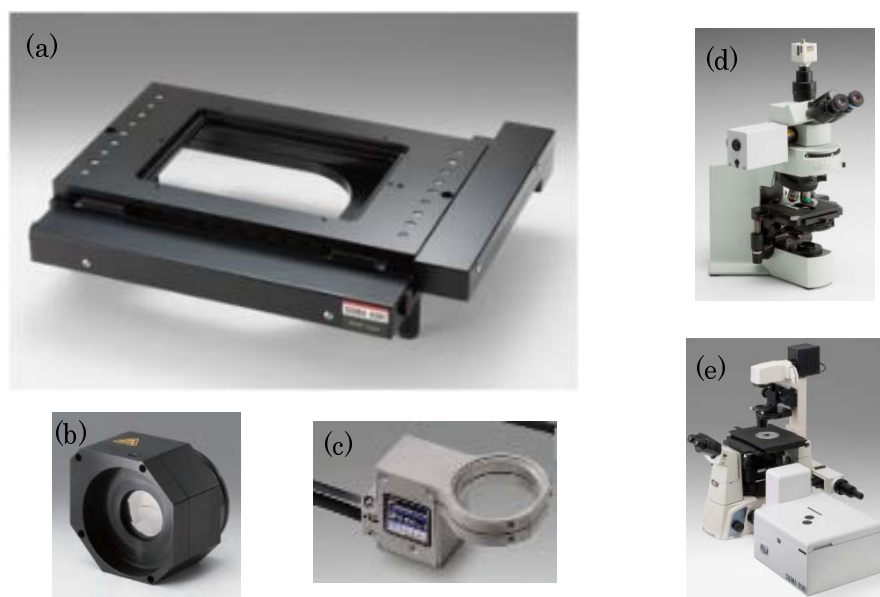


図 2.1 筆者が所属する企業のバイオ製品。(a) 顕微鏡用 XY 自動ステージシステム。(b) 顕微鏡用シャッターシステム。(c) 顕微鏡対物レンズ用ピエゾステージシステム。(d) 赤外線遺伝子発現システムのレーザー照射ユニット。(e) マイクロマニピレーションシステムのレーザー照射・ビーム操作ユニット

### 2-3. 顕微鏡市場の分析

所属企業のバイオ関連製品が光学顕微鏡を中心として展開されていることは上述した。本節ではこの顕微鏡の市場と将来性について検討する。なお本節の市場調査データは日本国内市場に限定しているが、当社バイオ関連製品のほとんどが国内市場で展開されているため、ここでの議論は国内に限定する。また顕微鏡の種類は、生物研究用途で倒立型顕微鏡に限定している。

図 2.2 は、「ティッシュエンジニアリング関連市場の最新動向と将来性 2016」から株式会社富士経済/大阪マーケティング本部が予測した「生物顕微鏡の市場規模推移」を示している。2014 年から台数ベースで 2000 台程度、金額ベースで 60 億円強程度という傾向で推移しており、2030 年までこの傾向は続くとして予想している。顕微鏡はバイオ関連の研究では



必要不可欠であり、長い間使われ続けている。そのため大きく成長する分野ではないが、今後も安定した市場であり続けると考えられる。

図 2.3 は、同資料の「生物顕微鏡の販売チャネル」を示している。大学・研究機関が生物顕微鏡の販売先として全体の 80%弱を占める。また、15%程度の民間企業も研究用途である。つまり、生物顕微鏡は 95%以上が研究用途に使われている。大学・研究機関の研究費は、国の政策・方針による変動が起きる可能性があるが、この分野の研究費が大きく減少することは考えにくい。また、民間企業の研究については、景気変動に大きく影響される。景気が悪くなるとまず研究分野の予算が縮小されるが、景気が回復すれば研究予算も回復する。長期間で考えれば、この分野の研究費も安定していると考えられる。

以上の分析から、顕微鏡市場は安定しており、今後も現在の規模が維持されていくと予測されている。また、顕微鏡は、95%以上が研究用途に用いられており、開発する製品は、基本的にアカデミア向けに合わせていくべきである。

摘要/年次	実績		見込	予測	予測	予測
	2014年	2015年	2016年	2017年	2020年	2030年
数量	1,880	1,835	1,840	1,860	1,915	2,010
前年比	-	97.6%	100.3%	101.1%	103.0%	105.0%
金額	6,410	6,210	6,220	6,280	6,470	6,790
前年比	-	96.9%	100.2%	101.0%	103.0%	104.9%

単位:台、百万円

富士経済推計

※2020年と2030年の前年比欄は前掲年との比較

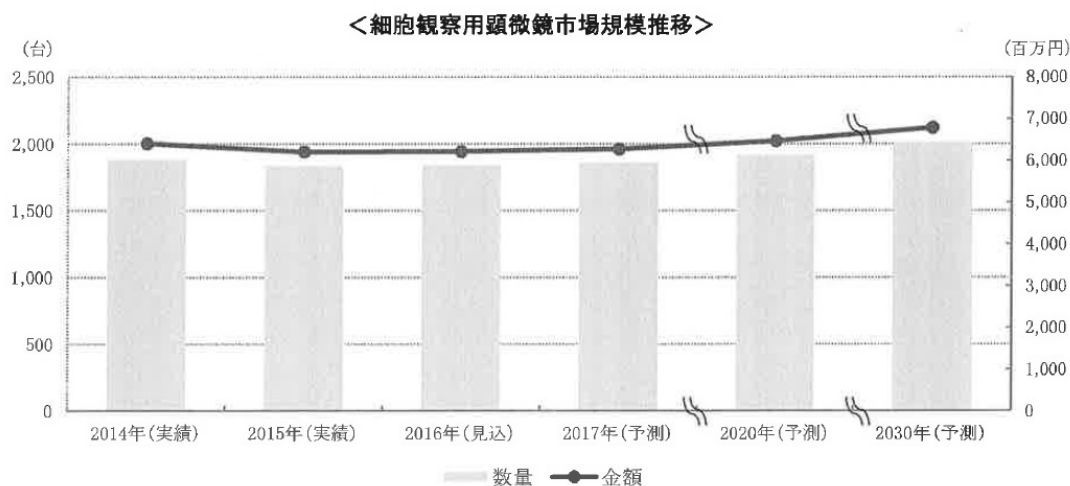


図 2.2 生物顕微鏡市場の推移

出典：富士経済グループ「ティッシュエンジニアリング関連市場の最新動向と将来性 2016」より

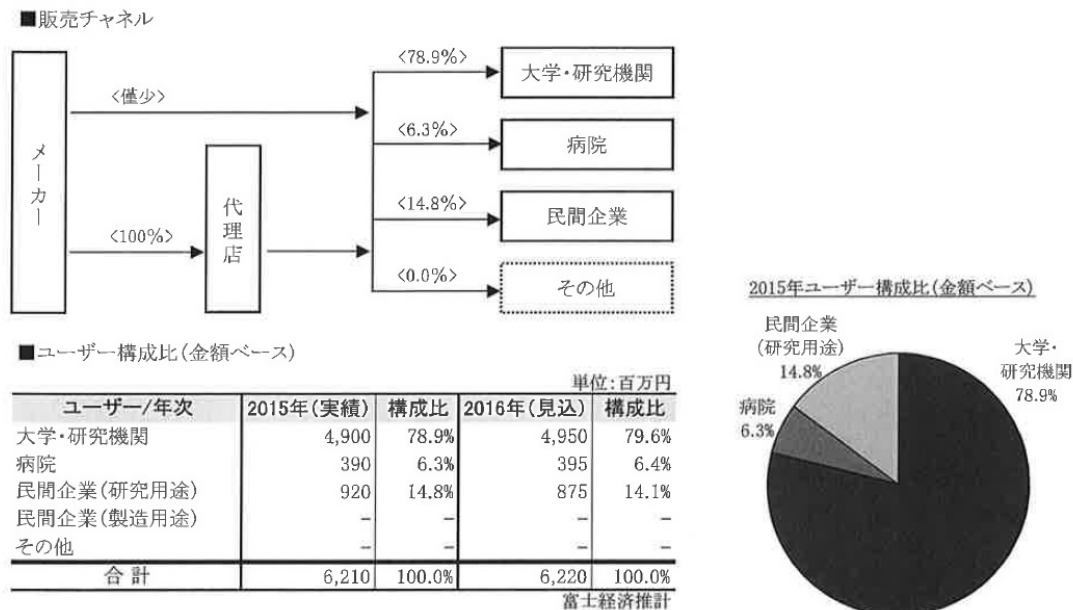


図 2.3 生物顕微鏡の販売チャネル

出典：富士経済グループ「ティッシュエンジニアリング関連市場の最新動向と将来性 2016」より

## 2-4. 顕微鏡トラッキングシステム市場の現状

本節では、顕微鏡トラッキングシステムの既製品について、分析した。

(株)エクスピジョンの製品外観写真を図 2.4(a)に示す。このシステムは、光学顕微鏡を中心に高速検出演算処理装置、XYZ 自動ステージ、市販 PC から成る顕微鏡トラッキングシステムである。観察対象は、サンプルチャンバに入れられ XYZ ステージに固定される。観察対象の観測像は顕微鏡上の高速検出演算処理装置で毎秒 1000 枚取得され、同装置の画像処理部で演算を行う。この像から観察対象の位置が 1ms 以内で検出され、制御 PC に送られる。この制御 PC は観察対象が常に顕微鏡視野中心にくるように XYZ ステージを制御する。XYZ ステージの位置と視野内の観察対象の位置から、観察対象がサンプルチャンバ内の座標系でどのように動いたかが分かるため、その移動軌跡も記録することが可能である。遊泳するゾウリムシの運動計測として 2 次元あるいは 3 次元でのトラッキングを行った事例 [1]が報告されている。

- ・主要構成：高速カメラ (700×774 pixel, 1kHz)、高速演算処理装置 (FPGA)、顕微鏡 (正立型既存メーカー製)、XYZ ステージ (顕微鏡サイドから挿入)、ステージコントローラ、市販 PC
- ・トラッキング仕様：20 倍で最大 700μm/s 程度、20 倍で 542×539μm 視野

- ・対象物：白く映る物、黒く映る物どちらでも可能

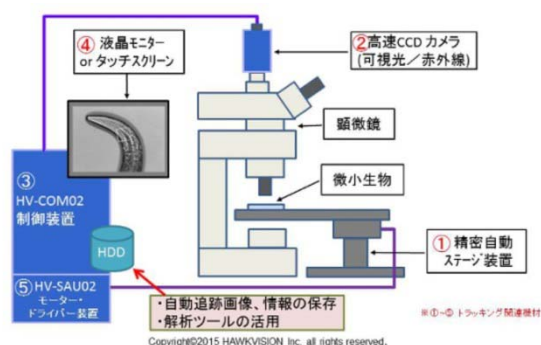
(株)ホークビジョン社製品のシステム構成図を図 2.4(b)に示す。このシステムは各種顕微鏡（正立型顕微鏡, 倒立型顕微鏡, 実体顕微鏡, 蛍光顕微鏡等）と、それに干渉しない独立した精密自動ステージ（XY/XYZ）、リアルタイム制御による厳格な実時間管理能力を実装した制御装置、高速カメラで構成される。高速カメラで取得した観察対象の像を演算処理用の制御装置に送り、リアルタイムで精密自動ステージ（XY/XYZ）を制御する。またこのシステムには、観察対象の任意の部位を常に視野中心に捕捉する局所トラッキングと、観察対象の全体を常に視野中心に捕捉する全身トラッキングの 2 種類の追跡動作が備えられているのが特徴である。

線虫（*C.elegans*）のドーパミン細胞の機能解析を行った事例[2]が報告されている。

- ・主要構成：高速カメラ、高速演算処理装置（リアルタイム制御）、顕微鏡（正立型既存メーカー製）、XYZ ステージ（顕微鏡サイドから挿入）、モータドライバ装置、モニター（タッチスクリーン）
- ・トラッキング仕様：明/暗視野/蛍光で追尾可能、全身/局所追尾の選択
- ・対象物：明示されていないが(株)エクスピジョン社同様汎用性は高いものと考えられる



(a)



(b)

図 2.4 既存の顕微鏡トラッキングシステム製品

(a) (株)エクスピジョン社製品（写真）。(b) (株)ホークビジョン社製品（システム構成例）。

両社とも観察対象への高速トラッキングを可能とする製品である。高速カメラによる高フレームレートの画像取得、独自の画像処理技術を実装した演算処理装置で画像取得と同時に並列演算して観察対象の位置を高速検出し、XYZ ステージへのフィードバック制御を行う。対象の検出性能、移動速度、種類に幅広く対応しており、現在選択可能な製品としては最も完成度の高い製品である。ただし、顕微鏡視野内をゆっくり低速に移動するような観察対象の場合は、両社の高速トラッキング能力が過剰仕様でコストに見合わなくなる

可能性もある。このように、ゆっくり低速に移動する観察対象へのトラッキングについても考慮していく必要がある。

## 2-5. トラッキング観察対象

トラッキング観察の対象になる生物試料は無数にあるが、代表的な例を上げると体長が1mm程度の *C.elegans* と呼ばれる線虫から、体長 60~90 $\mu\text{m}$  未満、幅 10~20 $\mu\text{m}$  ほどのミドリムシ、直径 10 数  $\mu\text{m}$  のクラミドモナス、体長が数 2~4 $\mu\text{m}$  の大腸菌などがある。

線虫 (図 2.5(a)) は、線形動物門に分類され学名がつくものでも約 2 万種類存在する。その中でもシーエレガンスと呼ばれる線虫の 1 種について述べる。正式な学名は、*Caenorhabditis elegans*, 略称 *C.elegans* であり、線虫やエレガンス線虫などと呼ぶことが多い。エレガンス線虫は体長 1mm 程度の線虫であり、体はほとんど透明である。細菌を主なエサとし、細菌の多い場所 (土壤中) などを好む。体を横向きにして頭を振りながら S 字状の動きをする。25°C の環境下で大腸菌などをエサとして飼育すると 3 日前後で成虫まで成長する [3]。実験室において簡単に飼育できることで、上記の特徴と相まって遺伝子発現や神経機能の働きを解明する実験に多用されている。低倍率で線虫の全身を捕捉する場合や高倍率で線虫の特定部位を捕捉する場合など、実験内容でトラッキング方法が変わってくる。

ミドリムシ (図 2.5(b)) は、鞭毛虫の 1 種でミドリムシ属 *Euglena* の総称を指す場合もある。大きさは 60~90 $\mu\text{m}$  未満である。体を常にスピンさせながら (すじりもじり運動) 約 400 $\mu\text{m}/\text{s}$  程度の速度で進む。また 1 個体が 1 日で倍に増えるなど増殖の速度も速い。実験室での培養が容易であることから、光合成や鞭毛運動の解明などの研究に用いられている。ミドリムシの場合、低中倍率観察でその全身を捕捉してトラッキングを行う場合が多い。

クラミドモナス (図 2.4(c)) は大きさが直径 10~30 $\mu\text{m}$  ほどで、ゾウリムシなどと同じ原生生物に分類される。鞭毛を使っておよそ 100 $\mu\text{m}/\text{s}$  前後の速度で泳ぐことが知られる。水田や土壤中に生息し光合成を行い、雌雄同体である。クラミドモナスは最初に葉緑体 DNA が発見された生物でもあり、光合成や生殖、鞭毛運動、特に光走性 (光に向かったり逃げた泳ぐ特性) に関する研究などを行う場合のモデル生物の一つである。クラミドモナスの場合、低中倍率観察でその全身を捕捉してトラッキングを行う場合が多い。

大腸菌 (図 2.5(d)) は腸内細菌の一種で体長 2~4  $\mu\text{m}$  の短い棒状の単細胞生物である。同じく鞭毛を使って、およそ 30 $\mu\text{m}/\text{s}$  前後の速度で泳ぐことが知られる。細胞分裂により増殖し、有性生殖する。大腸菌は組換え DNA の宿主としても有用であり、染色体 DNA の全長 460 万塩基対の配列がすべて解読され、この中に 4288 個のタンパク質をコードする遺伝子があることが明らかになった。遺伝子操作実験には欠かせないモデル生物の一つである。大腸菌の場合、高倍率観察でその全身を捕捉してトラッキングを行う。

蛍光ビーズ (図 2.5(e)) は、粒径が 0.05~150 $\mu\text{m}$  と幅広いが、一分子観察のための修飾や細胞同士の相互作用、微生物の特性箇所への標識など顕微鏡下で行われる多彩な研究に用いられている。

以上のことから、観察対象にはサイズの違いだけで、観察に適した顕微鏡側の観察倍率が変わり、それに伴って観察領域（視野面内方向と焦点奥行方向）も変わってくる。また、その領域で行動する観察対象の移動速度の違いで、適切にトラッキングを行うためには位置検出にかけられる時間も変わってくる。つまりこれらの生物試料全てに対応したシステムを構築することは、検出系や制御系にかかる開発コストが大きくなることを示している。このことから、考えられる観察対象全てに対応する製品を開発するのではなく、観察対象に応じた性能を持つ製品を組み合わせることが最も適切だと考えられる。

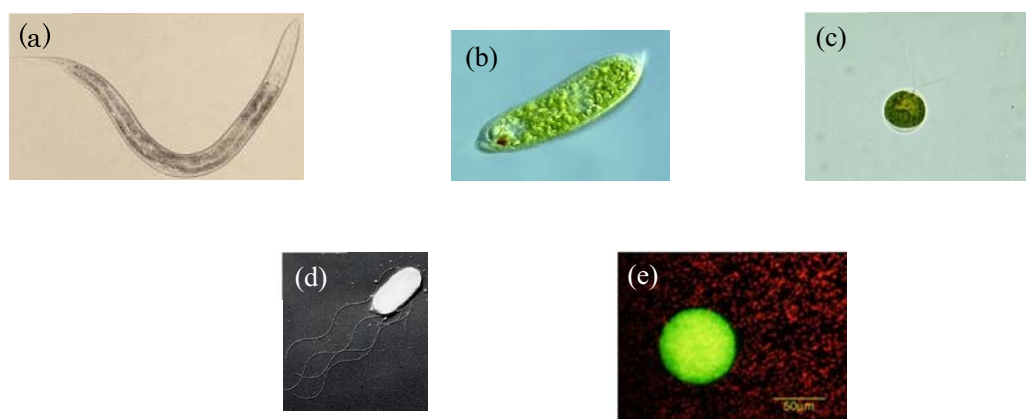


図 2.5 トラッキング観察・研究の代表的な生物試料

図 2.6 は、2-4 節で述べたトラッキングシステムの性能と 2-5 節で述べた観察対象の移動速度、観察倍率の関係をまとめたものである。左軸はカメラ 1 フレーム当りの移動距離、図中に記載する右軸は観察倍率、横軸は観察対象の移動速度を表している。実線は、それぞれのフレームレートのカメラを用いたときの観察対象の移動速度とカメラ 1 フレーム当りの移動距離の関係を示している。破線は観察倍率に対するトラッキング可能な 1 フレーム当りの移動速度の限界を示している。また、楕円の領域は、それぞれの観察対象生物の移動速度と観察倍率の範囲を示している。この図から、観察対象の速度と観察倍率とトラッキングに必要なカメラの性能の関係が分かる。

例えば 2-5 節で示した(株)ホークビジョン社の例では、カメラフレームレート 200fps で 5 倍観察のとき、650um/s 以下の移動速度を持つ対象にトラッキングできる。この場合、ミドリムシやクラミドモナス、大腸菌、蛍光ビーズなどに対応できることがわかる。2-4 節で示した 2 社は幅広い観察対象に対応できるが、一部の観察対象には過剰な仕様となる。

そこで本製品開発では、1つのシステムで全ての観察対象をカバーせず、各機能を性能ごとにユニット化して各々の観察対象へ対応させる。つまり、低速移動しかしない観察対象には低速の位置検出ユニットを、高速移動を伴う観察対象には高速の位置検出ユニットを用いる。このユニット化により、最適なユニットを自由に組み合わせることで、観察対象に見合ったコストのトラッキングシステムを構築可能となる。

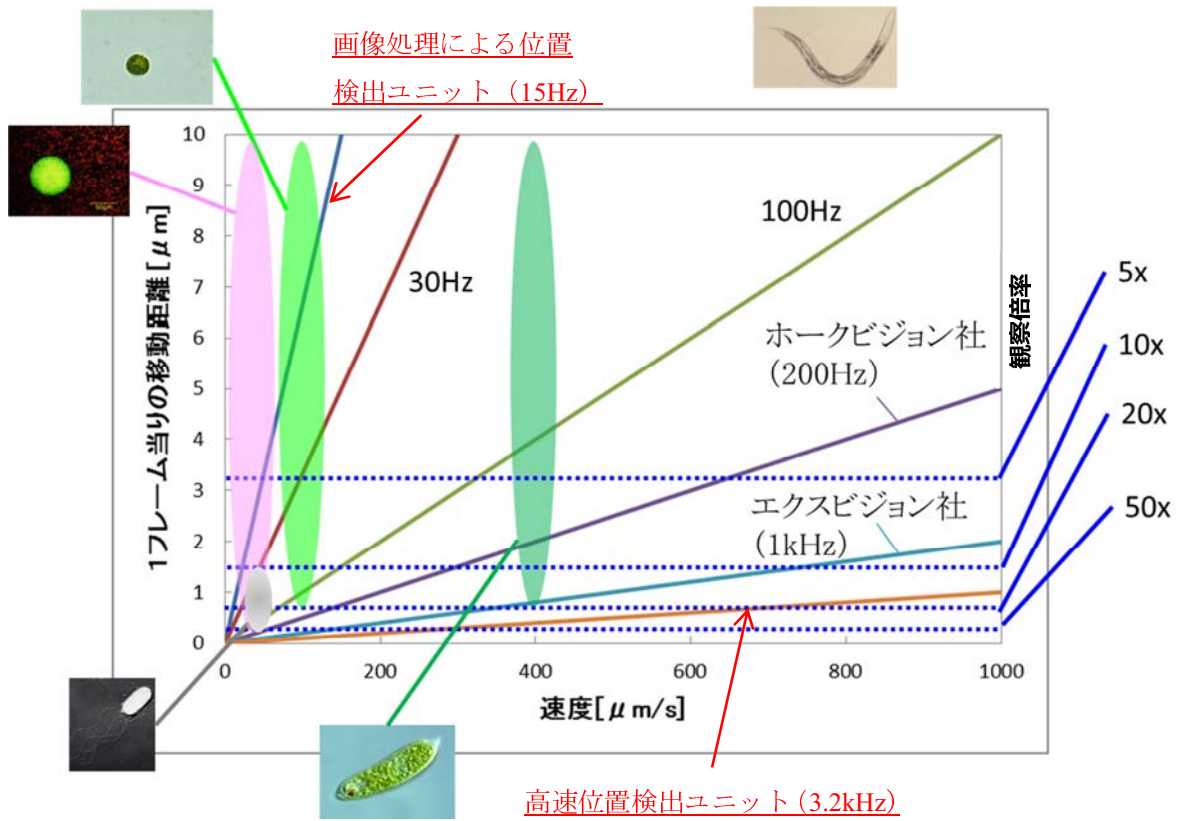


図 2.6 観察対象とトラッキング性能の関係

## 2-6. 新製品開発コンセプト

本章では、自社のバイオ関連システム製品の現状、顕微市場、既存の顕微鏡トラッキングシステム、および、観察対象について見てきた。それを基に、新規に開発する製品「顕微鏡 3 次元トラッキングシステム」の開発コンセプトをまとめる。

まず、筆者の所属企業のバイオ関連システム製品は、顕微鏡に取り付けて使用するものであり、顕微鏡は取り扱っていない。したがって、開発する顕微鏡 3 次元トラッキングシステムのために新たに顕微鏡を開発するのではなく、既製の顕微鏡に取り付け可能なユニットとして開発する。また、2-2 節で説明したとおり、所属企業は顕微鏡に取り付け可能な駆動系製品を既に保有しているため、駆動系はそれらの製品を採用する。

次に 2-5 節で説明したとおり、顕微鏡トラッキングには高速で移動する対象または高倍率の観察から、定速で動く対象を低倍率で長時間観測するなど幅広いニーズがある。これを 1 つのシステムで対応するには高価な高速トラッキングシステムになってしまうが、低速トラッキングに対しては過剰仕様となる。そこで、開発する顕微鏡 3 次元トラッキングシステムは、検出系と制御系を別ユニットとし、顧客ニーズに応じてユニットの選択を可能とすることで仕様を選べるようにする。これによって、競争力のある価格帯での販売を目指す。

また新規開発する製品「顕微鏡 3 次元トラッキングシステム」は、アカデミアを中心に展開する。これは当社ユーザー層のほとんどが大学・研究機関に属していることと上手く合致するため、方向性としては問題ないと考える。このとき、光学顕微鏡の国内年間出荷台数約 2000 台の 5%(約 100 台)を該当市場と仮定し、開発を進める。ここまでを整理して、開発方針をまとめると、以下のとおりとなる。

- ①顕微鏡は既存製品を使用
- ②自社駆動ユニット製品を積極的に採用
- ③開発はユニット化し、自社他製品との柔軟性を確保
- ④競争力のある価格帯で販売

また、図 2.7 は本開発コンセプトを図式化したものである。

まず顕微鏡は既製品を使用する。顕微鏡の種類は多くあるが、ここでは光学顕微鏡を中心に置く。この光学顕微鏡では、明視野、暗視野、蛍光など各種観察法を顕微鏡用の追加部品で可能となる。

駆動系となるステージとそのコントローラについては、自社製品を使用する。幸い当社にはそのステージ製品が充実している。既製品を中心に顕微鏡に取り付けるかたちで、XY ステージと Z ステージの選定を行う。これは、既存製品の販売数増加にもつながる。また、既に当社ステージ製品を所有しているユーザーが、開発するトラッキングシステムを導入しやすくなるメリットもある。

次に、観察対象の検出を行う検出系である。ここでは、低速・高速それぞれのトラッキングに対応した2種類の開発を行う。一つは、カメラ画像を基にした画像処理による位置検出技術の開発である。これは画像処理技術を実装するソフトウェア開発が主となる。これは低速トラッキングに対応する技術となる。既存のトラッキングシステムより検出速度は遅いが、動きの遅い観察対象や低倍率での観察には、価格的な競争力を持つ。

もう一つは、非点収差とプロファイルセンサを用いた高速位置検出である。この方法は、高速カメラとリアルタイム画像処理技術を必要としない。観察対象は球形のものに限定されるが、既存のトラッキングシステムより位置検出度が早く、価格的にも優位である。さらに、PCで通信制御を行うファームウェア開発、駆動系ステージの制御を行う演算回路と制御プログラミング開発、I/O出力機能インターフェイスの実装も行う。またここでは顕微鏡ポートに取り付けるためのユニットの機構設計・光学設計も行う。

制御系となるPC制御ソフトウェアの開発も行う。これは、高速トラッキングに対応する位置検出ユニットや駆動系ステージ製品などを統合制御するためのソフトウェアである。市販PCのOS環境下の実装するかたちで開発を行う。

顕微鏡3次元トラッキングシステムとして開発する構成ユニットを表2.1に示す。第IからIIIまでの開発フェーズのうち、第Iおよび第IIまでが本研究の範囲である。黒字は既存製品、赤字が新規開発技術であり、青字が今後開発予定の技術を示している。

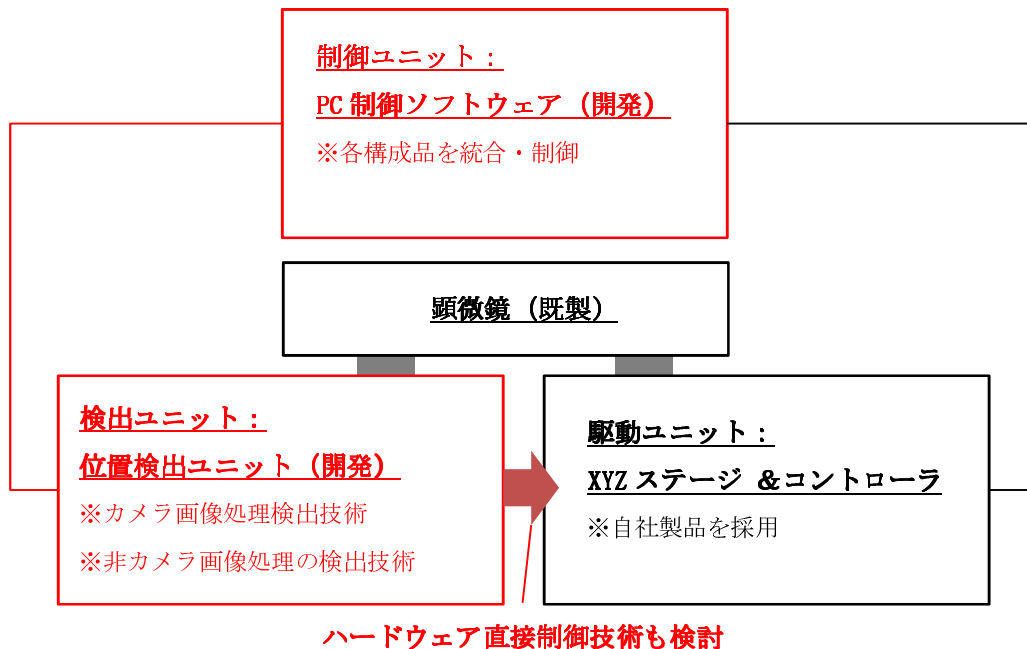


図 2.7 顕微鏡 3 次元トラッキングシステムの開発コンセプト



表 2.1 顕微鏡 3 次元トラッキングシステムの開発機能

開発フェーズ	駆動ユニット	検出ユニット	制御ユニット
I	ステッピング XY ステージ	通常カメラと PC 制御ソフトウェアによる位置検出	PC 制御ソフトウェア
II	ステッピング XY ステージ ピエゾ Z ステージ	非点収差とプロファイルセンサを用いた高速位置検出	PC 制御ソフトウェア FPGA
III	サーボ XYZ ステージ ピエゾ XYZ ステージ	高速カメラと画像演算処理装置を用いた高速位置検出	PC 制御ソフトウェア

【参考文献】

[1]奥寛雅、尾川順子、石川正俊、高速ビジョンによる微生物トラッキング顕微鏡、生物物理 4(91)、011-014 (2009)

[2] Y.Tanimoto\*, Y.G.Zheng\*, X.Fei, Y.Fujie, K.Hashimoto, K.D.Kimura†, In actioptophysiological analyses reveal functional diversification of dopaminergic neurons in the nematode *C. elegans*., Scientific Reports

## 第3章 画像処理を用いた位置検出ユニットの開発

### 3-1. はじめに

本章では、通常のカメラと PC を用いて画像処理による位置検出ユニットを開発し、その性能を評価した。

ここではカメラ画像を演算処理して観察対象の位置を検出する制御ソフトウェアの開発を行った。画像処理プログラミングについては、無償の画像処理用開発環境である「OpenCV」を使用して制御ソフトウェア内に実装した。

カメラ画像中の観察対象を検出する手法には、ラベリングやパターンマッチング、背景差分法などが存在するが、本章では「CamShift 法」と呼ばれる探索領域の色情報を基にした検出法を実装した。これは色分布のヒストグラムを特徴量として画像認識を実現する。物体形状を認識として用いないため、見た目が類似している画像を検索するのに向いている[1]。本章では、製品コンセプト（第2章）のとおり、カメラ画像内で低速に動く細胞や微粒子などの物体を対象とするため、その類似性は高くなる。色情報に基づく画像認識手法の一つである「CamShift 法」は、このようなカメラ観察状況に最適である。

本章の開発では「CamShift 法」を実装したソフトウェアと既存のカメラ、顕微鏡、XY ステージを組み合わせることで顕微鏡トラッキングシステムを構築、その評価を行った。

### 3-2. 画像処理による位置検出技術

観察対象の検出は色情報を用いた「CamShift 法」のソフトウェアを開発し、実装した。

CamShift 法は、同じく色情報を用いた「MeanShift 法」の拡張版である。MeanShift 法は、初めに観察対象を含む探索ウィンドウを設定し、探索ウィンドウ領域内の RGB の各ヒストグラムの特徴を用いて、観察対象が移動した際の位置を検出する。RGB のヒストグラム特徴を用いる MeanShift 法に対して、CamShift 法では HSV 色相値のヒストグラムを用いることで、色情報が動的に変化する動画像に対して安定した追跡を実現する。HSV とは色を色相 (Hue)、彩度 (Saturation)、明度 (Value) の 3 つの数値で表す表色系である。この尺度で色を表現すると、該当する色がどのような色なのか感覚的に分かりやすくなる特徴がある。画像処理では画像内の領域を分離抽出するときに多用される[2]。

図 3.1 に CamShift 法のフローを示し、CamShift 法による対象の位置検出までの流れを説明する。まず顕微鏡カメラ画像中で観察対象を囲む枠（探索ウィンドウ）を設定する。次に RGB 表色系で表示されている入力画像を HSV 表色系に変換する。さらに現在のフレーム画像に対して検出色分布画像を作成する。その検出色分布画像の作成手順は以下のとおりである。

1. 探索ウィンドウ内における色相ヒストグラム（対象の色構成）を計算し、このとき色相値（H 値）の領域は 0~255 の値に割り付けておく。
2. HSV 画像において各画素が持つ H 値の、ヒストグラムにおける出現頻度を輝度値とした検出色分布画像のベースとなる画像を作成する。この時、最大頻度となる色相輝度値が 255 となるように次式を用いて正規化する。

$$L_h = \frac{F_h}{F_{max}} \times 255$$

ここで、 $L_h$  は色相値 H の画素の色分布画像における輝度値、 $F_h$  は探索ウィンドウの色相値ヒストグラムにおける色相値 H の出現頻度、 $F_{max}$  は探索ウィンドウの色相値ヒストグラムにおいて最高頻度を示した色相値の出現頻度である。

3. 彩度（S 値）と明度（V 値）に閾値を設け、S、V 値が S 最小値、V 最小値の閾値以下、もしくは V 最大値の閾値以上の画素の色相輝度値を 0 にする。色が黒もしくは白に近づくと色相値が不安定になるためこれらの閾値を設定する。

作成した検出色分布画像内の画素分布から重心を計算する。この重心の計算と探索ウィンドウの移動を二点が重なるまで（もしくは 2 点の距離が許容誤差範囲に収まるまで）繰り返す。最終的に画素の分布密度が最大となる位置にウィンドウが移動し、このときの重心が検出位置となる。この処理が MeanShift 法である。

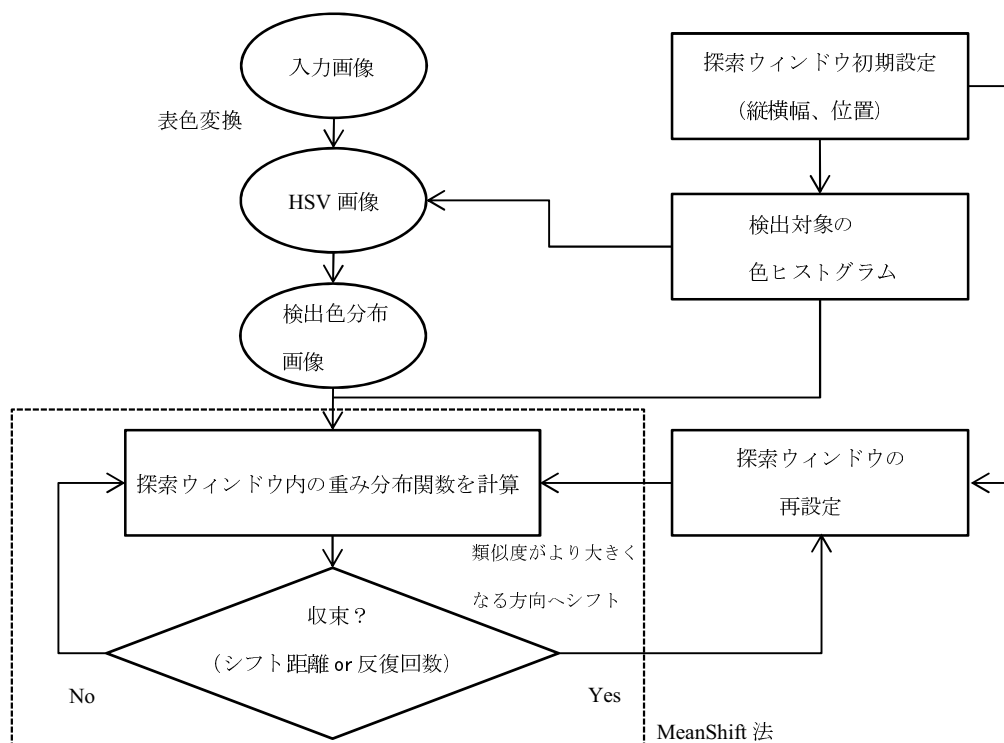


図 3.1 CamShift 法

(※出典: 「OpenCV プログラミングブック」、p219 より図引用、一部筆者改良)

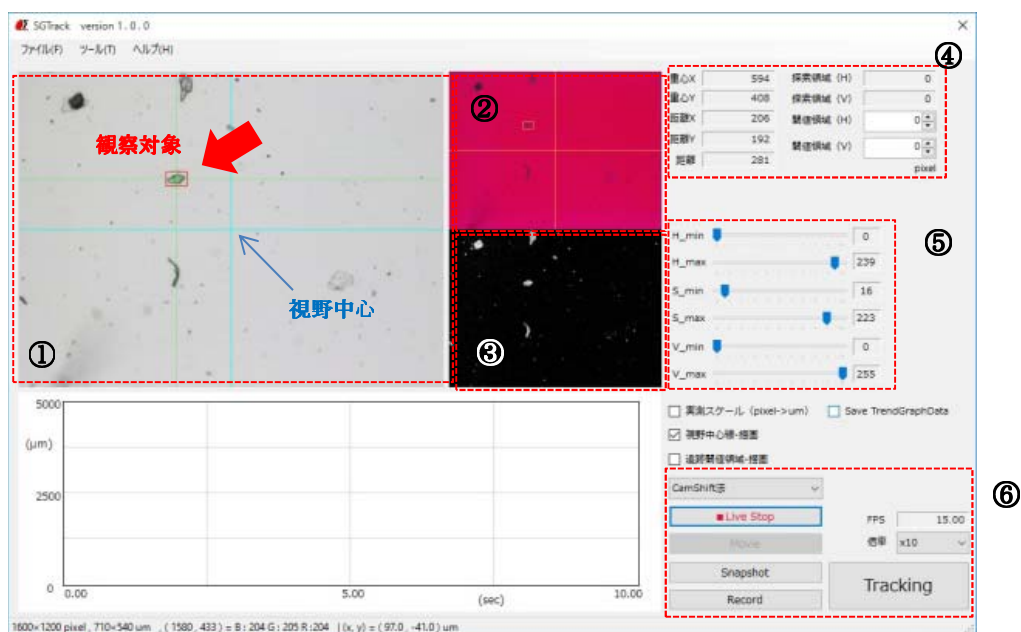


図 3.2 画像処理による対象位置検出用ソフトウェア画面

図 3.2 に、開発した画像処理による対象位置検出ソフトウェアの画面を示す。また以下に本ソフトウェアの主な機能を示す。

#### ①カメラ画像

顕微鏡観察のカメラ画像 (RGB) をライブ表示する。この表示画面内で観察対象を囲む「探索ウィンドウ」を設定する。設定はマウドラッグで行うことができる。

#### ②HSV 画像

RGB で表示されるカメラ画像を HSV 表色系に変換した HSV 画像を表示する。

#### ③検出色分布画像

探索ウィンドウ内の色分布画像を表示する。

#### ④観察対象の位置ステータス

検出した観察対象の重心座標や探索ウィンドウの枠サイズを表示する。

#### ⑤HSV 閾値調整バー

- ・「H\_max」、「H\_min」… 色相値 (H) の最大・最小閾値を設定する。
- ・「S\_max」、「S\_min」… 彩度値 (H) の最大・最小閾値を設定する。
- ・「V\_max」、「V\_min」… 明度値 (H) の最大・最小閾値を設定する。

#### ⑥制御ボタン類

- ・「Live Start/Stop」… カメラ撮像の開始・停止する。

- ・「Snapshot」 … カメラ画像の静止画を撮影する。
- ・「movie/record」 … カメラ画像の動画撮影・記録をする。
- ・「Tracking」 … トラッキングを行う。カメラ画像視野中心から外れた検出位置を XY ステージで元の視野中心に戻す。

観察対象の重心位置を画像処理（CamShift 法）で自動検出し、顕微鏡カメラ画像の視野中心から観察対象の重心が外れたとき、直ちに顕微鏡搭載の XY ステージを制御して観察対象を視野中心に戻してトラッキングする。

### 3-3. 結果と考察

本章では、開発した「画像処理による対象位置検出用ソフトウェア」を用いて、顕微鏡カメラ画像中の観察対象について視野面内(XY)の位置検出とトラッキング実験を行った。図 3.3 にそのシステム構成を示す。構成は、①顕微鏡 (Olympus IX71、40 倍対物レンズ観察)、②XY ステージ (OptSigma 製 : BIOS-Light, 110×75mm, 0.1 $\mu$ m 分解能)、③カメラ (OptSigma 製 : STC-MC200USB, 1600×1200pixel, 15Hz, カラータイプ)、④開発した位置検出・ステージ制御ソフトウェアである。

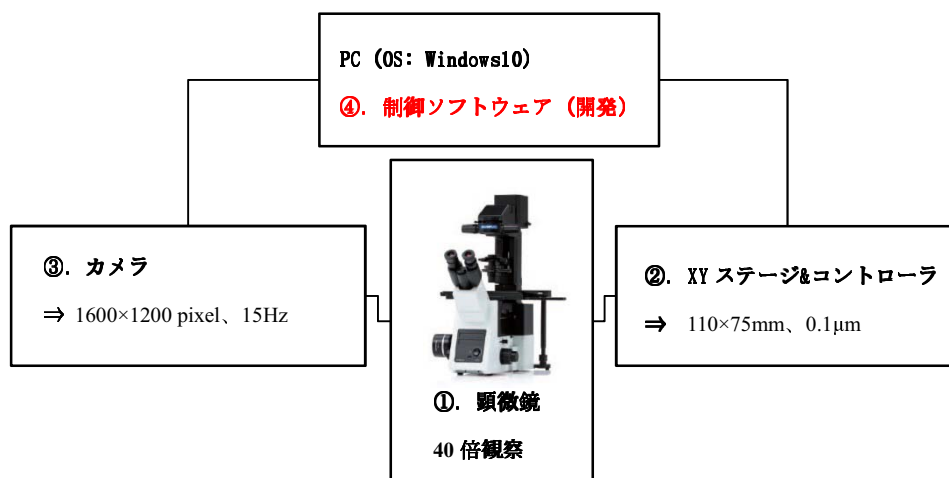


図 3.3 画像処理による位置検出技術を用いたトラッキングシステム構成

顕微鏡のサンプルチャンバに酵母菌を散布し、その中でランダムに選択した 1 個体を対象としてトラッキングを行った。酵母菌（直径  $\phi 5 \sim 10 \mu\text{m}$ ）、顕微鏡対物レンズは 40 倍で観察を行った。

図 3.4(a)は、観察対象に探索ウィンドウを設定する前の状態を示している。カメラ画像中であればいずれの箇所であってもこの初期設定は可能である。図 3.4(b)は、観察対象の酵母

菌に探索ウィンドウを設定した直後を示している。この探索ウィンドウ設定直後から検出された重心位置へトラッキングが開始される。

図 3.4 (c)~(h)画像は全て、上記トラッキング処理中の状態を順番に時系列に示したものである。位置検出に用いたカメラのフレームレートは 15Hz と高速カメラに対して大きく劣るが、今回検出した酵母菌のような浮遊状態の細胞、あるいは急速な運動を行わない観察対象にはその位置検出とトラッキングは十分可能である。カメラ画像処理による観察対象の視野面内位置検出と XY ステージへのフィードバック制御で、を低速な視野面内トラッキングを実証した。

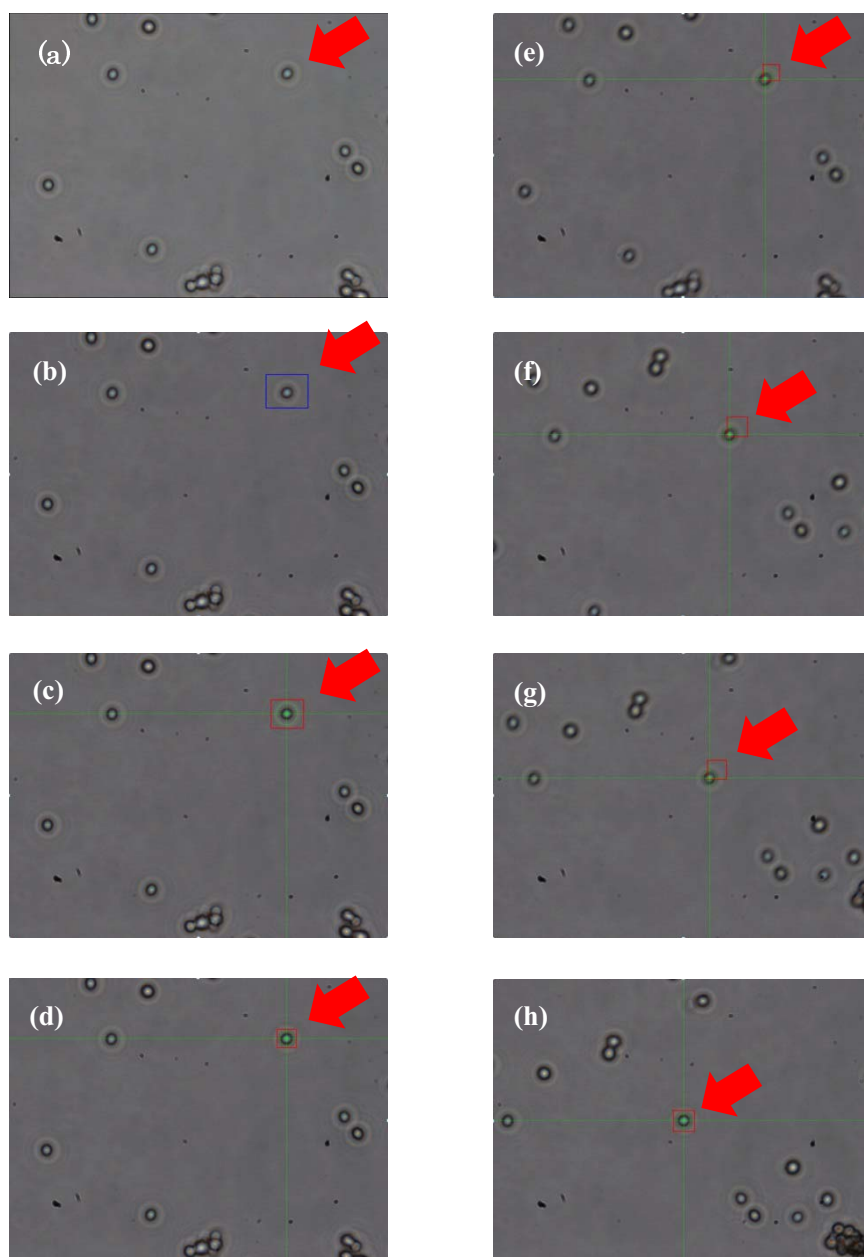


図 3.4 カメラ画像による目標の視野面内 (XY) 位置検出とトラッキング

### 3-4. 結論

カメラ画像と PC による画像処理プログラミングによる低速な位置検出ユニットを開発・試作した。XY ステージへのフィードバック制御も実装し、視野面内に限定した顕微鏡トラッキングシステムを開発した。この装置構成は、ハードウェアは全て既存製品が使えることが大きな利点である。また、開発要素の全てがソフトウェアのプログラミング工程になることを考慮すると、追尾対象の条件を絞り込むなどすれば簡易的な追尾システムとしてなら十分使用に耐えると考ええる。また今回使用した **OpenCV** は無償の画像処理用開発環境であるため、開発コストも安く済むことが大きな利点である。移動速度が低速である対象の場合は、位置検出から駆動系へのフィードバック制御には高速応答性能は要求されない。カメラ視野内を低速で移動する観察対象や、その長時間のトラッキング用途に十分対応できると考えられる。



**【参考文献】**

- [1]柳井啓司、一般物体認識の現状と今後、情報処理学会論文誌：コンピュータビジョンとイメージメディア、Nov. 2007、Vol.48 No.SIG 16(CVTM 19)
- [2]奈良先端科学技術大学院大学 OpenCV プログラミングブック制作チーム、『OpenCV プログラミングブック』、p219、株式会社毎日コミュニケーションズ

## 第4章 高速位置検出ユニットの開発

### 4-1. はじめに

本章では、先の第2章で検討した製品開発コンセプトに基づき、高速位置検出ユニットを開発した。

第2章で説明した高速タイプの顕微鏡トラッキングシステムでは、高速イメージセンサやその画像処理の高速処理で実現される。画像情報で対象の形状などを認識できるため、複雑な対象形状の位置検出が可能となるが、高速イメージセンサや特殊な画像処理技術などを実装した演算処理装置などが必要となり高価になってしまう。そこで、今回開発する高速位置検出ユニットの観察対象には単純な球形状に限定し、3次元位置検出の方法として、非点収差法を採用する。この手法は焦点位置の奥行方向判定(Z)が簡単に行うことができる。

非点収差法の検出器には、通常4分割フォトダイオード(以下QPD)などのポジションセンサが用いられるが、特に光軸に対して横方向に検出範囲が狭いという問題点があった。これに対して既出の高速イメージセンサを用いると、他の顕微鏡トラッキングシステムに対して価格面で優位性を失ってしまう。そこでプロファイルセンサ(浜松ホトニクス社製:S9132)を用いることにした。

このプロファイルセンサは、2次元入力画像に対して直交する2軸方向に投影プロファイルデータを出力する高性能のCMOSイメージセンサで、最大3.2kHzのデータ取得レートを持つ。2方向の投影プロファイルのみを出力するため、データ量が軽く高速出力ができる。また、データ取得レートは通常のイメージセンサよりもはるかに高い。また、これを用いると受光エリア全域で検出スポット光の非点収差形状を評価することができ、QPDなどのポジションセンサに比べて検出領域の広さで優れている。つまり、非点収差法とプロファイルセンサとを組み合わせることにより、簡単かつ広範囲で3次元目標位置の高速検出が可能となる。広い検出領域は、速い運動を行う観察対象や中心にいない観察対象の追跡を開始するのに役立つ。

そこで本章では、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を開発する。対象にレーザーを照明するための光学系と、その対象からの散乱光または蛍光をプロファイルセンサ上に非点収差を持ちながら結像させる光学系を、既製の顕微鏡ポートに取り付ける形でユニット化する。そのために光学設計、機構設計、部品選定を行い、実際に組み立てる。またプロファイルセンサは素子単体で供給されるため、その制御回路とPCとの通信機回路が必要となる。さらにプロファイルセンサの高速性を最大限発揮させるためには直接、駆動系と通信させる機能を持たせた方が良いため、そのための演算回路と信号出力インターフェイスも搭載させる。これをプロファイルセンサモジュールと呼ぶ。

プロファイルセンサモジュールの回路設計を行い、電子回路基板を製作する。また、このプロファイルセンサモジュールの制御と PC 通信用のファームウェア開発と、位置検出演算と駆動系への直接通信を行う演算回路のプログラム開発を行う。

最後に本ユニットが顕微鏡観察下で、3次元の観察対象の位置検出ができるか確認するため、サンプルとして直径  $\phi 45\mu\text{m}$  のポリスチレンビーズを用い、サンプルチャンバ底面に固着させ、XYZ ステージを移動させてその位置検出と 3次元位置推定の評価試験を行った。

#### 4-2. 高速位置検出ユニットの構成

図 4.1 に開発した高速位置検出ユニットを示す。高速位置検出ユニットには、プロファイルセンサと FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いた制御回路、通信インターフェイス、検出信号出力インターフェイス、電源部などを一体化したプロファイルセンサモジュールが内蔵されている。また、観察対象からの散乱光や蛍光を、非点収差を持った状態でプロファイルセンサ上に結像させる光学系が機構部品と共に組み込まれている。高速位置検出ユニットとは、このように信号検出・演算・出力を担うプロファイルセンサモジュールと、顕微鏡からの散乱光や蛍光をそのプロファイルセンサに結像させる光学系の一体型となっている。さらにこの高速位置検出ユニットは顕微鏡ポートへ簡単に取り付けられるようになっており、その顕微鏡機種に応じたアダプタも準備している。

位置検出ユニット構成の構成をまとめると以下のとおりである。

- (a). プロファイルセンサモジュール
  - … プロファイルセンサとその駆動回路で構成
  - (a-1). プロファイルセンサ (浜松ホトニクス社製 : S9132)
    - … 256×256 pixel、FPS:Max 3.2kfps
  - (a-2). FPGA (Field Programmable Gate Array)
    - … 検出信号の演算処理用回路、本機能を利用し駆動ユニットの直接制御も検討
- (b). 光学系
  - … 観察対象の照明およびその散乱光や蛍光のプロファイルセンサ結像

また、図 4.2 に開発した高速位置検出ユニット (試作機) の写真を示す。図右中央にある白黒のボックス中に開発品が含まれ、図の下の方にある緑色のラベルが貼られた四角い箱がレーザー光源である。

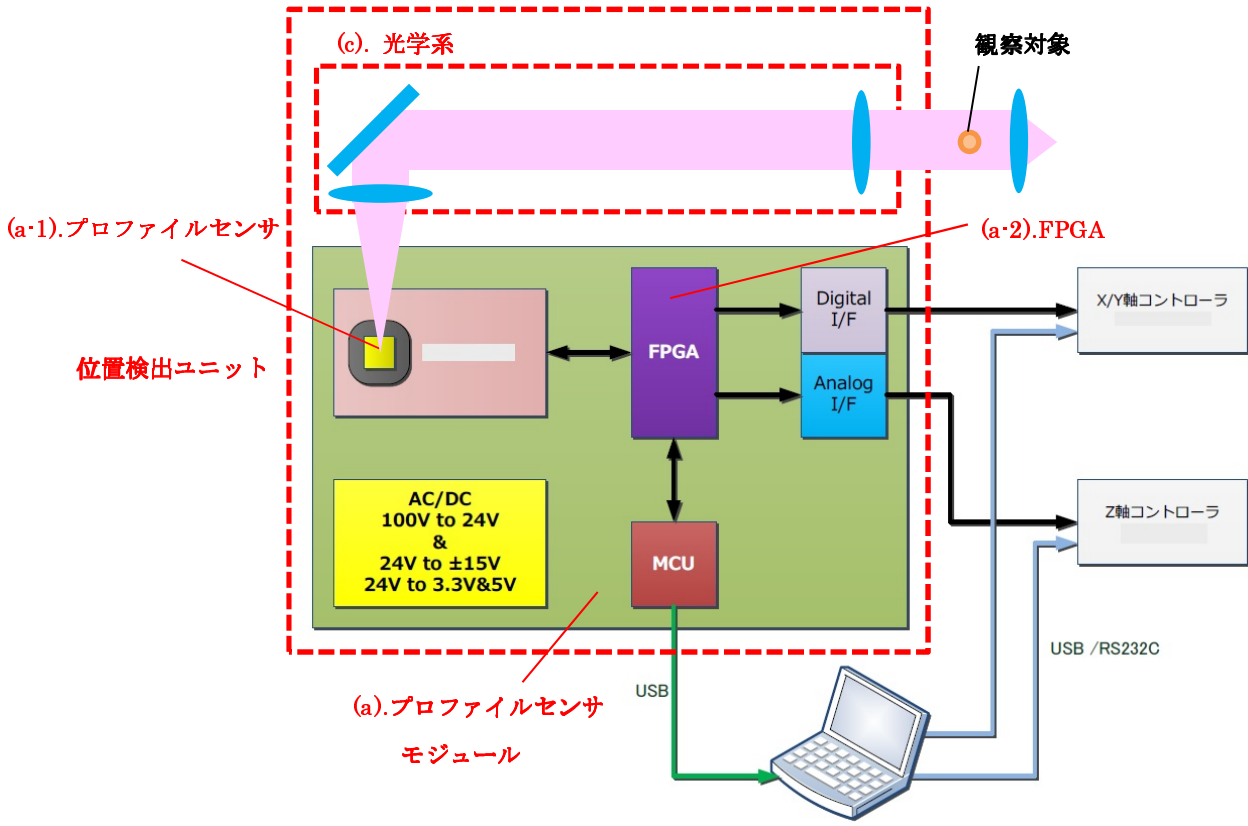


図 4.1 高速位置検出ユニットのイメージ

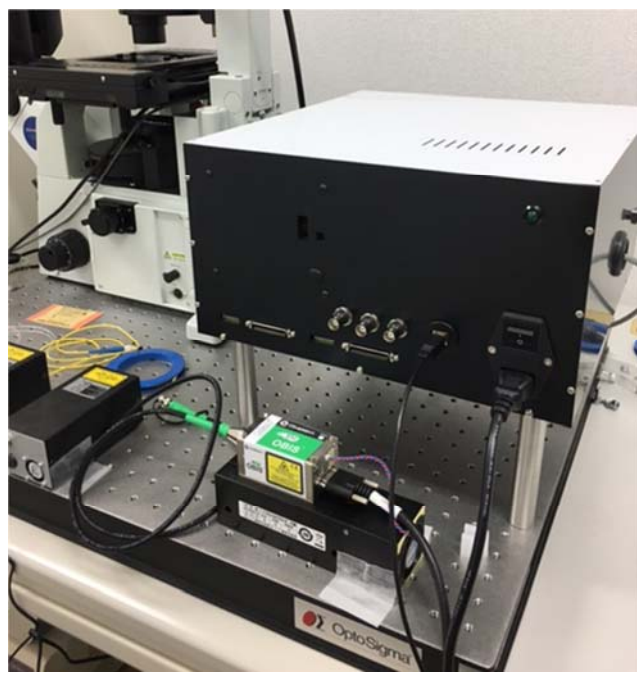


図 4.2 高速位置検出ユニットの試作機 (写真)

#### 4-2-1. 非点収差法による位置検出

非点収差法を用いた 3 次元位置検出方法を説明する。

非点収差法は Bricot らが考案した現行の光学ドライブ (CD) のトラッキング法として使用される最も一般的な技術である [1,2]。

光学ドライブのトラッキングでは、レーザー光を光ディスク上に集光照射し、そのスポットを結像レンズとシリンドリカルレンズを通して、QPD 上に結像する。このとき、QPD 上に結像されたスポットの形状は、シリンドリカルレンズの導入による非点収差の影響で、光ディスクのレンズとの距離位置に応じて、縦長楕円、円形、横長楕円と変化する。QPD の 4 つの出力を用いてスポット形状変化を検出することで、ディスクの位置を知ることができる。スポット形状が常に円形になるように光ディスクの位置をフィードバック制御することで、光学ドライブはトラッキングを行っている。

本システムの高速度位置検出ユニットは、この原理を用いて 3 次元位置検出を行う。観察対象にレーザーを照射し、散乱光、または、蛍光を結像レンズとシリンドリカルレンズを用いて検出器上に結像する。対象の形状が単純であれば、レーザーディスクの場合と同様に、スポット形状が対象の光軸方向の位置によって縦長楕円、円形、横長楕円と変化する (図 4.3)。この形状変化から対象の光軸方向の位置を検出することができる。また、対象が光軸と垂直な方向に移動した場合は、スポットの位置が移動する。つまり、スポットの位置から対象の光軸に垂直な面内の位置を検出することができる。QPD を用いてもスポットサイズと同程度の位置の変化は検出できるが、大きな変位に対しては QPD では検出できない。そこで、プロファイルセンサを用いて、スポット位置とスポット形状を同時に計測し、対象の 3 次元位置の検出を行う。

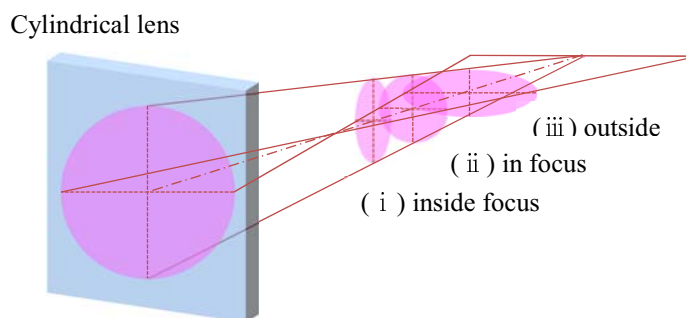


図 4.3 非点収差法

今回、観察対象からの散乱光をプロファイルセンサに結像させる光学系の設計を行った。

この光学系は、レーザー照明された観察対象の散乱光が、顕微鏡光路から、開発する位置検出ユニットに内蔵される本光学系を通り、プロファイルセンサに結像する。検出スポット光は、センサ直前にシリンドリカルレンズを配置することで非点収差をもった状態で

プロファイルセンサに結像する。このとき、非点収差による検出スポット光の形状変化（縦長楕円（近い）、円形（合焦）、横長楕円（遠い））が生じる範囲（以下、奥行方向の分解能）は、対物レンズがもつ焦点深度（奥行方向に一定の範囲だけピントが合う領域）よりも大きくななければならない。これは奥行方向の分解能が対物レンズの焦点深度よりも小さくなってしまうと、検出スポット光の非点収差が検出できず奥行方向の判定ができなくなるためである。そこで、想定する対物レンズ倍率に応じた非点収差法の奥行方向の分解能について確認するため、その光学設計ソフト（ZEMAX）を用いてシミュレーション設計を行った。

図 4.4 は、先に述べた光学設計上の点を考慮しながら実際の対物レンズ倍率とセンサへの結像レンズ、そして非点収差の効果を生むシリンドリカルレンズを適切に設計して得られたスポットダイアグラムである。図 4.4(a)では、その検出スポット光の形状が縦長楕円である。また、3つのスポットは、異なる位置にある物体からの散乱光のスポットである。物体の位置に対応して、スポットの位置が変化していることが確認できる。また、非点収差法の原理から、観察対象がいる位置が焦点奥行方向で焦点面より近い側である。図 4.4(b)は円形なので観察対象は合焦位置にあり、図 4.4(c) は横長楕円なので、観察対象は焦点面より遠い側にある。光学設計とシミュレーションを行うことにより、観測対象を常に焦点深度内にトラッキングするために必要な、位置検出範囲と位置分解能を持つ光学系の設計ができた。

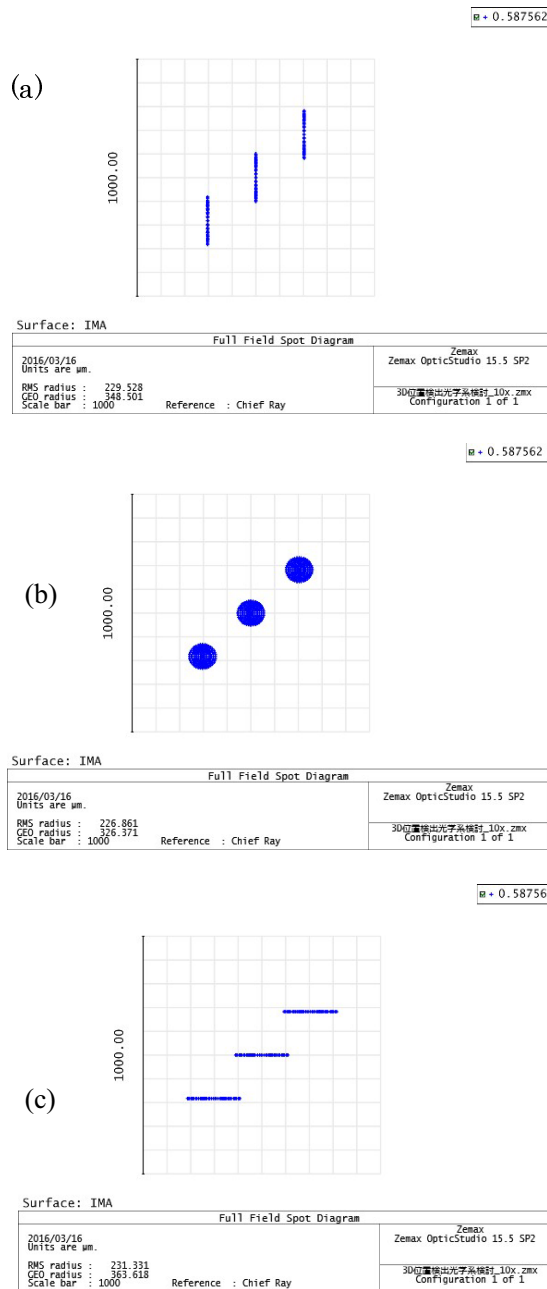


図 4.4 センサ受光面での焦点奥行方向(Z)の光学シミュレーション結果  
 (a)近い側に焦点ズレ。(b)合焦状態。(c)遠い側に焦点ズレ

#### 4-2-2. プロファイルセンサモジュール

先の 4-1 節で先に説明したとおり、プロファイルセンサ（浜松ホトニクス社製：S9132）の採用にあたり、その駆動制御回路を合わせて開発する。下図 4.5 にプロファイルセンサの概略と主な仕様を示す。

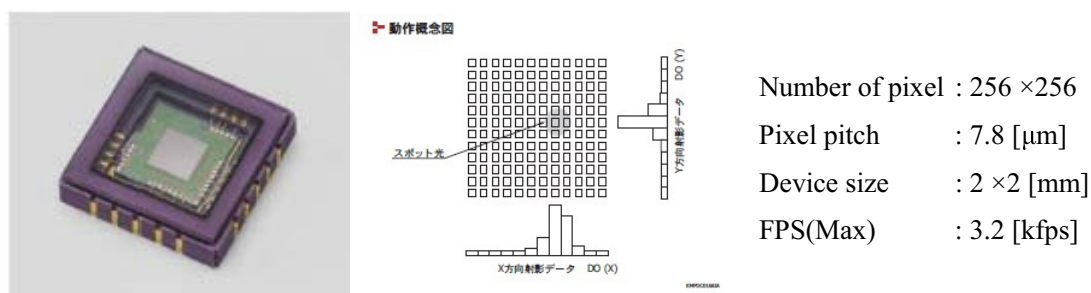


図 4.5 プロファイルセンサ

開発したプロファイルセンサモジュールは図 4.1 に示したとおりであり、主な仕様は以下の機能を持つ。

- ①. 投影プロファイルデータの出力制御を USB 通信でできること
- ②. モジュール側からデジタル I/O 出力、アナログ出力が可能なこと
- ③. FPGA（Field Programmable Gate Array）を実装し、②で「駆動ユニット」への直接制御を可能にすること

プロファイルセンサモジュールの回路設計を行い、電子回路基板を製作する。また、プロファイルセンサチップの制御と PC との通信を行うファームウェアの開発、そして直接駆動系と通信制御するための演算回路のプログラムの開発を行った。

#### 4-3. 位置検出ユニットの検出性能評価実験

本節では、開発した高速位置検出ユニットを用いて、観察対象としたポリスチレンビーズの位置検出と 3 次元位置推定の評価実験を行う。なお、顕微鏡視野面内方向を XY 軸、焦点奥行方向を Z 軸とする。また、顕微鏡用 XY ステージの絶対座標を (X, Y)、対物レンズ用ピエゾ Z ステージの絶対座標を Z とする。さらに、プロファイルセンサの直交する 2 軸の投影プロファイルは、横を x 方向、縦を y 方向とし、算出された 3 次元推定位置を (x, y, z) とする。

図 4.6 に開発した高速位置検出ユニットを取り付けた顕微鏡の概略を示す。まずレーザーダイオード (LD:532nm) から光を観察対象の上部から照射し、観察対象からの散乱光をダイクロイックミラーで反射させ、結像レンズ (f200) によりプロファイルセンサに結像させた。結像レンズの後ろに配置されたシリンドリカルレンズは非点収差を生成する。x および y 方向の投影プロファイルは、PC に送られ、観察対象の 3 次元位置が計算される。またカメラ



(OptSigma STC-MCA5MUSB3 : image size 5.7×4.2mm) を顕微鏡 (Olympus IX71) のカメラポートに取り付け、観察像を記録する。

次に目標の3次元位置推定手順を説明する。図4.2で示したように検出スポット光の形状は、観察対象の焦点奥行方向の位置Zに応じて縦長楕円形(近い側に焦点ズレ)、円形状(合焦)、横長楕円形(遠い側に焦点ズレ)に変化し、検出位置x、yに応じてピーク強度位置が移動する。したがって、xおよびy方向の投影プロファイルのピーク強度位置(x, y)は、観察対象の位置に対応している。一方、ピーク強度は、合焦の時は等しく、x方向に伸びた楕円になると、x方向のピーク強度は低下し、y方向のピーク強度は増加する。y方向に伸びた楕円では逆である。つまり、ピーク強度の比率からz方向の位置を推定できる。

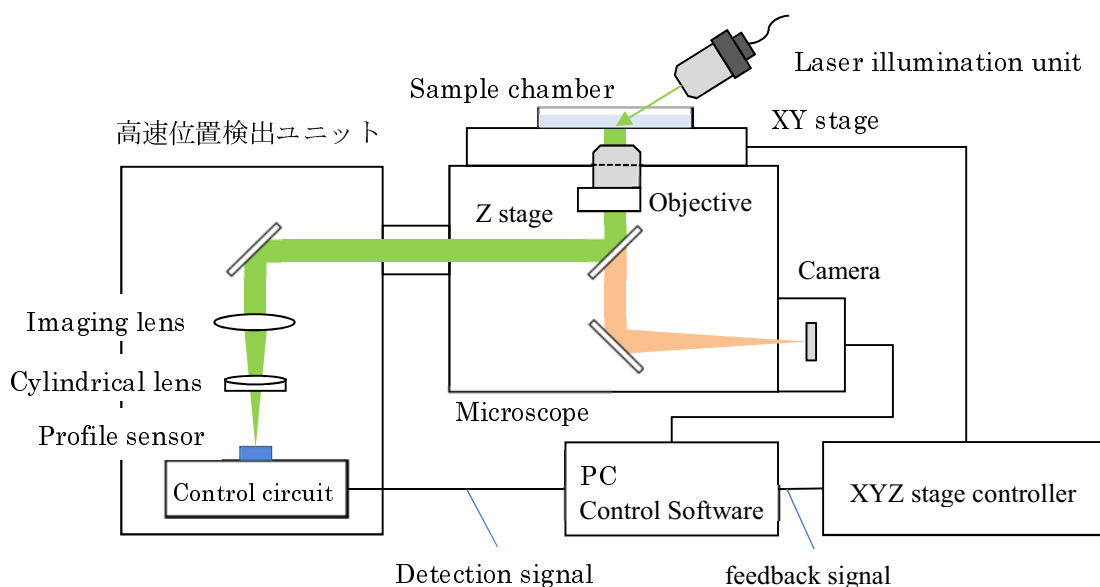


図4.6 顕微鏡3次元トラッキングシステム

サンプルチャンバ底面に固着させたポリスチレンビーズを観察対象とし、顕微鏡用XYステージ (OptSigma BIOS-Light, 分解能: 0.1 $\mu$ m) と対物レンズ用Zピエゾステージ (OptSigma SFAI-OBL-1R, 分解能: 0.01 $\mu$ m) を操作して、その画像撮影と3次元位置推定の評価を行った。この実験により、非点収差法とプロファイルセンサを組み合わせた高速位置検出ユニットで、観察対象の3次元位置推定の動作確認を行った。

まず、開発した高速位置検出ユニットが広範囲の3次元目標位置推定ができることを確認した。直径 $\phi 45\mu$ mのポリスチレンビーズを観測対象として使用し、サンプルチャンバの底面に固着した。このとき、10倍の対物レンズを使用した。顕微鏡視野は約0.57×0.42mmである。

図4.7(a)および(b)は、顕微鏡カメラで撮影した観察対象画像とプロファイルセンサのソフ

トウェアのスクリーンショット画像である。図 4.7(b)において、下側及び右側のグラフはそれぞれ  $x$  方向及び  $y$  方向の投影プロファイルを示す。これらの図では、目標はカメラ画像の中心にあり、投影プロファイルのピーク強度位置も中心にある。

図 4.8(a)および(b)は、観察対象の位置が視野面内方向 ( $XY$ ) で変化したときの投影プロファイルのピーク強度位置 ( $x, y$ ) を示している。図 4.8(a)では、観察対象の位置  $X$  を  $-90\mu\text{m}$  から  $90\mu\text{m}$  に移動させ、このとき観察対象の位置  $Y$  は  $0\mu\text{m}$  とした。図 4.8(b)では、観察対象の位置  $Y$  を  $-90\mu\text{m}$  から  $90\mu\text{m}$  まで移動させ、このとき観察対象の位置  $X$  は  $0\mu\text{m}$  であった。投影プロファイルのピーク強度位置 ( $x, y$ ) は、約  $180\times 180\mu\text{m}$  の検出領域全体にわたって観察対象の位置  $X$  および  $Y$  に対応することを確認した。

図 4.9(a)は、観察対象の位置が焦点奥行方向 ( $Z$ ) に変化したときの、 $x$  および  $y$  方向の投影プロファイルのピーク強度を示し、このとき観察対象は視野中心位置にあった。図 4.9(b)は、 $Z = -12, -6, 0, 6, 12\mu\text{m}$  の観察対象の顕微鏡カメラ画像を示し、わずかな焦点ズレが観察された。観察対象に焦点が合っているとき、 $x$  および  $y$  方向の投影プロファイルのピーク強度は同じであった。観察対象の  $Z$  位置がずれると、一方の投影プロファイルはシャープになりピーク強度が増加した。また他方の投影プロファイルは広がり、ピーク強度は減少した。 $-9\sim 9\mu\text{m}$  の  $Z$  位置の範囲では、 $x$  および  $y$  方向の投影プロファイルのピーク強度は、観察対象の位置  $Z$  の増加に伴って、それぞれ直線的に減少、増加した。これが非点収差法およびプロファイルセンサの効果である。 $x$  および  $y$  方向の投影プロファイルは、その  $y$  および  $x$  方向に沿った積算値である。したがって、投影プロファイルがシャープになるとピーク強度が増加することになる。通常のイメージセンサの場合、幅とピーク強度の間にはこのような単純な関係は存在しない。本システムではこのプロファイルセンサを使用することで、 $x$  および  $y$  方向の投影プロファイルのピーク強度から観察対象の検出スポット光を形状として検出することができる。つまり、ピーク強度の比から観察対象位置  $Z$  を推定することができる。観察対象位置  $Z$  の推定は、10 倍対物レンズの場合、 $-90\mu\text{m} < X < 90\mu\text{m}$ 、 $-90\mu\text{m} < Y < 90\mu\text{m}$ 、 $-9\mu\text{m} < Z < 9\mu\text{m}$  の範囲で行うことができることを確認した。

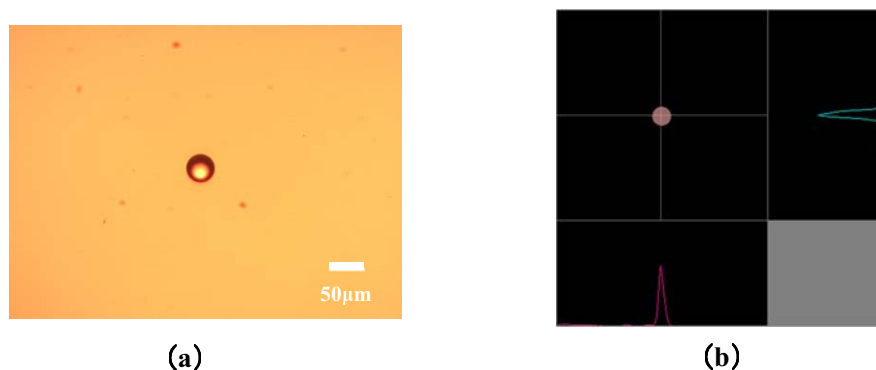


図 4.7 ポリスチレンビーズのカメラ撮影像と投影プロファイル検出時のイメージ

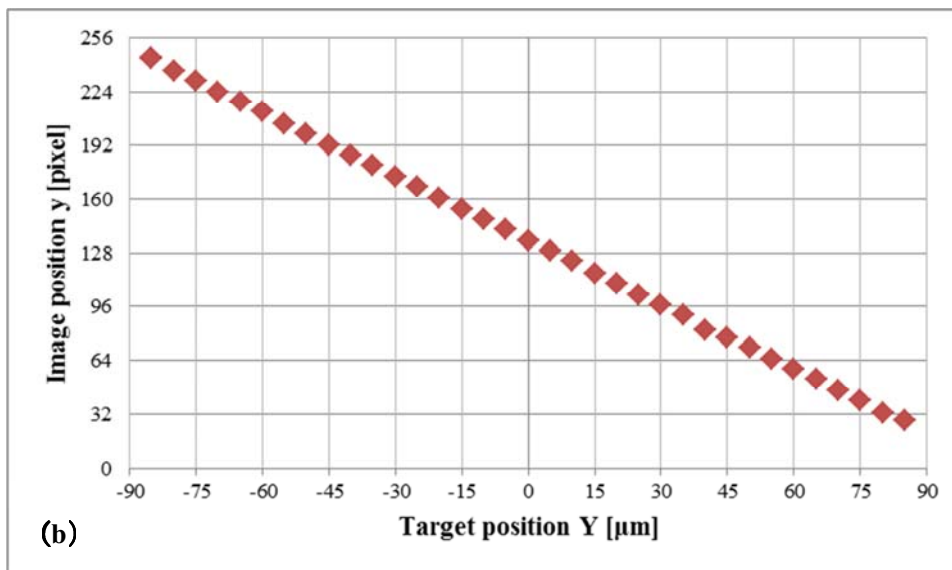
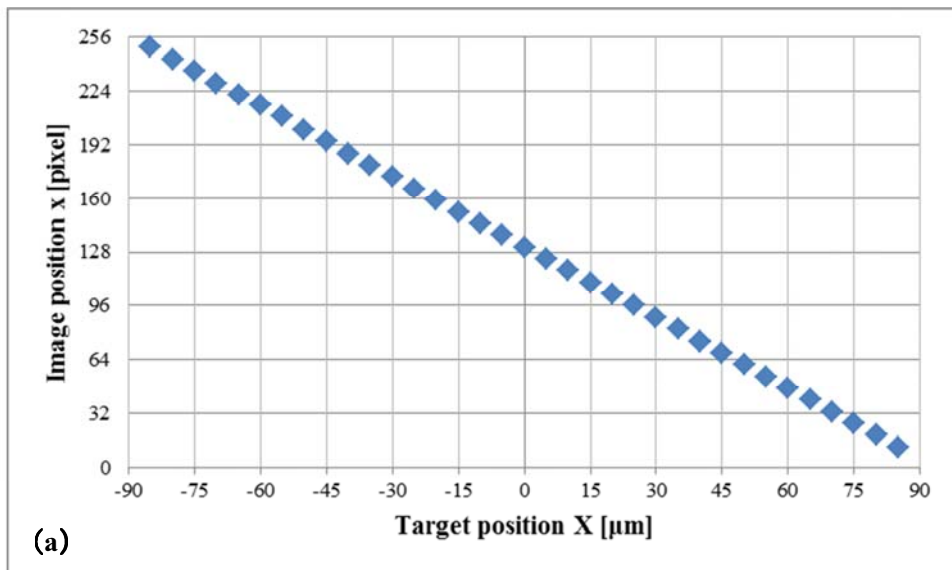


図 4.8 X(a)および Y(b)方向の観察対象位置に対する x(a)および y(b)方向の検出画像位置

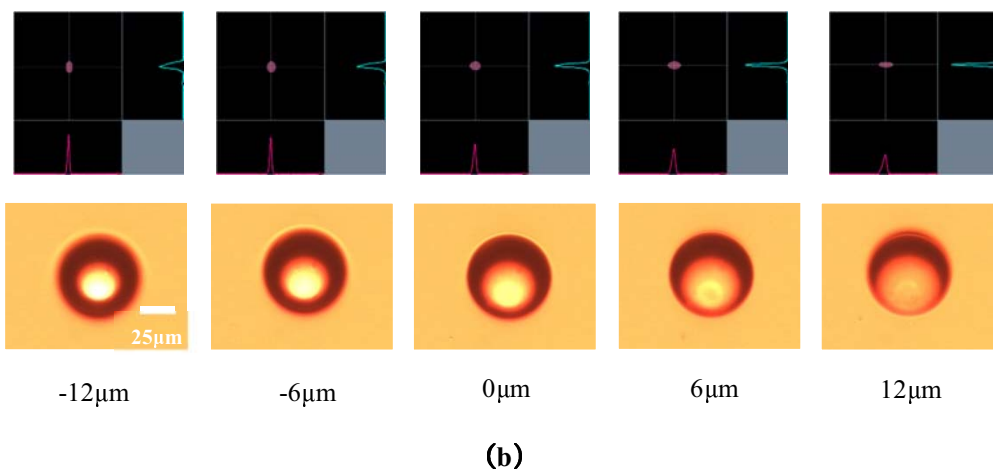
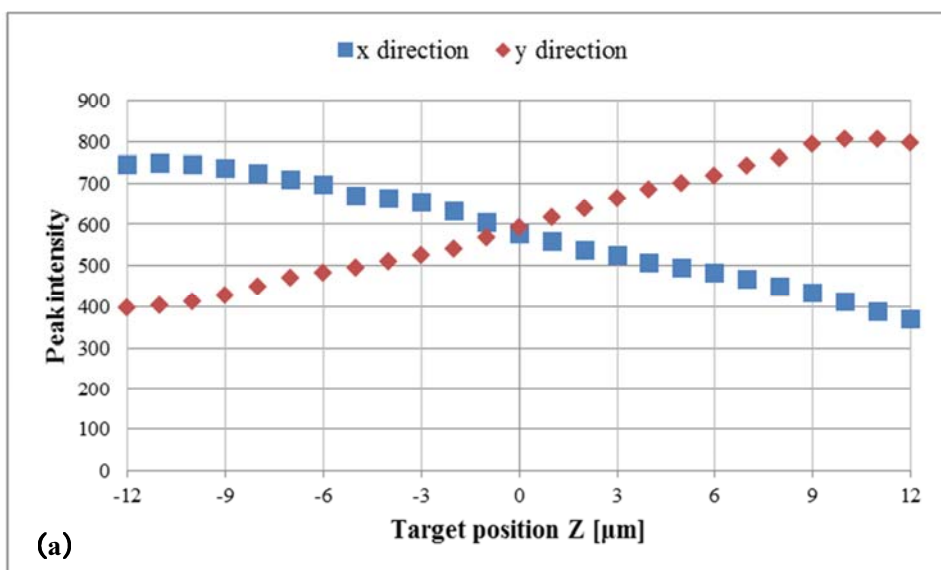


図 4.9 (a) 焦点奥行方向位置 (Z) に対する x, y 方向投影プロファイルのピーク強度。  
 (b) (a) 走査条件時の投影プロファイル画像とポリスチレンビーズのカメラ観察像

#### 4-4. 結論

本章では、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を開発・試作した。非点収差法では、通常、QPD が用いられる。この方法は 3 次元目標位置を容易に検出することができるが、特に光軸に対して横方向には検出領域が狭い。プロファイルセンサは、2 次元入力画像に対して直交する 2 軸方向の投影プロファイルのみを出力するタイプのイメージセンサである。データが軽量となるため、その取得速度は通常のイメージセンサよりもはるかに速い。この非点収差法とプロファイルセンサを組み合わせることにより、広範囲で 3 次元位置の高速検出が可能となる。広い検出領域は移動速度の速い観察対象や、視野面内で中心にいない観察対象の追跡を行うのに適している。

そこでプロファイルセンサの制御回路と PC 通信機能、また直接、駆動ユニットと通信・制御させるための演算回路と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開発した。このプロファイルセンサモジュールの制御として PC 通信用のファームウェア開発、駆動ユニットを直接通信制御するための FPGA 演算回路プログラムの開発を合わせて行った。

次に観察対象へのレーザー照明光学系と、その散乱光や蛍光をプロファイルセンサ上に非点収差を持ちながら結像させる光学系を高速位置検出ユニットに設計内蔵した。またその他の機構設計、部品選定、組立調整を行った。

最後に、開発した高速位置検出ユニットで、顕微鏡観察対象の 3 次元位置検出および推定が可能か評価を行った。観察対象として直径  $\phi 45\mu\text{m}$  のポリスチレンビーズをサンプルチャンバ底面に固着させ、これを顕微鏡 XY ステージおよび対物レンズ用ピエゾ Z ステージで走査してその検出実験を行った。結果、10 倍対物レンズを用いた場合、 $-90\mu\text{m} < X < 90\mu\text{m}$ 、 $-90\mu\text{m} < Y < 90\mu\text{m}$ 、 $-9\mu\text{m} < Z < 9\mu\text{m}$  の範囲で、観察対象の 3 次元位置検出と推定が可能であることが分かった。

【参考文献】

[1] J. Carriere et.al., **Progress in Optics 41**, E. Wolf ed. (Elsevier science, North-Holland, 2000),

Chap. 2, 107-108

[2] C. Bricot, J. C. Leheureau, C. Puech, F. Le Carvenec, Optical Readout of Videodisc, IEEE

Transactions On Consumer Electronics, (Volume: CE-22, Issue: 4, Nov. 1976), 304 - 308

## 第5章 顕微鏡3次元トラッキングシステムの開発

### 5-1. 目的

H.C.Berg は 1971 年に大腸菌を観察するため、顕微鏡における 3 次元トラッキングシステムを開発した[1]。これが最も初期に提案された顕微鏡トラッキングシステムである。観察対象の位置は、異なる位置からの散乱光を集めた 6 本の光ファイバーを用いて検出される。この顕微鏡トラッキングシステムは、この他にも細胞の動きや細菌の研究などの研究に用いられている[2]。

現在は、高速イメージング技術とリアルタイム画像処理能力の向上により、高速カメラや特殊な画像処理、そしてリアルタイム制御処理技術などを多用したトラッキング顕微鏡も開発されている[3,4,5]。高速カメラを用いた追尾システムは、H.C.Berg の顕微鏡追跡システムと比較して広範囲な検出範囲を有するが、専用の演算装置や複雑な画像処理技術の実装が必要になる。したがって、トラッキングシステムの価格は高くなるが、顕微鏡観察下の微生物などに対して焦点位置合わせ技術も含めて高い能力を示している。

そこで別の位置検出手法として、第 4 章で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を新たに開発した。本章では、システム制御ソフトウェアを開発し、高速位置検出ユニットと顕微鏡、および XYZ ステージを統合して顕微鏡 3 次元トラッキングシステムを構築する。また位置操作が可能な状態と、純水中に自由に浮遊した状態の各ポリスチレンビーズについて 3 次元トラッキングを実証する。

### 5-2. 制御ソフトウェアの開発

先の 5-1 節で説明したように、本章の実験に合わせて制御ソフトウェアを開発した。図 5.1 は、その制御ソフトウェアのユーザーインターフェースのキャプチャー画像である。

制御ソフトウェアは、まずプロファイルセンサモジュールで取得した投影プロファイルから非点収差による検出スポット光の形状判別とその重心位置を算出する。次に、XY、Z ステージ制御部に観察対象を視野中心かつ合焦点となるように信号を送る。これを高速に繰り返すことで、観察対象のトラッキングを行う。制御ソフトウェアは、プロファイルセンサモジュールに対して、以下の機能を有する。

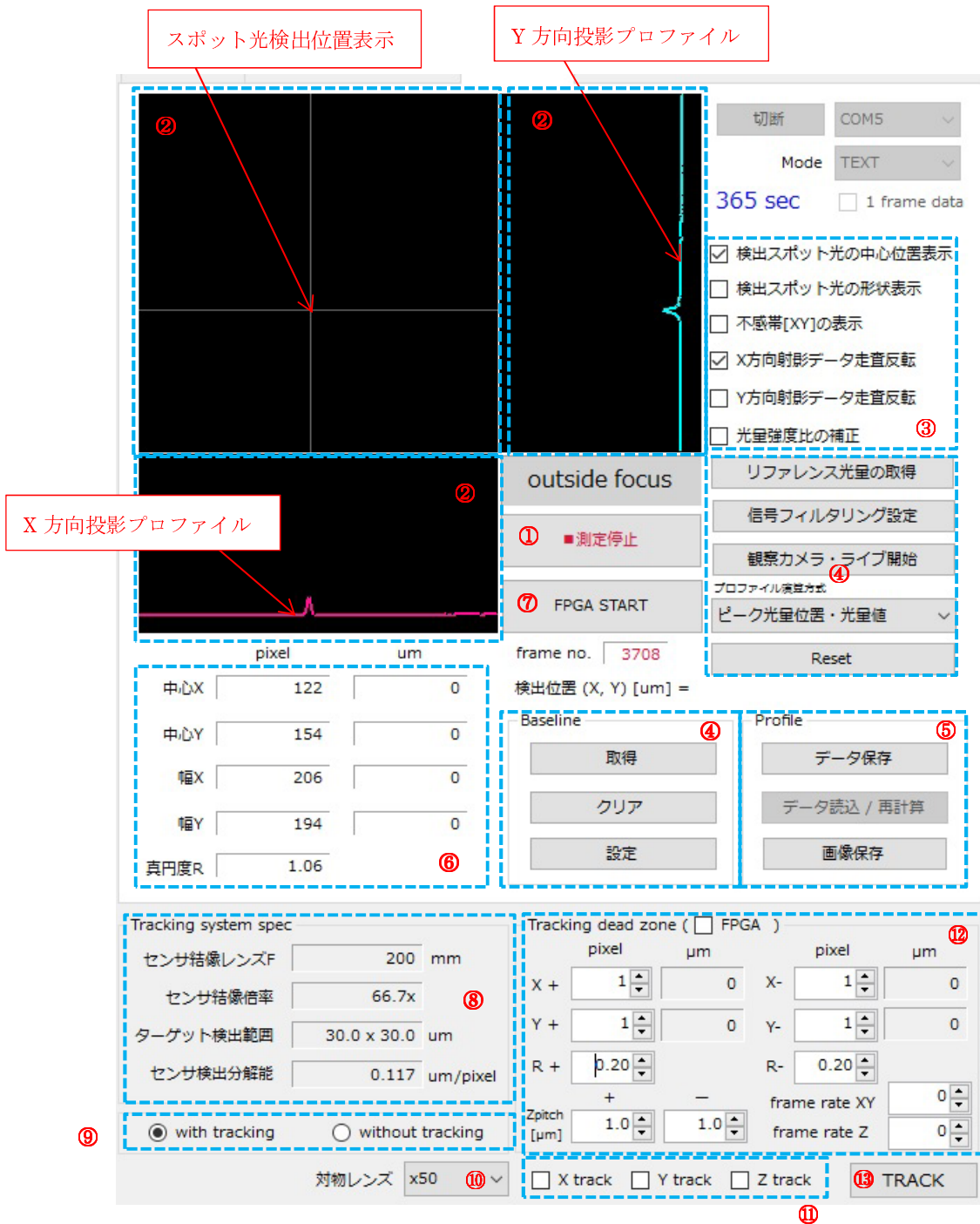


図 5.1 制御ソフトウェア (画面一部抜粋)



#### ① センサ駆動制御機能

プロファイルセンサのデータ出力開始/停止機能ボタン。

#### ② 投影プロファイルおよび位置検出表示機能

中央の表示ウィンドウがプロファイルセンサの受光面を表している。ここに検出したスポット光の重心位置がクロスラインで表示される。また X、Y 方向のそれぞれの投影プロファイルを表示する。

#### ③ 投影プロファイルおよびセンサ受光面の表示設定機能

検出位置を示すクロスライン表示と形状表示の ON/OFF 切り替えを行う。またセンサに設定された検出不感帯エリア表示の ON/OFF 切り替えを行う。また、X、Y 方向の投影プロファイルについて走査方向 (0⇒255ch/255⇒0ch) の切り替えを行う。

#### ④ プロファイル演算方法、設定各種フィルタリング設定機能

検出スポット光の投影プロファイルに対して、重心位置とその幅を決める演算方法をここで設定する。さらに各投影プロファイルのノイズ除去機能を実装している。ここではセンサ全域の背景ノイズ除去機能と各投影プロファイルに個別に設定可能なノイズ除去機能が使用可能である。

#### ⑤ 投影プロファイルデータの操作機能

投影プロファイルの 1 フレーム分のデータについて、保存・読込表示・センサ画面保存機能を持つ。

#### ⑥ 検出スポット光の演算処理結果表示

投影プロファイルデータを基に演算された検出スポット光の重心位置と、縦横幅、そしてその縦横比を真円度として表示する。

#### ⑦ FPGA 制御機能

プロファイルセンサモジュール搭載の FPGA の駆動開始/停止機能ボタン。

#### ⑧ プロファイルセンサ検出ステータス表示

対物レンズの切り替えによって変わるセンサへの結像範囲とその検出分解能を表示する。

#### ⑨ センサ走査中のトラッキング ON/OFF 機能。

トラッキング動作中の設定機能。「with tracking」のとき、フィードバック制御でトラッキングを行う。「without tracking」のときはフィードバック制御せずトラッキングも行わない。

#### ⑩ 対物レンズ切り替え機能

本ソフトウェア内の演算処理として使う計算値をその倍率に応じて切り替える。

#### ⑪ 各軸トラッキング選択

各軸 (X、Y、Z) トラッキング動作の ON/OFF 選択することができる。これで軸ごとの個別のトラッキング状態を観察することが可能となる。

#### ⑫ トラッキング不感帯の設定機能

検出スポット光の重心位置 (x, y) と真円度について不感帯を設定することが可能である。不感帯とはトラッキング動作を行わない領域のことである。この不感帯の設定により、観

観察対象トラッキングで発振（フィードバックの応答と機械のズレによる振動状態）などを防止することができる。なお、この不感帯は FPGA に対しても設定が可能である。

### ⑬TRACK

⑨～⑫で設定した条件で観察対象へのトラッキング動作を開始する。動作開始後、任意に停止することが可能で、その際動作中のセンサプロファイル情報や位置検出の演算情報、ステージのステータス情報がファイル保存（csv）することが可能である。

## 5-3. トラッキング実験の結果と考察

### 5-3-1. 動きを制御した観察対象のトラッキング

観察対象の動きを制御するために、図 5.2 に示すように顕微鏡 XY ステージの上部に別の XZ ステージを取り付け、サンプルチャンバを把持・操作する機構を製作した（以下、試料操作用 XZ アーム）。この試料操作用 XZ アームは、PC からその速度、移動距離、時間を自動制御することが可能である。サンプルチャンバに対する試料操作用 XZ アームの操作軸は、同図 5.2 に示すとおり、顕微鏡視野面内方向に±X 軸（ストローク：10mm、分解能：0.1 $\mu\text{m}$ ）、同焦点奥行方向に±Z 軸（ストローク：20mm、分解能：0.1 $\mu\text{m}$ ）と定義する。

実験では、観察対象として、サンプルチャンバ底面に固着させたポリスチレンビーズを、試料操作用 XZ アームを使って自動的に移動させる。その試料操作用 XZ アームを制御するソフトウェアは、5-2 節で説明した顕微鏡 3 次元トラッキングシステム用の制御ソフトウェアとは独立したものとなる。図 5.3 にそのソフトウェアのスクリーンショットイメージを示す。このソフトウェアを「試料操作用ステージ制御ソフトウェア」と呼ぶ。

試料操作用ステージ制御ソフトウェアの主な機能を下記に示す。

#### (1) 操作軸の個別制御（STEP 駆動・絶対駆動・JOG 運転）

XZ 軸の JOG 運転/STEP 駆動の切り替えを行う。その設定状態に応じてステージ操作キーが機能する。JOG 運転の場合は、ボタンを押している間はステージが移動する。STEP 駆動の場合は、設定する移動量だけステージが移動する。絶対駆動は、指定した座標値へ直接ステージ移動する。

#### (2) 機械原点復帰、論理原点設定・復帰

XZ 軸の機械原点復帰動作（ステージ初期化動作）を行う。また使用中の任意座標を論理原点（ゼロ点）として設定が可能で、その位置への復帰動作も可能である。

#### (3) 操作軸の速度設定

XZ 軸について速度設定（ $\mu\text{m/s}$ ）を行う。

#### (4) 座標登録

自動運転のための座標を登録する。XZ 軸の現座標をセットとしてリスト形式で保存して行くことができる。またそのリスト順を変更や、登録内容の編集、登録座標への絶対駆動などが可能である。またそのリストをファイル保存・読込（csv）することが可能である。また、繰り返し処理や登録座標間の待機時間設定などが可能である。

(5) 自動運転

(4)で登録した登録座標リストに基づいて、登録リスト順に XZ 軸ステージを走査していく。実験では、本機能を用いて、試料操作用 XZ アームを自動制御し、ポリスチレンビーズを移動させる。

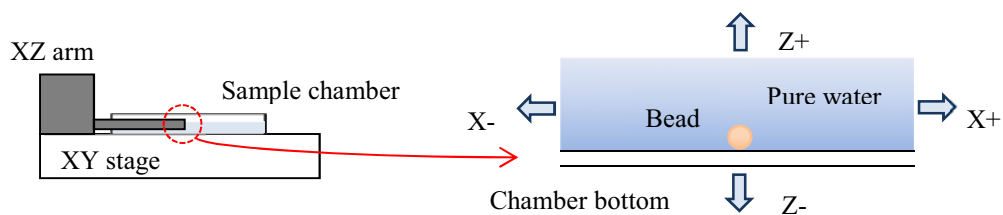


図 5.2 試料セッティング

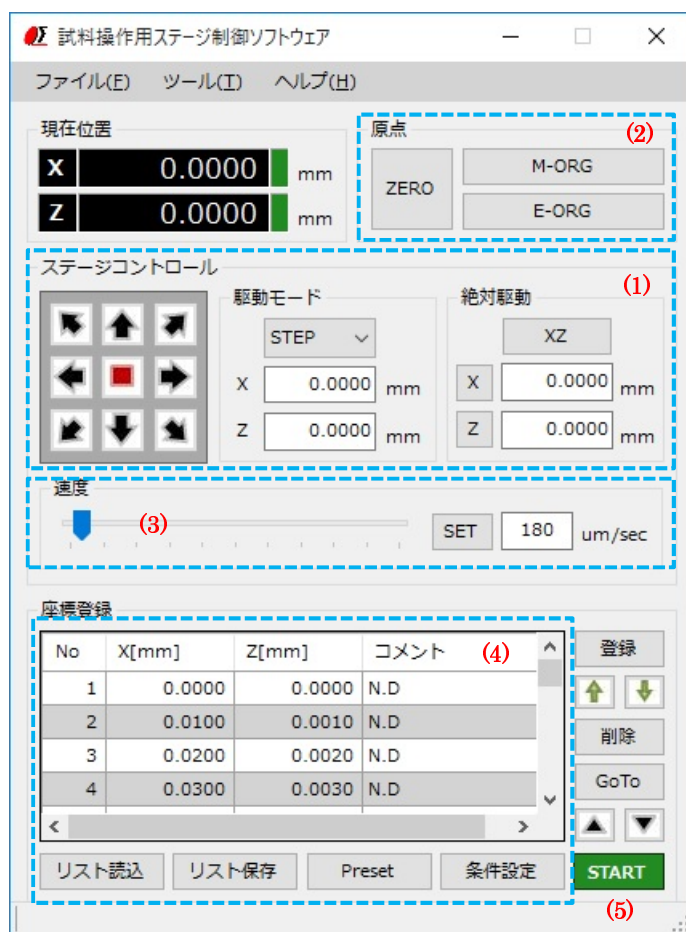


図 5.3 試料操作用ステージ制御ソフトウェア

試料操作用 XZ アームでサンプルチャンバ底面に固着状態にあるポリスチレンビーズを自動制御し、視野面内方向 (X) と焦点奥行方向 (Z) におけるビーズへのトラッキング評価を行った。直径  $\phi 10\mu\text{m}$  のポリスチレンビーズを 20 倍対物レンズで観察し、このときの焦点深度は  $\pm 1.36\mu\text{m}$  (理論値) である。また顕微鏡カメラの撮像範囲は、 $0.285 \times 0.210\text{mm}$  である。一方、位置検出ユニットの検出範囲は  $89.9 \times 89.9\mu\text{m}$  であり、検出分解能は  $0.351\mu\text{m}/\text{pixel}$  である。

まず、ポリスチレンビーズを視野面内方向 (X) に移動速度  $10\mu\text{m}/\text{s}$  で、位置を  $0\mu\text{m}$  から  $1000\mu\text{m}$  まで移動させ、その時のトラッキング評価を行った。

図 5.4(a)は、ポリスチレンビーズの観察対象位置 X とセンサ検出の観察対象推定位置 x の時間変化を示している。図中の青線は、試料操作用 XZ アームの走査制御位置で、ポリスチレンビーズの絶対位置 X を示している。赤線は高速位置検出ユニットで検出されたポリスチレンビーズの視野面内方向 (X) の推定位置 x を示している。この図から、ポリスチレンビーズが移動している 100 秒間、視野面内方向 (X) の中央部に維持されている。

図 5.4(b)は、観察対象推定位置 x の軸範囲を拡大したものである。観察対象の推定位置 x は視野中心から約  $\pm 5\mu\text{m}$  以内の範囲で維持されていた。この  $\pm 5\mu\text{m}$  のブレの原因については、今回使用したステージコントローラにあると推測され、ステージ動作中に移動コマンドを受け付けない仕様が関係していると考えられる。つまり、ステージが位置決めを完了する前にプロファイルセンサの検出位置が更新されても、移動コマンドは実行されないため、検出位置のフィードバックに時間差が生じ、観察対象の位置ブレが発生したと考えられる。

この問題は、PC 制御ソフトウェアからステージコントローラへ直接 I/O 制御することで解決できると考えられる。使用したステージコントローラは I/O 制御の場合、ステージのモーターに対して正転・反転だけで駆動制御するため、問題と考えられる位置決め完了までのコマンド受付拒否機能は働かない。このためプロファイルセンサからの高速フレームレートに対応した移動切り替えができると考えられる。そこで開発したプロファイルセンサモジュールに実装した FPGA からステージの直接制御を行えば、より応答性能のよい結果が得られると考えられる。

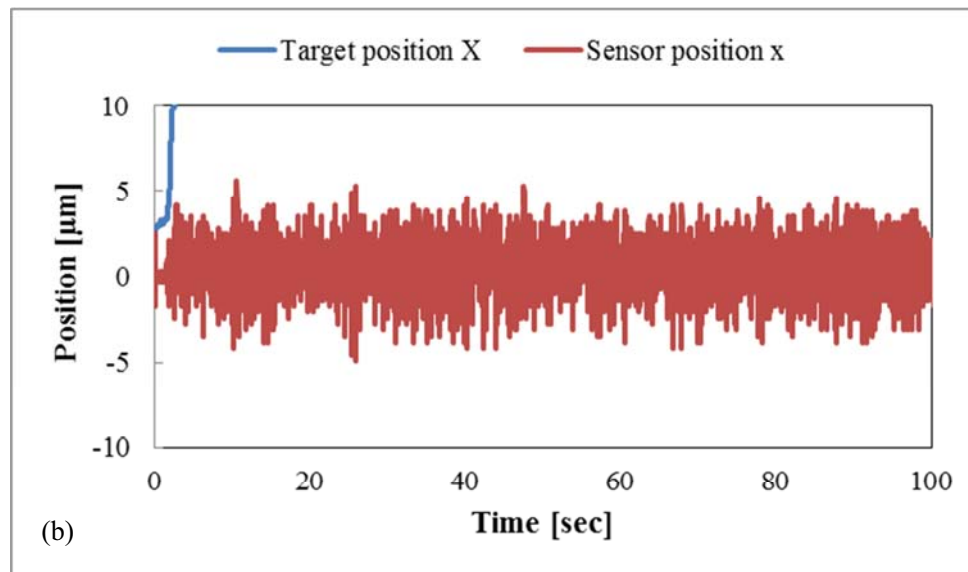
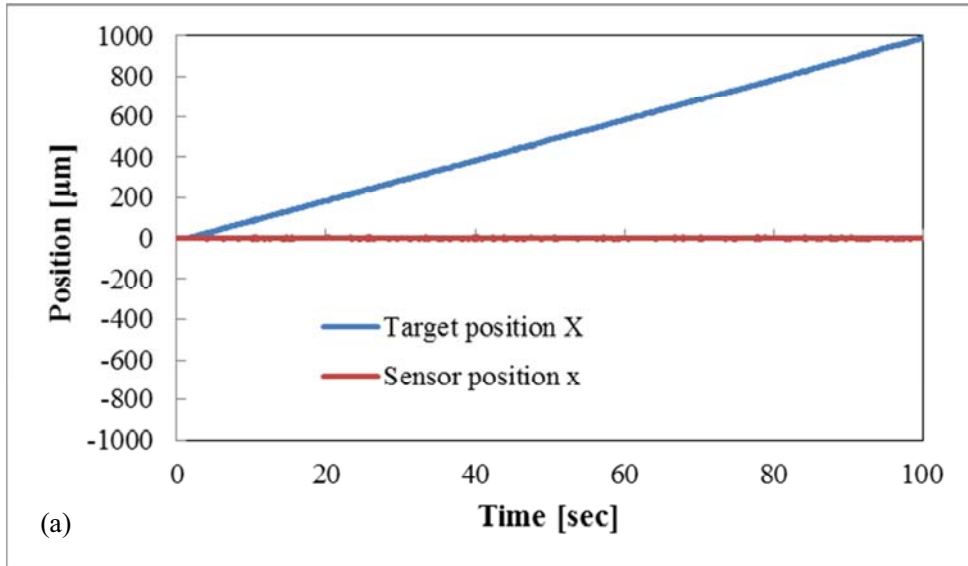


図 5.4 (a) 固着ビーズの観察対象位置 X とセンサ検出観察対象推定位置 x の時間変化。  
 (b) (a)観察対象推定位置 x の詳細

次に、焦点奥行方向 (Z) のトラッキング評価を行う際、対物レンズの発振防止のためにトラッキング制御の不感帯を設定した。ここで不感帯とはトラッキング制御させない領域のことを指している。不感帯内にビーズがあるときは焦点奥行方向 (Z) の制御は行わず、不感帯外に出たときに、合焦点位置に対物レンズの位置を動かす信号を駆動ユニットに送る。この不感帯は、投影プロファイルから得られる x、y 方向のピーク強度比率 ( $y_{\text{peak}}/x_{\text{peak}}$ ) を基に設定した。すなわち、ピーク強度比率 ( $y_{\text{peak}}/x_{\text{peak}}$ ) が 1 になる状態を対物レンズの焦点深度中心位置とする。焦点深度には幅があるため、本実験ではピーク強度比率 ( $y_{\text{peak}}/x_{\text{peak}}$ ) が  $1 \pm 0.2$  の範囲を不感帯とし、その範囲内ではトラッキング制御を行わない。

そこで、20 倍対物レンズの焦点奥行方向 (Z) 位置の検出範囲を確認するため、直径  $\phi 10\mu\text{m}$  のポリスチレンビーズを焦点奥行方向 (Z) に  $\pm 3\mu\text{m}$  範囲で移動させ、x、y 方向投影プロファイルのピーク強度計測を行った。その結果を図 5.5(a) に示す。20 倍対物レンズの焦点深度： $\pm 1.36\mu\text{m}$  (理論値) のおよそ 2 倍程度の幅でピーク強度の変化が見られた。つまり、この範囲で焦点奥行方向 (Z) の位置検出が可能である。またポリスチレンビーズの焦点奥行方向 (Z) の移動に対するピーク強度比率 ( $y_{\text{peak}}/x_{\text{peak}}$ ) の変化を図 5.5(b) に示す。中の直線は、ピーク強度比率 ( $y_{\text{peak}}/x_{\text{peak}}$ ) の線形近似曲線である。

$$z = \frac{R - 1}{A} \dots (1)$$

上式 (1) は、z は観察対象の推定位置 [ $\mu\text{m}$ ]、R はピーク強度比率 ( $y_{\text{peak}}/x_{\text{peak}}$ )、A はピーク強度比率 ( $y_{\text{peak}}/x_{\text{peak}}$ ) の傾きを示している。このとき図 5.5(b) の計測では、式 (1) よりピーク強度比率 ( $y_{\text{peak}}/x_{\text{peak}}$ ) の傾き A を算出すると  $\cdot 0.085$  であった。以上より、トラッキング制御中のピーク強度比率 ( $y_{\text{peak}}/x_{\text{peak}}$ ) を監視することで、焦点奥行方向 (Z) の観察対象位置が推定できる。

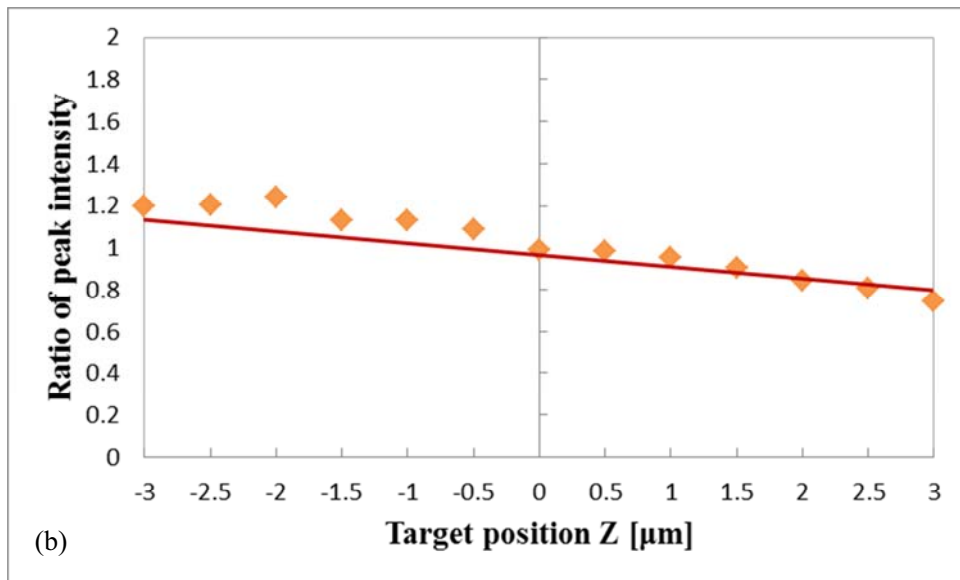
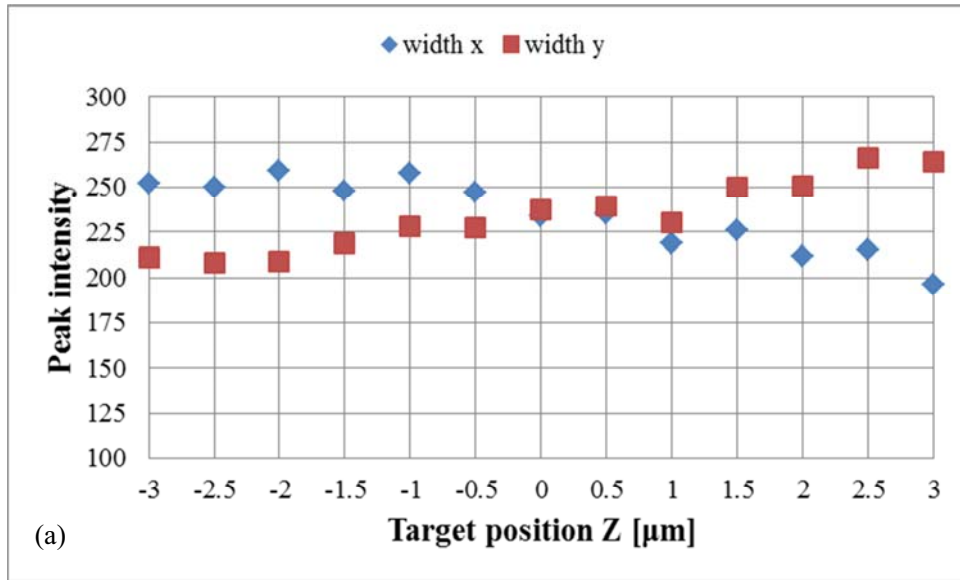
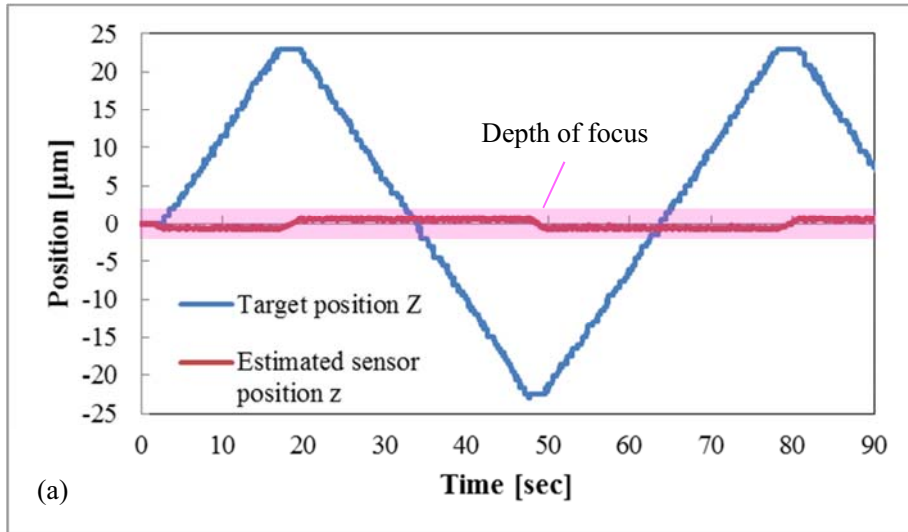


図 5.5 (a) 焦点奥行方向位置(Z)に対する x および y 方向投影プロファイルのピーク強度。  
 (b) 焦点奥行方向位置(Z)に対する投影プロファイルのピーク強度比率 ( $y_{\text{peak}}/x_{\text{peak}}$ )

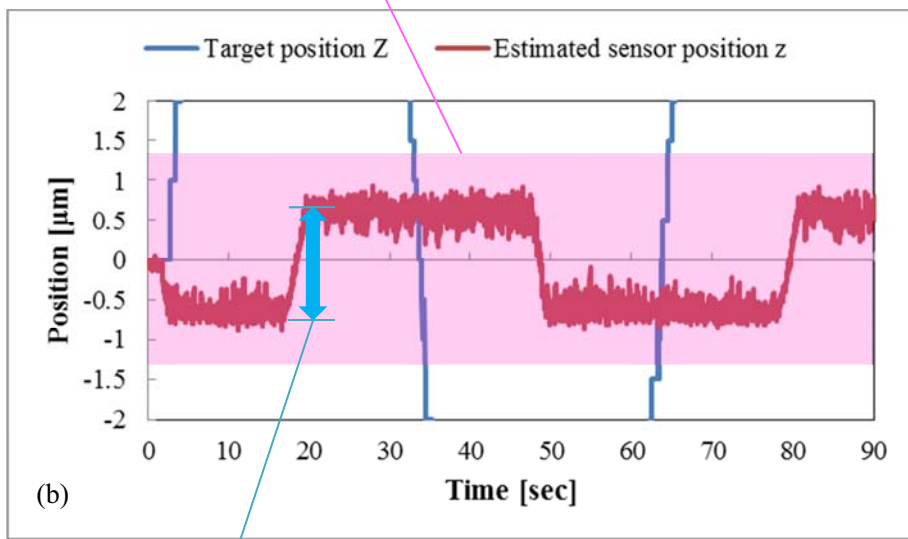
次に、試料操作用 XZ アームの Z 軸を走査速度：10 $\mu\text{m/s}$  で、Z=-24 $\mu\text{m}$  から Z=24 $\mu\text{m}$  で繰り返し移動させた。このとき試料操作用 XZ アームの X 軸は 0 $\mu\text{m}$  位置のままであった。図 5.6(a) は、90 秒間の直径  $\phi 10\mu\text{m}$  のポリスチレンビーズ位置を示している。図中の青線は、試料操作用 XZ アームの絶対位置 Z を示している。赤線は、高速位置検出ユニットで検出した焦点奥行方向 (Z) の推定位置 z を示している。図 5.6(b) は、この観察対象の推定位置 z の軸範囲を拡大したものである。そのときの観察対象の推定位置 z は焦点面を中心に最大 0.93 $\mu\text{m}$  から -0.89 $\mu\text{m}$  の変位量で 20 倍対物レンズを移動させ、観察対象に合焦させていることが分かった。これは設定した不感帯 ( $1\pm 0.2$ ) が 20 倍対物レンズの焦点深度  $\pm 1.36\mu\text{m}$  (理論値) より小さいため、顕微鏡画像に焦点ズレを与えていないことを示していた。

以上の結果から、本システムは速度 10 $\mu\text{m/s}$  で  $\pm 24\mu\text{m}$  を移動する直径  $\phi 10\mu\text{m}$  ポリスチレンビーズ) に対して、20 倍対物レンズ観察時にその焦点深度  $\pm 1.36\mu\text{m}$  (理論値) 以内で、焦点奥行方向 (Z) の合焦状態を維持しながら、トラッキングできることが分かった。





Depth of focus (20x) :  $\pm 1.36\mu\text{m}$



Dead zone

図 5.6 (a) 固着ビーズの観察対象位置  $Z$  と観察対象推定位置  $z$  の時間変化。  
 (b) (a)観察対象推定位置  $z$  の詳細

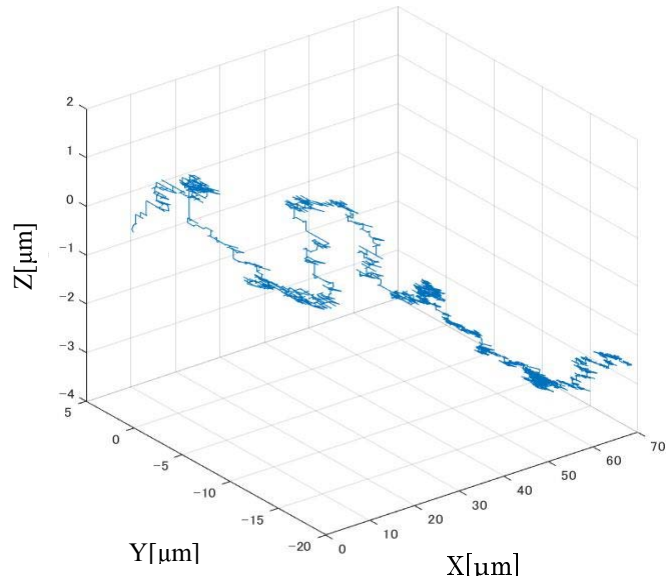
### 5-3-2. 浮遊ビーズのトラッキング実験の結果と考察

サンプルチャンバ内をブラウン運動により自由に動く観察対象のトラッキングを行った。観察対象は純水希釈した直径  $\phi 10\mu\text{m}$  のポリスチレンビーズである。試料操作用 XZ アームは使用しない。観察時の対物レンズ倍率は 20 倍である。

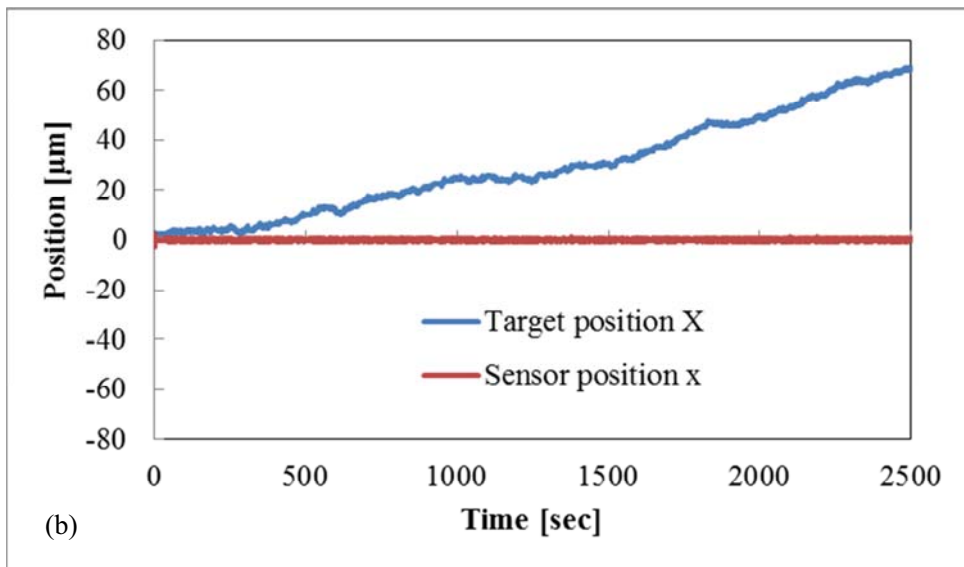
図 5.7(a)は、約 40 分間トラッキングしたときのサンプルチャンバ内で浮遊するポリスチレンビーズの軌跡を示している。この軌跡は、顕微鏡用 XY ステージと対物レンズ用ピエゾ Z ステージの制御より得られ、溶液中ビーズのランダムな動きをよく捉えていた。

図 5.7(b)、(c)、(d)の青線は、顕微鏡用 XY ステージと対物レンズ用ピエゾ Z ステージの制御から得られた絶対座標 (X, Y, Z) の時間変化をそれぞれ示している。また、赤線はそれぞれプロファイルセンサから得られる観察対象の推定位置(x, y, z) の時間変化を示したものである。

ポリスチレンビーズは視野面内方向 (XY) と焦点奥行方向 (Z) のそれぞれ中心付近に 40 分間保持され続け、見失うことはなかった。X、Y、Z 方向の移動距離は、それぞれ  $70\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$  であった。観察対象は視野面内方向の中心周りで X 方向に約  $4.9\mu\text{m}$ 、Y 方向に約  $2.4\mu\text{m}$  の変動範囲内で維持されていた。また、焦点奥行方向 (Z) は  $-0.84 \leq z \leq 0.82\mu\text{m}$  の範囲で維持されていた。Z 方向の変動については、試料操作用 XZ アームを使用した実験 (5-3-1) と同等の結果が得られ、20 倍対物レンズの焦点深度内 ( $\pm 1.36\mu\text{m}$ ) で常にトラッキングされていることが分かった。



(a)



(b)

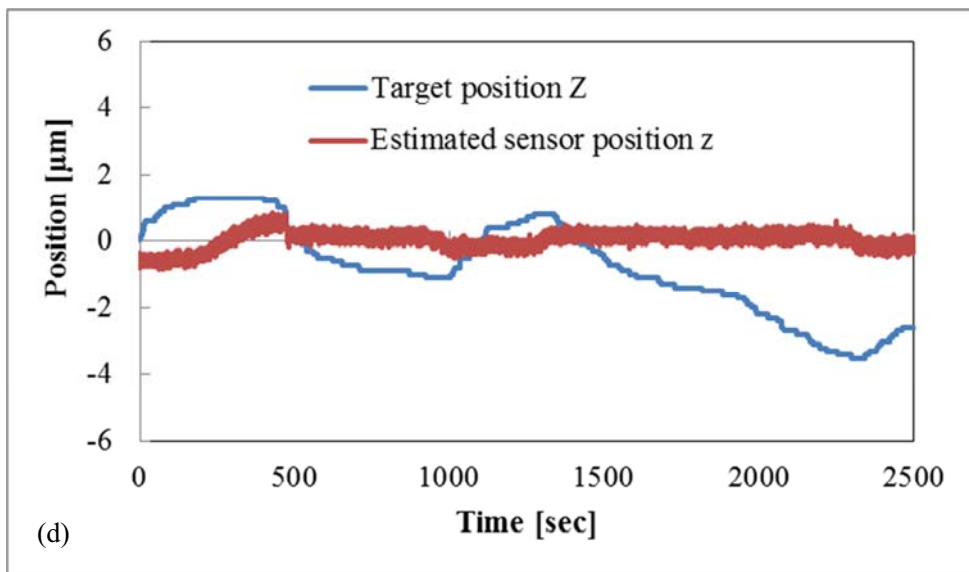
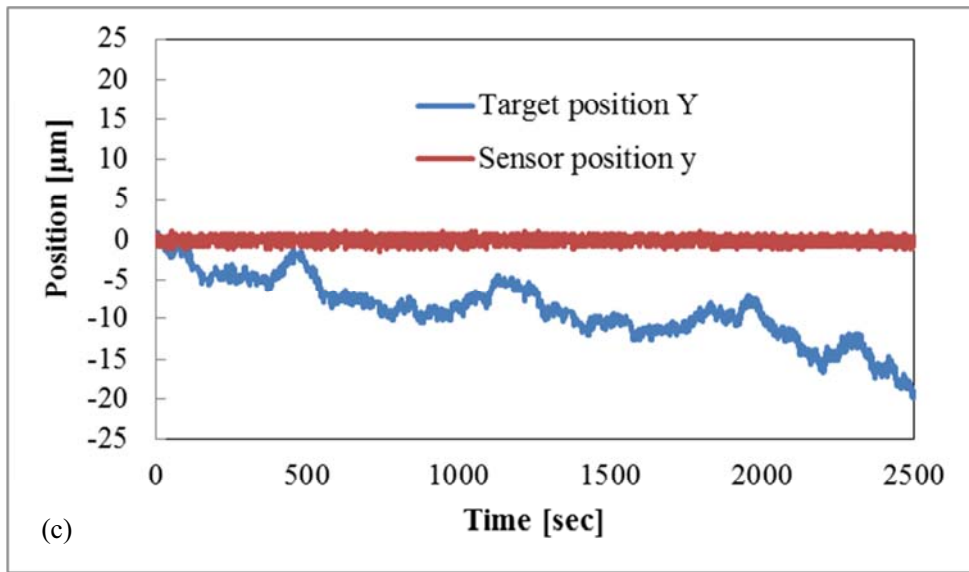


図 5.7(a) 浮遊ビーズの軌跡。(b) 浮遊ビーズの観察対象位置  $X$  と観察対象推定位置  $x$  の時間変化。(c) 浮遊ビーズの観察対象位置  $Y$  と観察対象推定位置  $y$  の時間変化。(d) 浮遊ビーズの観察対象位置  $Z$  と観察対象推定位置  $z$  の時間変化。

#### 5-4. 結論

本章では、まず顕微鏡 3 次元トラッキングシステムの制御ソフトウェアを開発した。さらに高速位置検出ユニットと顕微鏡用 XY ステージ (OptSigma BIOS-Light, 分解能:  $0.1\mu\text{m}$ )、対物レンズ用ピエゾ Z ステージ (OptSigma SFAI-OBL-1R, 分解能:  $0.01\mu\text{m}$ ) を顕微鏡 (Olympus IX71) に接続し、顕微鏡 3 次元トラッキングシステムを開発・試作した。直径  $\phi 10\mu\text{m}$  のポリスチレンビーズを観測対象とし、トラッキング評価実験を行った。実験は 20 倍対物レンズを使用した。

まずサンプルチャンバ底面に固着したポリスチレンビーズに対して、試料操作 XZ アームを視野面内方向 (X) および焦点奥行方向 (Z) を連続的に走査させたときのトラッキング性能を評価した。結果、視野面内方向 (X) のトラッキングでは、 $\pm 5\mu\text{m}$  でその位置がカメラ視野面内中央部に維持されていることが分かった。また焦点奥行方向 (Z) のトラッキングでは、Z 方向に  $\pm 24\mu\text{m}$  走査しても、ポリスチレンビーズを 20 倍対物レンズの焦点深度 ( $\pm 1.36\mu\text{m}$ ) 内でトラッキングしていることが分かった。

次に水溶液中に浮遊してランダムに動くポリスチレンビーズについて、40 分間にわたってトラッキングを行った。結果、視野面内方向 (XY) において  $X \leq 70\mu\text{m}$ ,  $Y \leq 20\mu\text{m}$  のランダムなビーズ移動を追尾することに成功した。このとき X 方向に約  $4.9\mu\text{m}$ 、Y 方向に約  $2.4\mu\text{m}$  でトラッキング制動が維持されており、これで視野面内方向 (XY) のトラッキングを確認した。また焦点奥行方向 (Z) において、 $Z \leq 5\mu\text{m}$  範囲の上下運動を 20 倍対物レンズの焦点深度 ( $\pm 1.36\mu\text{m}$ ) 内でトラッキングしていることを確認した。

以上より、本研究で提案された方法は、例えば第 2 章 2-5 節で示したクラミドモナスのような単純な球状原生生物の観察対象に限定される。また、蛍光タンパク質とビーズ、および量子ドットも適用可能な観察対象である。任意形状の観察対象に対しては、蛍光マーカーを付着または埋め込むことで、トラッキングを行うことが可能である。このように、観測対象の形状が限定されてはいるが、幅広い観察対象への適用が期待できる。ただし本手法では検出領域内に 1 つの観察対象しか存在しないという制限もある。蛍光標識については、このような環境を整えることも容易である。

## 【参考文献】

- [1] H.C. Berg, How to Track Bacteria, Rev. Sci. Instrum **42**(6), 868-871 (1971)
- [2] L. Turner, L. Ping, M. Neubauer, H. C. Berg, Visualizing Flagella while Tracking Bacteria, Biophys J. 111, 630-639 (2016)
- [3] B. Liu, M. Gulino, M. Morse, J. X. Tang, T. R. Powers, K. S. Breuer, Helical motion of the cell body enhances *Caulobacter crescentus* motility, PNAS 111(31), 11252-11256 (2014)
- [4] Y. Arai, K. Wakabayashi, M. Kikkawa, H. Oku, M. Ishikawa, Three-Dimensional Tracking of Chlamydomonas in Dark Field Microscopy, Journal of the Robotics Society of Japan **31**, 1028-1035 (2013)
- [5] M. Maru, Y. Igarashi, S. Arai, and K. Hashimoto, Fluorescent Microscope System to Track a Particular Region of *C. elegans*, IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 347-352(2010)

## 第6章 製品開発プロセスの省察的分析

### 6-1. はじめに

#### 6-1-1. 目的

本章の目的は、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。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。特に分析の中で「動機づけ」と「チーム作り」の2点に着目した。

まず、注目したのは外部で活動する個人の動機づけである。個人にとって慣れない外部環境での活動継続は、この動機づけが適切に確立されているかが重要となる。特に活動初期の自身の動機づけ状態が活動終盤に至るまでにどのように変遷し実践活動に影響したか事例を基に考察する。

また個人が外部で活動を推進していくためには他者の協力が必要である。それが個人の実践活動を支えるチームとなる。ただし本来の所属組織とは異なる外部環境でのチーム作りとなるため、壁にぶつかることが多い。またそれは必ずしも一つではなく複数存在することもあって複雑化しやすい。本章では、個人が外部環境で必要とするチーム作りを円滑に行う要因を探るために事例を基に考察する。

省察的とは、自ら課題を設定し、その課題の解決策を見出し、またさらにその解決策を振り返るという一連の行為を指す。最後に本学での製品開発という実践活動を事例として、個人と組織の反省点を分析し、また今後同じ境遇に直面し得る個人と組織へ提言としてまとめる。

#### 6-1-2. 背景としての所属企業概況と筆者の実務状況

筆者は光学機器メーカーに所属する技術者である。所属企業は従業員300名超、売上70億円ほどの中堅企業である。ゆうに数万点を数える光学・精密部品やシステム製品を開発・製造しユーザーに長年提供し信頼を得てきた。ユーザーの多くは特に大学や国その他公共機関の研究組織である。また、そのユーザーの特性から個別の特注製品を多く取り扱うのも所属企業の特徴の一つでもある。

そのような所属企業の状況にあって、筆者は主にバイオアプリケーションシステムの設計開発に従事していた。所属企業のバイオ関連製品はその数あるシステム製品群の中では安定的な売上を有していたが、関連市場の成熟化と飽和、顧客への一巡化などさまざまな要因でその売上も伸び悩みの傾向が続いていた。

### 6-1-3. 光産創大への派遣

このような状況の下、筆者は2015年4月より所属企業から光産創大へ派遣され、新製品開発を主目的とした事業実践活動を行うことになった。また、製品開発プロセスで生じた課題について省察的分析を行った。ここでは、筆者は製品開発を行う実践者とその過程を分析する研究者としての2つの立場をもつ。

## 6-2. 課題設定

筆者の事業実践活動の内容は、「新製品を開発しその市場を開拓する」ことである。今回担った新製品開発のプロセスには筆者以外に多くの個人・組織が関わった。筆者の場合は5-1節で先述したように、出身組織を外側から見ながらこの活動を進めていくことになった。この特殊な状況では個人が意図したとおりに物事が解決することが少ないため、他者の力をより多く必要とした。

本節ではこのような背景のもと筆者が担った新製品開発のプロセスで直面した問題点について、次の2つのより効率的に製品開発をマネジメントするためのリサーチ・クエスチョンを設定した。

### 6-2-1. リサーチ・クエスチョン1

**「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」**（以下 RQ1）

異なる組織に籍を同時に置きながら社会活動を行うケースは多く存在している。この RQ1 で想定している個人（派遣者）は自身の動機づけや立ち位置に迷う場面に直面しやすい。筆者自身も、出身組織から外部組織へ派遣されてから、実際にそのような意識下で活動を行ってきた。

ところで、この RQ1 で想定する分析対象は、「中短期で異種企業・組織を渡り歩く派遣業種」とは異にすることを留意したい。なお加藤・増田（2016）は、相互（開発現場のメンバー内外、顧客、自分自身）の対話や語りで動機づけ行為を促す「インターファシリテーション」と呼ばれるマネジメント手法を開発した[1]。この手法はコミュニケーションによって構成メンバーの主体性を引き出し、強力なリーダーやファシリテーターを必要としないことが特徴である。ここでは自分自身と他者が相互作用することで動機づけられていく状況が報告されている。本章のように明確な共同体が存在しない場合はそのままの適用は難しいが、動機づけ行為の新しい促進方法としては興味深い研究事例である。

### 6-2-2. リサーチ・クエスチョン2

**「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」**（以下 RQ2）



ここでは RQ1 の状況下、個人が外部組織で活動していくうえで他者による支援が必要となる状況が想定されている。外部組織での新製品開発という特殊なケースではあるが、いずれにしても個人だけでは対処しきれない状況である。製品開発のような現場では他者を巻き込む力が必要とされるため、本章でその要因を探ることには意義がある。なお森下 (2017) は、開発を担う共同体が複数チーム存在する中で、その共同体間を行き来するブローカーの存在を指摘している [2]。そこではブローカーによる共同体間の情報伝搬がその実践活動 (開発) を推進していく役割を担っていたことを示した。その実践活動の進展によって関係メンバーの協力的かつ自発的な行為が出現したことも報告されている。このことから、情報伝達を担う行為者の存在が円滑な「チーム作り」の鍵になることを示す研究事例である。

### 6-3. 先行研究と研究手法

ここでは先述した「動機づけ」と「チーム作り」の研究・クエスチョンに関する理論研究と現場研究を概観し、本章の研究手法について述べる。特に分析概念として用いる、省察的实践、内発的動機づけ理論、対話理論、そして実践共同体についての諸概念を説明する。

#### 6-3-1. 省察的实践

「反省」や「省察」と呼ばれる行為が、専門職の人々にとって重要であると説いたのは D.A.Schön (1983) である。「省察的实践」という概念は 1980 年代に米国における専門職を生業とする人々の危機と向き合う実践と省察から生み出された。例えば専門家がその場で行う判断や行為を普通の人々から見ると、そのひとつひとつに特別な意味が込められているように感じる。ところがその専門家が自身のそのふるまいについて、その全てを筋道立てて論理的に説明しきれぬわけでは決してない。Schön (1983) は著書『The Reflective Practitioner (邦訳：省察的实践とは何か)』[3]の中で、その点について以下のように述べている。なお、少し長いが本研究にとって重要なポイントを指摘しているのでそのまま引用する。

日常生活での行為は、意識しないまま自然に生じる、直線的な行動である。日常生活の行為にとりかかるとき、私たちはある特別な方法でよくわかっているかのようにふるまう。しかし、私たちがわかっているものが何かは、言えないことが多い。文章にしようとする途方にくれ、あるいは明らかに間違った記述になってしまうことに気づく。私たちの知の形成は、行為のパターンや取り扱う素材に対する触感の中に、暗黙のうちにそれとなく存在している。私たちの知の形成はまさに、行為の<中(in)>にあると言ってよい。

同様に、プロフェッショナルのふだんの仕事生活も、暗黙の、行為の中の知の生成に頼っている。有能な実践者は皆、合理的で的確な指摘や、完璧な記述ができないような現象であっても、それを正しく認識することができる。(中略) 有能な実践者は日々の実践の中で、適切な判断基準を言葉で説明できないまま、無数もの判断をおこなっており、規則や手続きの説明ができないまま、自分の技能を実演している。研究に裏打ちされた理論と技能を意識的に用いているときでも、有能な実践者は暗黙の認識や判断、また熟練したふるまいに頼っているのである。

(中略) 行為の中の知の生成を構成する素材をめぐる省察はたいいてい、行為の中の知の生成を構成する素材をめぐる省察へとまっすぐにつながっていく。ひとが取り扱う現象は、当惑するか興味深いものであることが多い。その現象を理解するにつれてひとは、行為の中で暗黙のままになっている理解についてもふり返るようになる。暗黙のままだけでなく表に出してそれを批判し、再設定し直し、将来の行為の中で具体化する理解についても省察するようになる。

行為の中の省察 (reflection-in-action) というプロセス全体が、実践者が状況のもつ不確実性や不安定性さ、独自性、状況における価値観の葛藤に対応する際に用いるくわぎ>の中心部を占めている。(p50-51、下線は筆者) [3]

省察的实践とは、その行為の背景にある考えかたや意味を反復して探ろうとすることである。今までの前提知識をもとに考えるのではなく、行為の最中に課題を見つけ、解決し、そして振り返る。Schön (1983) はそれを「行為の中で省察するとき、実践者はその文脈における研究者となる」(p.70) [3]と述べ、省察的ではない従来の「技術的熟練者」が暗黙の中にその行為の意図性を放置してきたことと対比をしている。

本研究では、6-4節で示す筆者の事例の中に記述し、その時点で自身が下した決断や行為を振り返りながらその意味を見出していきたいと考える。

## 6-3-2. 動機づけ理論・対話理論

### a. 内発的動機づけ理論

多くの動機づけ理論の中で Deci (1975) が提唱した「内発的動機づけ」の概念[4]に着目する。それは、他にも情緒喚起理論、認知的理論、期待理論などの諸理論がある中、Deci (1975) の「内発的動機づけ」理論が本研究の RQ1 に合致するからである。

Deci (1975) は、「内発的に動機づけられた行動とは、有能で自己決定的であることを感じたいという人の欲求によって動機づけられた行動だ」(p70) [4]と定義している。そしてその「内発的動機づけは、生得的なものである。人間には誰しも、生まれたときから、有能で自己決定的であることを味わいたいという、根本的かつ未分化な欲求がそなわって

いる」(p71) [4]とも指摘し、それは人間生来の基本的欲求であると述べている。

また Deci (1975) は「もし、人が、自分の内的状態（たとえば、ある態度や感情、動機）のうちのあるものと矛盾する行為をするならば、彼は不協和を経験し、当の不協和を低減するように動機づけられるであろう」(p183) [4]としている。Deci (1975) はこの「不協和」の状態にある者がそこから脱して自己肯定感を得るための思考様式を説明している。まず「不協和を低減させる一つの手段として、当該活動に対する自己の内発的動機づけを高揚させようとするだろう」(p209) [4]。続いて「彼は、当の活動が興味深いものであり、自分はそれに従事することを内発的に動機づけられているのだと、自分自身に思いこませるわけである」(p209、下線は筆者) [4]。さらに Deci (1975) はこの「不協和」が自身の内側に生じうる条件も示している。「かかる不協和現象は行動の後に生じる否定的結果が存在し、かつ、その人が、当該の行動にたいして個人的責任を感じる場合に、はじめて成立するようである」(p209) [4]。

この「不協和」については程度の差はあっても、それを常に感じている人は多いだろう。社会生活を営む人間である以上、あるべきと考える自己と実際の自己のギャップ常に他と比較することは避けようがない。それは内発的動機づけが生得的なものだと考えれば、十分納得することができる。その時、例えばある目的を達成する基本要因の一つを Deci (1975) の「内発的動機づけ」に求めるとすれば、この「不協和」の低減につながる行為もしくは思考様式は我々にその重要な示唆を与えてくれるはずである。

## b. 対話理論

ロシアの言語哲学者 Bakhtin (1975) は、著書『小説の言葉』の中で、対話理論の様式として「権威的な言葉」と「内的説得力のある言葉」について述べている [5]。「権威的な言葉」については次のように表現している。

権威的な言葉は、いわば括弧にくくられるだけでなく、より威厳に満ちた強調を、たとえば独自の字体をも要求するのだ。それを枠付けするコンテキストの力を借りて、その中に意味の改変を起こすことはさらに困難であり、その意味の構造は死せるもののごとく不動である。なぜなら、その意味の構造は完結しており、一義的であり、その意味は逐次的なものに自足し、骨化しているからである。権威的な言葉が我々に要求するのは、無条件の承認であり、自由な適用や、自分自身の言葉との同化などでは全くない。それゆえ権威的な言葉は、それを枠付けするコンテキストとの、その境界とのいかなる戯れをも、いかなる漸次的かつあいまいな移行をも、自由で創造的な様式化を行ういかなる変奏をも許さない。権威的な言葉は、我々の言語意識の中に、密集した分かち難い統一体として侵入してくるのであって、それに対する態度は無条件の是認か、無条件の拒否のどちらかでなければならない。(p161-162、下線は筆者) [5]

また Bakhtin (1975) は「内的説得力のある言葉」について、「権威的な言葉」とは「全く別の可能性を開示するのは、我々にとって内的説得力があり、我々が承認した他者のイデオロギー的な言葉である」(p164) [5]と述べ、以下のように説明している。

うわべだけの権威的な言葉と異なり、内的説得力のある言葉は、それが肯定的に摂取される過程において、<自己の言葉>と緊密に絡みあう。我々の意識の日常において、内的説得力の持つ言葉は、半ば自己の、半ば他者の言葉である。(中略) 内的説得力のある言葉の意味構造は完結したものではなく、開かれたものである。内的説得力のある言葉は、自己を対話化する新しいコンテクストの中に置かれるたびに、新しい意味の可能性を余すところなく開示することができる。内的説得力のある言葉は同時代の言葉であり、未完結な同時代性との接触の圏域において生まれた言葉、すなわち同時代化された言葉である。それは同時代人に呼び掛けるだけでなく、子孫にも同時代人に対するように呼び掛ける。(p165-166、下線は筆者) [5]

ここで会社組織のように指示する者と指示を受ける者が混在する環境を想起したとすると、この「権威的な言葉」と「内的説得力のある言葉」によるもののどちらの形式で物事を進めるべきだろうか。その指示が「権威的な言葉」であれば「無条件の是認か、無条件の拒否」という反応が予想される。例えば人間の生命の安否にかかわる場面では、むしろ意図的にそうしなければならないという理解は十分可能である。それに対して、創造的な仕事を行うような場面で「いかなる変奏をも許さない」という態度からは何も生まれてこないことは容易に想像ができる。

会社組織で活動する大多数の指示される者たちは、指示する者たちから「内的説得力のある言葉」を期待するか、もしくは常に「自己の言葉」におきかえようとしている。自己の言葉に「変奏」された行為は、その創造的な仕事をより強力に推進していくはずである。

### 6-3-3. 実践共同体の概念

筆者が行ってきた製品開発には、光産創大や所属企業など多様な組織や個人が携わってきた。そこでは自身が中心となる場面や逆に参加する場面など目まぐるしくその役割が変わった。そのような状況下で、筆者とその関係者の関わりを表す考え方として「実践共同体」の概念を援用する。

Wenger (1990) によると、実践共同体とは、人間社会を構成する際に中心となる組織化原理であり、活動するための基本的な配置を成しているものであり、知識、技能の習熟、理解が組織化されていく所であり、個人を規定するための機会と材料を提供していく社会的な構成体である[6,7]。

この実践共同体は、実践を行うことがその集まりに意味を持たせることになり、意味を持ったその集まりは共同体としての存在を示すことになる。筆者の場合、製品開発という

実践を行うことでそこに関わる人々の集まりが共同体となり、また製品開発の状況に応じてその共同体がかたちを変えながらいくつも形成されることになった。

またここで Wenger (1990) は、このような複数の実践共同体をまたいで行き来する者を「ブローカー」と表現する。このブローカーは実践共同体への個人の関与の程度について着目したものである。複数の要素を内包する製品開発のような実践では、それに従事する者をはじめとして共同体間の行き来が頻繁にある。

Lave and Wenger (1991) の『状況に埋め込まれた学習 (邦訳)』では、実践共同体への参加形式を「正統的周辺参加」と表現する[8]。これは新参者が古参者の共同体に周縁的に参加し、技能や知識を習得していくいわゆる徒弟制を通じた学習の問題に着目したものである。またその新参者の周辺参加が向かっていくところを「十全的参加」と呼んでいる。ただしこの十全的参加の形態にも多様性があり、その過程は直線的ではなく複雑性をもち、またその参加する共同体に対しても中核を担う成員（十全的参加者）を志向する者（正統的周辺参加者）だけではなく、「非成員性」や「非参加のアイデンティティ」を形成する者もいることを指摘している。

#### 6-3-4. セルフエスノグラフィー（現場研究）

現場に介在して調査研究を行う手法の一つにエスノグラフィーがある。日本語では民族誌と訳され、未開の民族や地域社会の文化・行動様式をフィールド調査で描き出す研究手法である。

W. F. White (1943) は、米国イタリア系移民からなるギャング団内のリーダーシップやメンバーの集団における地位の問題、コーナー・ボーイズ（街角の若者たち）とカレッジ・ボーイズ（大学生たち）の生き方の違いなどをこのエスノグラフィー調査で描き出した[9]。

佐藤（1992）は、京都の暴走族を対象に実際にその中に入って行動を共にすることで、その暴走行為の中で生まれる「遊び」や「芸術性」を見出し、『暴走族のエスノグラフィーモードの叛乱と文化の呪縛』[10]として描いた。

またエスノグラフィーの一種で、オート（自己）エスノグラフィーまたはセルフエスノグラフィーと呼ばれる調査手法がある。この調査手法は、自己を再帰的に振り返り、著者自身の文化の中で経験知を用いて自己と他者の相互作用に注目する研究手法である（Ellis and Bochner, 2000, p.740）[11]。自己を振り返るという意味で、このセルフエスノグラフィーは省察的实践と理論的に通底している。

佐藤（2011）は、保育者と研究者という両者の立場から、自身の保育実践をセルフエスノグラフィーで描き出し、その当事者でしか語ることができないエピソードをその経験知と共に明らかにした[12]。Hoerber and Kerwin (2013) は、自身のスポーツ観戦の経験を研究対象とし、その反省性の重要性を強調している[13]。川田ら（2015）は、自身の会社とマシンビジョン・ベンチャー企業との間の協業を振り返り、著者の起業家の視座から、相互の役割分担が重要であることをセルフエスノグラフィーで明らかにした[14]。

加藤・増田（2016）は、製品開発の現場でそのコンセプトを決める過程をセルフエスノグラフィーで描き出し、その開発メンバーの貢献意欲やその変遷を内発的動機づけ理論や対話理論の概念で明らかにした[1]。また同様に森下（2017）は、新製品開発事例をセルフエスノグラフィーで描き、開発に関係する各チームと著者自身の変容を省察的に分析しながら、それを実践共同体の概念で明らかにした[2]。

本章では筆者の新製品開発をセルフエスノグラフィーで描き出す。またそれを省察的に分析し、内発的動機づけ理論、対話理論、実践共同体の諸概念を援用して考察を行う。

## 6-4. 実践事例

### 6-4-1. 背景

本節では筆者が光産創大で行った事業実践活動についての事例を記述した。事例については関係者同士の会話（打ち合わせなど）やインタビューなどを筆者が可能な限り議事録やメモとして残したものを時系列に記述した。

光産創大での事業実践活動は、所属企業の新製品開発である。製品開発の技術面では研究者 A による支援を受けながら開始することになった。研究者 A は光計測を専門とする光産創大所属の研究者である。また同じく光産創大に在籍する生物学を専門とする研究者 M、N らによる支援も受けることが可能となった。製品開発の主な活動は光産創大で行った。

新製品開発は 2016 年 2 月から本格化した。開発は、新製品の構成要素分析、新製品コンセプトの策定、開発技術の絞り込み、製品試作などいくつも工程がある。製品試作ではユニット開発が大半を占め、筆者と所属企業、光産創大の研究者ら、そして外部の Y 社との共同開発という作業となった。研究者 A には原理・技術応用のアイデア、所属企業には試作製作、そして Y 社には高速位置検出ユニットの中で重要なモジュール開発と、それぞれ支援を得て 2017 年 2 月に試作を完了した。

この製品開発のプロセスを事例記述し、客観的に眺めると、当時の筆者個人に起きていた問題を浮かび上がらせることになった。その事例からは筆者個人が感じていた当時の記憶・経験とは別の事実を示すことにもなった。

なお筆者の事業実践活動に関係する人物については下記のとおり一覧として整理して示す。なおこの一覧以外にも多くの関係者がいるが、今回は筆者の事業実践活動に直接または重要度の高い人物のみを記載している。なお個人が特定されないように幾人かについては複数の人物を一人として表現している。また全ての関係者について敬称は省略するものとする。

<人物一覧>

#### 【所属企業】

- ・上司 G : 筆者所属部門の上長
- ・筆者所属の同僚技術者（数名）

【光産創大】

- ・研究者 A：主要な共同研究者で光計測の専門家
- ・研究者 B：筆者所属研究室の上長、光計測の専門家
- ・研究者 M：生物学の専門家
- ・研究者 N：生物学の専門家

【Y社】… プロファイルセンサモジュールのハード/ソフト開発技術者（数名）

【H社】… プロファイルセンサの開発・製造メーカー

【R社】… 既存の顕微鏡トラッキングシステムの開発・製造メーカー（競合）

【その他外部関係者】

- ・研究者 J：他大学の研究者。生物学の専門家
- ・研究者 O：H社所属の研究者。生物学の専門家

#### 6-4-2. 事例

本節では、光産創大派遣以前の2015年1月から3月まで、そして光産創大派遣以降の2015年4月から2017年11月までの筆者の事業実践活動について、そのプロセスを事例として記述する。省察的分析の対象箇所については下線部を引き、番号を振り分ける。

■2015年1月下旬

上司Gより筆者へ光産創大派遣が打診される。

「“光産業創成大学→来期6月（出向予定）？、41期（1~2年）”」（本人メモ）①

■2015年2月

光産創大で行う事業実践について上司Gよりテーマを提示される。テーマは、「1分子の観察やタイムラプス計測時に有効な顕微鏡下のXYZ軸移動と観察を一体にしたユニットの構築」であった②。このテーマ選定理由は下記のとおりである。

- ・所属企業のパーツとして自動・手動ステージの技術、制御技術、オートフォーカスの技術等が活かせること。
- ・顕微鏡周辺機器製品の販売の中で得た、バイオ関連のお客様からの意見や経験を活かせること。

上記概要と背景を基に筆者が構想を加えて焼き直したものが「顕微鏡 3 次元トラッキングシステムのユニット化」である。上司 G と相談のうえ本学における事業実践についてはこの方針で進めていくこととなった (②)。

■2015 年 3 月

筆者、光産創大への出向が正式に決定する。

■2015 年 4 月

筆者、光産創大へ入学。事業実践活動を開始する。

■2015 年 5 月

所属企業よりカタログ製品用のサンプルソフトの改良依頼があった。1 カ月程度で作業完了予定していた (③)。

■2015 年 6 月

事業実践のテーマである「顕微鏡 3 次元トラッキングシステムのユニット化」開発について、そのイメージがまだ固まっていなかったため共同研究者 A、B と開発方針について検討を行った。

- ・ 高速カメラをと高速演算処理装置を使用した画像トラッキング技術では先行研究が十分なされており新規性がない。またその技術を用いた製品については既に市販されておりその性能も十分高いレベルにある。
- ・ 研究者 A から顕微鏡観察下の対象に照明光を照射し、その散乱光を「非点収差法」で検出・評価すれば 3 次元のトラッキングに応用できるのではとの提案がなされた。
- ・ 「非点収差法」に用いる検出用センサとして「4 分割フォトダイオード (以下 QPD)」を想定して、その調査と是非を検討することとなった (④)。

■2015 年 7 月

所属企業より依頼されていたサンプルソフトの改良仕様について変更依頼があった。工数増が見込まれるため、リリースは当初予定より延期することになった (⑤)。

■2015 年 8 月下旬 (a)

光産創大の研究者 M と N にヒアリングを実施した。研究者 M と N は生物学の専門家で



ある。所属企業にとって潜在的なユーザーになると考え、ヒアリングを実施した。開発目的の「顕微鏡3次元トラッキングシステム」の要素機能の一つである制御ソフトウェア（※1）について聞き取りを行い、主な市販ソフトウェア（5社）についてその使用状況を調査した。しかし筆者の準備不足から要点のずれた聞き取り調査となり、参考情報程度の結果となってしまった（⑥）。

<ヒアリングの結果>

- ・その結果、研究者Mから主要5社中2社については使用経験があるとの回答が得られた。そのソフトウェアを選定した理由について聞いたところ、新規導入したわけではなく既にその研究環境に導入済みものを継承して使用していきたくとのことであった。大学研究室のような環境下では、そこで使い慣らされたものや使用するまでの準備作業が容易なものが好まれるとの意見も得られた（⑥）。
- ・最後に主要5社以外のソフトで、「顕微鏡制御ソフトウェアI（※2）」についてヒアリングしようとしたが、研究者M、N両名とも知らなかったため、その紹介に留まった。

※1 市販顕微鏡をベースに照明光源、カメラ、ホイール、フィルター、シャッター、試料操作用ステージなどを統合して制御を行う。主に顕微鏡観察で要求されるイメージング機能などが充実している。その他機能が多くあるがその特性から導入コストは高くなりがちである。

※2 ※1と同等機能をもちながら、無償公開されている顕微鏡制御ソフトウェアである。制御可能な対象製品・メーカーが豊富であり、所属企業製品もその一つである。筆者は本ソフトウェアへの制御組み込みを担当していた。

#### ■2015年8月下旬（b）

学外へのヒアリングを実施した。既知であった研究者J（生物学）を訪問した。その場で筆者が光産創大へ出向し、「顕微鏡3次元トラッキングシステム」を開発することになったことを伝え、その技術またその動向について聞き取り調査を行った。研究者Jは取り組んでいる研究テーマの事情で、同システムを日常的に使うユーザーである。

- ・既にR社製顕微鏡トラッキングシステム（※3）を使用中であることが判明した。
- ・追尾観察だけでなく「オプトジェネティクス」と呼ばれる光制御遺伝子発現技術と組み合わせる動向があり、この光制御技術との連動はまだシステム化されていないとの情報が得られた（⑦）。

※3 高速カメラと高速演算処理機能を組み合わせたリアルタイム追尾が可能な装置で、低倍率と高倍率で広域と狭小域、および観察対象の全体と局所の追尾が可能である。

■2015年9月下旬

会社報告会で今年度の筆者開発予算について説明を受ける。上司 E より既に来年（2016年5月）までの枠は決定済みのため、この枠内で開発を進めるようにとの指示あった。開発初年度でまだ開発仕様の情報収集段階であったため、特に問題はないと判断し今年はその予算枠で可能な活動を行うこととなった（⑧）。

■2015年10月

所属企業カタログ製品サンプルソフトウェアの改良作業を完了し Web に公開した（⑨）。

■2015年10月～11月

初年度はカメラ画像によるトラッキングシステムを構築して成果を示すことにした。これは「カメラ画像方式の顕微鏡トラッキング」技術を所属企業ステージシステムと組み合わせた場合の検証・評価を目的としたものである。カメラとXYZステージは所属企業製のものを調達し、顕微鏡とその他周辺部品については実験に必要な部材の大半を上司 G の配慮により所属企業所有品を長期借用することが可能となった。

カメラ画像によるトラッキングを行うためには、画像処理プログラムの開発が必要であった。それには時間を要するため、無償の画像処理開発プログラムを用いて工数の短縮を図った。その取扱いは初めての経験であったが所属研究室にその取扱いに詳しい学生が在籍していたため、想定した時間以下でその試作を完了させることができた（⑩）。結果はカメラフレームレート性能に大きく依存するが、画像内の観察対象物を捕捉しそれを顕微鏡搭載のXYステージで追尾することができた。

■2016年2月上旬

無償顕微鏡ソフトウェア I について、所属企業製品の制御 DLL の改良プロジェクトが開始された。本プロジェクトには技術者数名が筆者含めて参加することになった（⑪）。

■2016年2月下旬

研究者 A より提案された非点収差法による顕微鏡トラッキングを具体的に進めるために、その検証実験を行うことになった。実験ではまず光学系を構築する必要があるため、それを光学シミュレーションで検証していく。光学シミュレーションソフトの環境は光産創大既存のライセンスを利用することができた。本ソフトは所属企業でも使用しているため、そのデータを光産創大と所属企業で相互に利用することが可能であった。また研究者 A の

協力により光学系部品の多くを借用して実験を進めることができた (12)。

#### ■2016年6月

非点収差法による観察対象物の散乱光検出実験を行った。非点収差の特徴である検出光による形状変化（観察対象の焦点位置を変えることで生じる）を顕微鏡カメラで撮影することに成功した。

光産創大の筆者所属研究室の研究者 B より H 社製「プロファイルセンサ」が使えるかもしれないとの提案を受けた。調査したところ、出力信号（検出光の投影プロファイル）から非点収差の形状判別が受光面全域で可能で、さらに高速カメラ相当の高フレームレートを持つことが分かった。これを開発ユニット（以下、高速位置検出ユニット）として試作することになった (13)。

#### ■2016年6月下旬

無償顕微鏡ソフトウェア I の所属企業製品の制御 DLL 改良・動作テストを完了し、Web に公開した (14)。

#### ■2016年7月

H 社製プロファイルセンサを開発する高速位置検出ユニットに組み込むため、H 社から見積りを取った。回答は想定していた額よりも安く、開発する高速位置検出ユニットの組み込み部品として最適であると考えた。しかし、実はこのプロファイルセンサは駆動回路をはじめとする別のハードウェア（以下、プロファイルセンサモジュール）を開発する必要があった。研究者 A との打ち合わせで、採用予定のプロファイルセンサ単品では使用できないことを説明した。高速位置検出ユニットに組み込むプロファイルセンサモジュールの開発には時間と予算が必要である (15)。

#### ■2016年7月下旬

既知である研究者 J らが主催する特定の生物試料にフォーカスした国際シンポジウムに調査を兼ねて参加した。シンポジウムに併設する展示会に R 社が顕微鏡トラッキングシステムの実演展示をしていたためその見学をした。展示案内員より丁寧な説明を受け、実際のデモンストレーションまで見ることができた。現時点では最も完成度の高い「顕微鏡トラッキングシステム」の一つであると考えられる。ただし価格帯は数百万オーダーで、かなり高額であった。

#### ■2016年8月

H 社製プロファイルセンサについて、研究者 A の人脈でテスト用デモ機の貸し出ししてもらえることになった。これで実際の検出感度や出力動作の挙動について開発段階で事前確

認することが可能となった。また同時期に研究者 A の紹介で Y 社を紹介してもらい、H 社製プロファイルセンサモジュールを共同開発（外注）することになった (16)。

#### ■2016 年 9 月

所属企業の報告会にて、開発する高速位置検出ユニット用に筆者がシミュレーションした光学設計と機構部品設計について所属部門の技術者に協力を得ることができるようになった。この時点まで筆者所属部門の協力体制は曖昧となっており中には消極的な反応を見せる者もいたが、上司 G の正式な了承が得られたことで部内技術者への依頼が容易になった (17)。

#### ■2016 年 10 月

Y 社への H 社製プロファイルセンサモジュールの開発依頼について、見積書の回答があった。回答見積額が想定を大幅に上回り、開発予算が不足することが分かった。上司 G に経緯を説明し、追加予算申請の可能性について相談したが却下となった。後日、開発機能の絞り込みなど Y 社との見積額の低減交渉を並行して進めることとなった。しかし、この見積交渉を経ても予算面での解決は図られず、開発が一時停止することになった (18)。

研究者 N の紹介で H 社研究部門の研究者 O より実験用の生物試料を提供された。研究者 O にその生物試料の特性や観察手法、また培養方法についての協力を得ることができた。以降、実験用生物試料として光産創大で培養を継続することとなった。培養については筆者単独で作業が行えるまで研究者 N に指導を受けることができた (19)。

#### ■2016 年 11 月

プロファイルセンサモジュール開発の予算不足を解決する手段の一つとして、発注する開発工程を分割することになった。第 1 段階（フェーズ 1）を回路と信号出力・コマンド制御機能の開発まで、第 2 段階（フェーズ 2）を FPGA（Field Programmable Gate Array）の組み込み開発までを行うことになった。当初の筆者開発予算枠で第 1 段階（フェーズ 1）の執行が可能となった (20)。

H 社研究者 O が光産創大へ来校。筆者開発中の顕微鏡トラッキングシステムについて意見交換を行う。微生物トラッキングの研究対象として有望なものについて情報を得ることができた。微生物の自動追跡によって何が解明され、あるいは要求されるのか顕微鏡トラッキングシステムの価値について情報を得ることができた (21)。

#### ■2016 年 12 月

高速位置検出ユニットの光学・機構設計と部材手配、Y 社への外注を完了した (22)。

#### ■2017 年 2 月

試作開発した高速位置検出ユニットの組立・調整を開始した。プロファイルセンサモジュールについても Y 社技術者のサポートで、開発中の制御ソフトウェアと共に組込みを完了した (23)。

■2017年4月

上司 G より筆者所属部門が今期 (5 月以内) までに解散となるとの通達があった (24)。

■2017年5月

開発した高速位置検出ユニットを用いて、サンプル目標の信号検出に成功した (25)。 所属企業に高速位置検出ユニットの試作完了を報告した。

■2017年6月

非点収差法とプロファイルセンサを用いた新しい顕微鏡3次元トラッキングシステムを提案し、学会にて発表を行った (26)。

■2017年7月

筆者の新しい X 社上司らに、光産創大での 2 年半の活動について報告を行った (27)。

■2017年8月

Y 社にプロファイルセンサモジュールのフェーズ 2 (FPGA 開発) を発注した。

■2017年9月

試作開発した高速位置検出ユニットで目標サンプル (微粒子) の動きを 3 次元トラッキングすることに成功した。この成果は、光学関係の学会で発表を行った (28)。

■2017年11月中旬

発注していたフェーズ 2 (FPGA 開発) の組込み評価試験を完了した。高速位置検出ユニットの主な試作開発はこれで終了した (29)。以降は、これをデバッグ機として各種改良に向けた試験評価を行うこととなった。

## 6-5. 分析と考察

本節では、6-2 節で設定した各々の仮説に対し、6-4 節の事例から見えてくる事象について、6-3 節で示した省察的实践、内発的動機づけ理論、対話理論、実践共同体の諸概念を分析概念として援用し、考察を行った。

### 6-5-1. リサーチ・クエスチョン1 に対する分析と考察

ここで改めて 6-2-1 節で設定した RQ1 を記述する。

#### RQ1: 「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」

RQ1 でいう動機づけとは、個人が担う役割に対するやりがい・充足感である。これは社会活動をする人間にとって軽視できない要素の一つである。6-4 節に示した事例を年次ごとに振り返り、この動機づけに関係する事象の省察を行った。

##### ■2015 年度の省察的分析

まず事例①は、当時のメモで上司 G との打ち合わせ中に筆者が走り書きした内容で、そこからは混乱している様子が読み取れる。まずその内容が不正確で、光産創大への前提情報・知識が不足していた。翌月の事例②の時点で、ようやく自身の状況について理解し始めており、準備時間の問題もあったが事業実践のテーマについてももう少し内容を精査して検討するべきであった。

2015 年度 8 月頃からは、具体的に事業実践活動を開始したタイミングである。このとき光産創大研究者らとの製品開発方針について打ち合わせ (③, ④)、また潜在的なユーザーを想定した内外へのヒアリング調査 (⑥, ⑦) と、その動きが活発化し始めた。事例⑩のように、所属企業や光産創大の協力を得ながら上手く進めることができたのは希少なケースであった。

##### ■2016 年度の省察的分析

2 年目になり製品開発が具体化し始めた (⑫)。ここで光産創大研究者らと製品開発についての打ち合わせで出たプロファイルセンサが研究者 B より初めて提案された (⑬)。ここに記述しているようにいくつかの優位性を基にこのプロファイルセンサを採用・試作することになるが、当初検討していた 1 年前の時期に既にプロファイルセンサの入手は可能であった。これは最初の開発方針で、安易に採用技術を絞り込まず調査の幅を広げるべきであったことを示している。開発当初に意識を固定しなければ、プロファイルセンサのような新しいデバイスを探すことができたかもしれない。また検討初期に、事例⑮の事態が生

じたとしても開発予算の準備と対策に時間的な余裕があるため、事例⑱、⑳のような複雑な調整を要する事態を回避できた可能性も十分期待できた。

事例⑱の時点で筆者はその対処・解決策に行き詰まり一時全ての活動が停止しかかっていたが、事例㉑に記すとおり年内目標で主な開発工程を完了することができた。これは当時筆者に知らされていなかったが、上司 G らが不足していた開発予算のために調整作業を惜しまなかった結果である。この調整がなければ開発は今回のように進捗していなかったであろう。これは当時の筆者が知ることでできなかった事実の一つである。

また事例⑲、㉑の場合は、上手く光産創大の協力と人脈を活用できた点で注目できる。この時期に H 社の研究者 O による建設的な意見・情報を傾聴できたことは大きな収穫であった。

### ■2017年度の省察的分析

3年目は事例㉒のように開発製品を試作でようやくかたちにすることができた。だが、それからまもなく事例㉓に記述してあるとおり筆者所属部門が解散となったことで状況が変わった。上司 G を含め関係者が光産創大活動から離れることになり、これが少なからず筆者の実践活動に影響したことは否めない。ただし事例㉔、㉕のように実践活動の領域が大きく広がっていたことで、悪い影響は上手く吸収することができた。実践活動も3年目後半となると、2016年度の予算問題の反省を生かしてプロファイルセンサモジュールの開発をフェーズ2として事例㉖のとおり無事完了させることができた。

#### <考察>

光産創大派遣の方針が上司 G から伝達されたとき、それら全てが Bakhtin のいう「権威的な言葉」によるものだったとはいえないかもしれない。ただし、会社組織の上長という立場にある者の言葉は、その本人の意図するところとは別に「無条件の承認」を求める姿に変わる。組織という単位を動かす以上は、そこに個人の「自由な適用」を認め、ましてや「自分自身の言葉との同化」できるまで時間をかけて待つわけにもいかない。しかし、その背景が分かった上でもなお、個人は組織側に「内的説得力のある言葉」を期待するだろう。そこで発せられる言葉にその片鱗が少しでもあれば、個人はそれを「半ば自己の、半ば他者の言葉」として解釈しようと努力し始めるからである。しかし当時の筆者には「自己を対話化する新しいコンテクスト」に置くだけの時間も余裕もなかったことは認めなければならない。それがいわゆる筆者の「動機づけ」の問題につながる。

事例で示したように、製品開発というプロジェクトを単独かつ外部で進めるという状況は筆者にとって初めての経験であった。この状況下で、まず意識し始めたことが自身の動機づけであった。自身が置かれた環境と自身の内心に溝があったためである。

2015年夏以降は上手く活動しているように見える。内外の調査活動などが一例である。ただしそれはあくまでも表層的な姿であり、自身の動機づけはまだ何も整理しきれていな

い状況であった。行動に移すことで何とか成果を得ようと焦っていたかもしれず、またこの行動で自身が内面に抱える動機づけの不安定さを解消しようとしたともいえる。結果として実際に得た成果とは逆に自身の動機づけの意識との差を広げることになり、いわゆる「不協和」(Deci 1975)とも呼べる状態を自身に強いることになっていた。

2016年度に至っても自身の「動機づけ」の不安定さを整理した様子は見られないが、より仕事に没入することで自身が置かれた状況を改善しようとしている様子が垣間見える。これは開発が製品試作・設計という具体的な工程に移行した影響が大きい。この工程に入ってから開発が単独で済むことは少なくなり、周囲との協働が必須となってきた。自身以外の他者にこの開発の意義を説明する必要性が生まれたことで、ここに初めて自身の内側から動機づけが生じた。ここで生じたものは「興味深いものであり、自分はそれに従事することを内発的に動機づけられているのだと、自分自身に思いこませる」(Deci 1975)という「不協和」(Deci 1975)の解消で、一種の自己暗示であったとも考えられるが、このときの筆者自身にはその意識はなかった。

2017年度に入ると、今度は筆者自身の所属部門が解散するという組織側の問題が生じた。この事態を受けて筆者自身の動機づけが瞬間揺らいだことは事実であった。通常、社会的な所属を失うことは悪い影響を及ぼす。外部で活動する筆者の場合は特にその影響は大きい。しかし筆者の場合、所属企業に固定されない環境が、その悪い影響を強く受けにくいことに役立った。

ここから見出されたことを整理してみる。自身の動機づけが、本当に自身の内側から出たものであると確信できるようになったのは実践活動が終盤に差し掛かった頃からである。さまざまな環境変化とそこで生じる問題があっても実践活動をやめずに継続してきたことで、そこに自発的な動機づけを生み出そうとする意識が芽生えてきた。つまり、これは当初の「不協和」状態から、「自分自身に思い込ませる」状態を経て、最終的に自身の内側から「有能で自己決定的であることを感知したい」状態への変容といえるであろう。ここに至った要因は、他者との共同開発の機会が時間を経るうちにより差し迫ったものとなったことである。そこでは自身が発する言葉に他者への説得力が合わせて求められる。その説得力を生み出す根源が自身の内側にある動機づけなのだ気付いたのは、その活動の最中である。明確な動機づけを有する者、つまり内発的に動機づけられた者には、他者への説得力にも確かさと力が伴うことが分かった。

#### 6-5-2. リサーチ・クエスチョン2に対する分析と考察

ここでも改めて6-2-2節で設定したRQ2を記述する。

**RQ2: 「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」**



### ■2015年度の省察的分析

光産創大派遣から2ヶ月ほどの2015年5月に、所属企業より事例③のような依頼を受けることになった。ここで述べたソフトウェアについては元々筆者が製作した経緯もあり、この依頼を受けることにした。当初の改良の依頼内容がごく軽微であったため、光産創大での活動と並行して行った。ところが同年7月に事例⑤のように改良仕様変更の依頼がきたため、当初目標より完成が延期となってしまった。この件は結局同年10月まで引き延ばすことになったが無事完了となった(⑨)。この事例は、所属企業への協力姿勢を示す良い機会となった。

また事例⑧のように筆者所属部門での活動報告は、筆者にとって貴重な場となっていたが、自身の開発プロジェクトを円滑に進めるためにも、より情報発信の度合いを強めるべきであった。

### ■2016年度の省察的分析

2月に所属企業より事例⑩のサポートを依頼された。このソフトウェアプロジェクトは、筆者が光産創大派遣前に主担当で行っていた経緯もあり依頼を受けることとなった。また、このソフトウェアプロジェクトは社内メンバーが主導していたため、当初筆者はメンバーの支援に徹する方針を取った。小規模とはいえソフトウェア開発を遠隔で支援していくことはさまざまな困難を伴ったが、プロジェクト自体は同年6月までに無事完了とすることができた。またこの件は、筆者が所属部門の技術者らに技術・知識を伝える教育の効果も見られた。

また事例⑦のように上司Gの承認により、筆者の製品開発・試作への支援を正式に所属部門の技術者らに依頼できるようになった。同年10月から12月にかけての開発試作のための詳細設計の段階で具体化した動きであるが、この支援枠組みの構築を筆者自身でもう少し早く展開できていれば、もっと多様な試作の検討ができた可能性もあった。

### ■2017年度の省察的分析

所属部門の解散という困難もあったが、このとき筆者は光産創大の外側で活動する機会が多く控えていたことで、その衝撃をうまく吸収することができていた。また開発試作も年始早々にもかたちとなったこともあり、予定どおりその成果発表を完了させることができた。ただしY社技術者らとの開発協力体制を手本にして、所属企業技術者らとの体制・枠組みづくりについて改善に着手すべきであった。

### <考察>

筆者が担った製品開発には多くの支援があった。これはこの事例を通じて客観的に振り返った結果として見えてきたことであるが、当時活動中の筆者の心境は全く異なっていた

まず開発を進めるにあたり、筆者はその他の社内プロジェクトや業務支援にできるだけ関与した。支援を求める状況が自身に確実にくることを予期していたからである。その支援の一つがソフトウェアプロジェクトであったが、筆者はプロジェクトメンバーに対して単純な支援に留まらず関連技術や知識を習得してもらおうと教育に近いことまで行った。今後、このソフトウェアを活用する状況を見越して筆者が先回りして実施したのである。ここで、このソフトウェアプロジェクトとそれを担うメンバーを実践共同体としてみる。筆者が当初求められていた役割（プロジェクト支援；新参者ではないが、中核を担うわけではない）が、古参者としてのふるまいに変容していたことが見えてきた。個人の関与の度合いがその共同体内の構成を変えることを示す一例だと考えられる。

いっぽう筆者自身の製品開発への所属企業技術者らによる円滑な支援に至るまでにはいくつか壁があった。まず所属企業技術者らにその模様が視覚化されにくい状況にあった。これに対して、所属企業技術者らと情報交換を積極的に行ってきたが、それでも円滑な支援に結びつくことは困難であった。また筆者から見ると、所属企業技術者らの業務状況が見えず気軽に依頼ができないという事情もあった。

ここで筆者と所属企業技術者らの構成する枠組みを実践共同体としてみる。この場合、先述したソフトウェアプロジェクトの実践共同体とは異なり、筆者は其中で最初から中核に位置していることになる。ここで筆者に求められていたのは、自身の製品開発の状況説明である。しかし筆者の行った情報発信は、所属企業技術者らを直接動かす動機にならなかった。開発初期の段階で支援の必要性を言葉として情報発信できていれば、所属企業技術者らの円滑な参画を実現できていた可能性もあった。

また筆者と共同開発を行った Y 社と形成された枠組みも実践共同体と見なすことができる。この枠組みはプロファイルセンサモジュールの開発が主となる。ここでは、筆者と Y 社技術者らによる詳細な仕様決めから検証実験・バグ出し・製品試験などが実施され、結果的にこの共同開発は上手くいった。事例を見ると、Y 社技術者らとは打ち合わせに時間をかけていることが分かった。この場合、時間をかけて情報を摺合せ、お互いの役割分担を明確にしたことが一つの成功要因だと考えられる。

ここまで見出されたことを整理してみる。結果として上司 G らによる支援を得て製品製作は完了したが、そのためにかなりの時間を要してしまった。それに対して Y 社技術者らとの共同開発は極めて円滑であった。通常、自身の所属とは異なる共同体に入っていくことはさまざまな困難を伴う。また逆に参画を呼びかけることも同様に難しい。筆者の場合は参画を呼びかける側であったが、両方の共同体の中核が筆者であることを共通項とすると、構成メンバーに対する情報発信と話し合いの頻度に差が見られた。所属企業との場合はそれが不足し、Y 社との場合はそれが必要十分であったと見るべきであろう。このことから、事例では、筆者からの情報発信と相互の話し合いの頻度が他者を自身のプロジェクトに参画させるために必要な要因であると考えられる。

## 6-6. 結論

本章では事業実践活動を事例として記述した。そこから活動当時には気づいていなかった事実がいくつも表出してきた。個人で行わざるを得ないことが多かった筆者の実践活動にも、実は想定以上に多くの人々の支援があったことを示すことにもなった。プロジェクト遂行者はその視野が時に狭くなりがちだが、事例という事実データを時系列に記述することで、当時は見えていなかった事実を浮き彫りにする効果があった。

省察的分析とはここで反省して終わりという概念ではない。本章で論じた結末ですらまたそこに課題を探し、解決していく必要がある。この省察的分析を通じて分かった事実を基に、「内発的動機づけ理論」、「対話理論」、「実践共同体」などの概念を援用し、事前に設定した2つのリサーチ・クエスチョンの考察を行った。この考察で得られた知見からは、効率よく製品開発をマネジメントするための教訓を与えることができた。また、ここで得られた知見を将来的に個人・組織へ社会実装化するため、以下のとおり提言を行い、本章のまとめとする。

### ○派遣される個人への提言

- ・組織の外へ派遣される個人は、確固とした「内発的動機づけ」が必要である。それはそこで活動する個人の成果を左右することになる。
- ・組織の外へ派遣される個人は、他者の内側に届く「内的説得力のある言葉」を磨くべきである。それが必ず自身への助けとなって返ってくる。

### ○個人を派遣する組織への提言

- ・個人を外部へ派遣する組織は、まず「内的説得力のある言葉」でもって説明を行い、可能な限りその個人の動機づけを助けるようにすべきである。
- ・個人を外部へ派遣する組織は、必要なときに個人を助ける「実践共同体」を形成できる準備があることをその個人に機会があるたびに伝えるべきである。

【参考文献】

- ・ [1]加藤なつみ・増田靖 (2016) 「インターファシリテーションによる実践共同体の生成 — 研究者=実務者の視座から見た新製品開発事例—」『日本コミュニケーション研究』第44巻, 第2号, pp. 181-204
  
- ・ [2]森下桂嗣 (2017). 『新規事業開発実践のセルフエスノグラフィー - ナラティブ・アプローチによる市場調査と情報共有化および冷陰極電子源の開発 - 』博士論文、光産業創成大学院大学光産業創成研究科
  
- ・ [3]Schön, D. A. (1983). **The reflective practitioner : How professionals think in action.**, MA: Basic Books, Cambridge. (柳沢昌一・三輪健二 (訳) (2007) 『省察的实践とは何か〜プロフェッショナルの行為と思考〜』 鳳書房。)
  
- ・ [4]Deci, E. L. (1975). **Intrinsic motivation.** NY: Plenum Press, New York. (安藤延男・石田梅男 (訳) (1980) 『内発的動機づけ 実験社会心理学的アプローチ』 誠信書房。)
  
- ・ [5] Bakhtin, M. M. (1975). *Вопросы литературы и эстетики.* Москва, Художественная Литература. (伊藤一郎 (訳) (1996) 『小説の言葉』 平凡社。)
  
- ・ [6] Wenger, E. (1990). **Toward a Theory of Cultural Transparency: Elements of Social Discourse of the Visible and the Invisible,** Doctoral discussion, Information and Computer Science, University of California.
  
- ・ [7]伊藤崇・藤本愉・川俣智路・鹿島桃子・山口雄・保坂和貴・城間祥子・佐藤公治 (2004) 「状況論的学習観における「文化的透明性」概念について : Wenger の学位論文とそこから示唆されること」『北海道大学大学院教育学研究科紀要』第93号、pp.81-157
  
- ・ [8]Lave, J., & Wenger, E. (1991). **Situated Learning: Legitimate Peripheral Participation.** Cambridge University Press, Cambridge. (佐伯胖 (訳) (1993) 『状況に埋め込まれた学習 — 正統的周辺参加—』 産業図書。)
  
- ・ [9]White, W. F. (1943). **Street Corner Society, Fourth Edition.** The University of Chicago Press, Chicago. (奥田道大・有里典三 (訳) (1993) 『ストリート・コーナーソサエティ』 有斐閣。)
  
- ・ [10]佐藤郁哉 (1992)、『暴走族のエスノグラフィー モードの叛乱と文化の呪縛』、新曜社

- [11]Ellis, C. and Bochner A.P. (2000) Autoethnography, Personal Narrative, Reflexivity: Researcher as Subject, InDenzin, N. K. and Lincoln, Y. S., eds., **Handbook of Qualitative Research, Second Edition**, Sage Publications, pp. 740
- [12]佐藤智恵 (2011)「自己エスノグラフィーによる『保育性』の分析—『語られなかった』保育を枠組みとして」『保育学研究』第49巻, 第1号, pp. 40-50.
- [13]Hoeber, L. and Kerwin, S. (2013). Exploring the Experiences of Female Sport Fans: A Collaborative Self-Ethnography, **Sport Management Review**, Vol.16, No. 3, pp.326-336
- [14]川田千恵子 (2015). 『マシンビジョンベンチャー企業の長期存続と協業に関する研究 - 長期存続要件の定量分析と協業における起業家のアイデンティティの視座からの定性分析 - 』博士論文、光産業創成大学院大学光産業創成研究科

## 第7章 結論

筆者所属企業のバイオ関連システム製品は安定的な売上を誇っていたが、連動する生物顕微鏡市場の飽和、試料操作の自動化を望むユーザーへ製品が浸透、競合メーカーの市場進出、など多数の要因でその売上の伸び悩みが目立ち始めていた。さらに、顧客要望に対応しきれない技術開発要素がいくつか目立つようになっていたことも重なり、新製品の開発が必要とされていた。そこで、所属企業のバイオ関連システム製品の新機軸として、顕微鏡 3 次元トラッキングシステムを選定し、筆者は光産業創成大学院大学へ派遣されることとなった。本学ではその新製品開発を第1の目的として活動を開始した。

そこで所属企業のバイオ製品、光学顕微鏡市場、既存の顕微鏡トラッキング製品、トラッキング観察対象の各分析を行い、以下の基本方針を基に新製品開発コンセプトを策定した。すなわち、①顕微鏡は既存製品を使用、②自社駆動ユニット製品を積極的に採用、③開発はユニット化し、自社他製品との柔軟性を確保、④競争力のある価格帯で販売、である。また、顕微鏡 3 次元トラッキングシステムを制御系、駆動系、検出系の各ユニットに分け、通常のカメラと PC を利用した画像処理による低速だが安価な位置検出ユニットと非点収差法とプロファイルセンサによる高速位置検出ユニットの開発を行った。制御は検出と駆動を統合制御するソフトウェアとして開発を行った。

まず、低速位置検出ユニットは、カメラ画像と色情報を基に観察対象を自動認識する CamShift 法を用いた位置検出ソフトウェアを開発した。顕微鏡 XY ステージへのフィードバック制御も実装し、簡易的なトラッキングシステムを開発した。直径  $\phi 5\sim 10\mu\text{m}$  の酵母菌を観察対象とした検証実験を行った。酵母菌のように急速な運動を行わない観察対象の場合は、位置検出から駆動系へのフィードバック制御には高速応答性能は要求されないため、十分に対応できる。

次に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技術の開発を行った。開発した高速位置検出ユニットは、非点収差法による 3 次元位置検出を 3.2kHz の高速フレームレートを持つプロファイルセンサで広い検出領域で高速で検出することを可能とした。ここでは、プロファイルセンサチップの制御回路、PC 通信用ファームウェア、FPGA 演算回路のプログラムを設計し、それらをプロファイルセンサモジュールとして開発した。さらに光学設計と機構設計を行い、高速位置検出ユニットを試作した。評価実験では 10 倍対物レンズを用いた場合、 $-90\mu\text{m} < X < 90\mu\text{m}$ 、 $-90\mu\text{m} < Y < 90\mu\text{m}$ 、 $-9\mu\text{m} < Z < 9\mu\text{m}$  の範囲で観察対象（直径  $\phi 10\mu\text{m}$  ポリスチレンビーズ）の検出と 3 次元目標位置の推定が可能であることが分かった。

トラッキングシステムの制御ソフトウェアも開発し、顕微鏡に取り付けた高速位置検出ユニットと顕微鏡用 XY ステージ、対物レンズ用ピエゾ Z ステージを接続し、顕微鏡 3 次

元トラッキングシステムを完成させた。ここで、動きを制御した直径  $\phi 10\mu\text{m}$  のポリスチレンビーズで評価実験を行い、視野面内 (X) および焦点奥行方向 (Z) でトラッキングが可能であることを確認した。また、純水溶液中に浮遊する直径  $\phi 10\mu\text{m}$  のポリスチレンビーズに対して約 40 分間の 3 次元位置検出とトラッキング観察を行うことにも成功した。本研究で提案した方法は、微生物であればクラミドモナスのような単純な球形の観察対象に限定することで、その 3 次元位置検出および追尾動作を簡単かつ高速・広範囲に実現できる。また蛍光タンパク質とビーズ、および量子ドットも適用可能な観察対象である。蛍光マーカーを付着または埋め込むことにより、本システムは任意形状の観察対象に適用することができる。ただし本手法では検出領域内に 1 つの観察対象しか存在しないという別の制限がある。また蛍光標識については、その検出を容易に実現できると考えられる。

以上より、第 2 章で検討した製品コンセプトのとおり、幅広い観察対象に対してそれぞれ最適なトラッキング性能を有する試作製品を完成させることができた。

また第 2 の目的である「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こと」に対して、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。特に分析の中で「動機づけ」と「チーム作り」の 2 点に着目し、より効率的に製品開発マネジメントするためのリサーチ・クエスチョンをそれぞれ設定し、内発的動機づけ理論、対話理論、実践共同体の諸概念を援用して明らかにした。

#### ○リサーチ・クエスチョン 1

「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」

RQ1 の省察的分析では、自身が発する言葉には他者への説得力が合わせて求められることが示唆された。その説得力を生み出す根源が自身の内側にある動機づけなのだ気付いたのは、その活動の最中であった。明確な動機づけを有する者、つまり内発的に動機づけられた者には、他者への説得にも確かさと力が伴うことが分かった。

#### ○リサーチ・クエスチョン 2

「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」

RQ2 の省察的分析では、チーム作りにおいて情報発信の密度と他者を説得する力がその鍵となることが示された。すなわちより濃密なコミュニケーションがそれらを生み出す要因と考えられる。

さらに、ここで得られたより効率的な製品開発マネジメントに関する知見を組織レベル

に落とし込むため（社会実装化）、個人と組織への提言を以下に提示する。

○派遣される個人への提言

- ・組織の外へ派遣される個人は、確固とした「内発的動機づけ」が必要である。それはそこで活動する個人の成果を左右することになる。
- ・組織の外へ派遣される個人は、他者の内側に届く「内的説得力のある言葉」を磨くべきである。それが必ず自身への助けとなって返ってくる。

○個人を派遣する組織への提言

- ・個人を外部へ派遣する組織は、まず「内的説得力のある言葉」でもって説明を行い、可能な限りその個人の動機づけを助けるようにすべきである。
- ・個人を外部へ派遣する組織は、必要なときに個人を助ける「実践共同体」を形成できる準備があることをその個人に機会があるたびに伝えるべきである。

本研究は、筆者と所属企業および本学を含むいくつかの外部組織、また関係する個人の支援を受けるかたちで進められた。製品開発では、当初の開発基本方針と本学で精査した開発コンセプトの検討により、顕微鏡観察対象の新しい高速 3 次元位置検出技術とそのユニット試作、そしてその統合制御技術を得ることができた。今後は本研究で開発した試作ユニットの製品化と、その組み合わせによるシステム化を提案し、所属企業のバイオ関連システム製品を強化していくものとする。

また製品開発プロセスを省察的に分析したことで、実践活動において成果を上げるには、「内発的動機づけ」が重要であることが示された。今後の筆者の製品開発を含む実践活動においては、その内発的に動機づけられた状態を導く「内的説得力のある言葉」に留意していこう。これは、より効率的な製品開発マネジメントの実践であり、ひいては本学の目指す光産業創成への貢献につながる活動になると固く信じている。



## 謝辞

まず光産業創成大学院大学 石井勝弘先生に深甚なる敬意を表するとともに、心より感謝申し上げます。石井先生には、本学入学当初から3年間にわたって製品開発から実験研究、論文執筆に至るまであらゆるご指導・ご鞭撻を賜ることができました。本学で研究を開始するにあたり実験環境・機材の整備にも多大なるご支援をいただきました。また顕微鏡観察対象の新しい高速3次元位置検出技術を生み出すために多くのアイデアを与えていただき、「高速位置検出ユニット」を完成させることができました。また、この研究成果を学会で発表する機会を設けていただき、ドイツ・ミュンヘンと新潟佐渡の国際学会への参加はそれぞれ貴重な経験となりました。本論文を執筆するにあたり、休日・昼夜を問わず何度も添削と推敲を重ねていただき、熱心にご指導を賜りました。ここに本論文を無事まとめることができたこと、重ねて心より厚く御礼申し上げます。

光産業創成大学院大学 増田靖先生には社会科学を初歩から指導していただきました。全ての学問の根本には哲学があり、そこから自然・社会を問わずあらゆる学問が派生してきたことをその系譜と歴史を面白く、そして分かり易くご教授していただきました。中でも経営学という学問は筆者が従来抱いてきた印象とは違い、個と組織の相互作用とそのマネジメントを探究する重層的な学問であることを知り、目の覚める思いがしました。特に増田先生の「語り」から生み出される「動機づけ」に至るリアルな物語には、その精緻な言語化とともに筆者の問題意識に対する示唆が多く存在し、社会科学に強い興味を持つきっかけとなりました。増田先生には休日・昼夜問わず熱心に添削と推敲を重ねていただき、ここに本論文をまとめることができました。心より厚く御礼申し上げます。

論文審査委員の主査を務めていただきました瀧口義浩先生には、自然科学にとどまらない幅広く貴重で有益なご意見を多く賜りました。本論文執筆にあたり何度も添削と推敲を重ねていただき、本論文をまとめることができました。心より厚く御礼申し上げます。

副指導教員として横田浩章先生には本論文を詳細にご指摘いただき、博士論文としてあるべき形を教示していただきました。また同じく副指導教員である平野美奈子先生には、文献の取り寄せのご協力から、慣れない生物試料の培養方法の教授まで賜りました。両先生には心より厚く御礼申し上げます。

予備審査会および公聴会を通じて有益で示唆に富んだご意見をいただいた、加藤義章学長、江田英雄先生、宇佐美健一先生、沖原伸一郎先生、内藤康秀先生、花山良平先生に心より厚く御礼申し上げます。また花山良平先生には、筆者所属の光情報システム分野ゼミで日常お世話になり、文献の取り寄せから、時節その圧倒的な知識量から鋭いアドバイスをいただき、研究開発と本論文執筆の助けとなりました。ここに重ねて感謝申し上げます。

森芳孝先生はさまざまなイベントを企画され、学内全体を大いに盛り上げていただきました。筆者もこれらのイベントに積極参加することで、息詰まるような状況にも頭を整理

することができ、自然と他の学生・教員と濃密な交流ができました。坪井昭彦先生と藤田和久先生にも、日常や学内外のイベントにおいて積極的に声をかけていただき、とても気持ちよく時間を過ごさせていただきました。心より厚く御礼申し上げます。

楠本利行先生は、本学の教員でありながら奇しくも同年代ということで、何かと意気投合することが多くありました。本論文においても詳細な校正をしていただき、大きな助けとなりました。ここでは語り尽くせぬほどお世話になり、心より厚く御礼申し上げます。

光産業創成大学院大学事務局の皆様には、学生生活全般にわたってさまざまなご支援・ご協力をいただきました。この場を借りて心より厚く御礼申し上げます。

本論文中にある「プロファイルセンサモジュール」を開発するにあたり、Y社の内野修氏、袴田強氏、熊谷智弘氏、武田良平氏には多大なるご協力をいただきました。本研究を進めるにあたり、どれだけ心強い助けになったか分かりません。この場を借りて心より厚く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、光産業創成大学院大学で学ぶ機会を与えていただいた所属企業の森吟二会長と近藤洋介社長に感謝申し上げます。また、多幡能徳本部長、野見和範部長、小林友博部長、富田祐一部長、本多隆部長、井上裕一氏、紫藤昭博氏、増田友広氏、今野優作氏には筆者在学中はさまざまご配慮とご支援をいただきました。この場を借りて心より厚く御礼申し上げます。

筆者旧所属部署の元上司、元先輩、元同僚、元後輩にも、在学中さまざまな場面でご支援をいただきました。残念ながらそれぞれ進む道を違えることになりましたが、大宮弘道氏、石塚隆浩氏、森一路人氏、中嶋美緒氏、杉谷貴子氏には、在学中滅多に戻らない筆者にも変わらぬ友好と思いやりを持って接してくれたことは感謝の念に堪えません。途中筆者の心が折れそうになった時も皆様のおかげで乗り越えることができました。特に森一路人氏には公私ともに大変お世話になりました。この場を借りて深く感謝申し上げます。

最後に、光産業創成大学院大学で共に学んだ9期生の松井信二郎氏、松本直哉氏、10期生の近藤治靖氏、11期同期生の川村哲也氏、蒲原正広氏、酒井浩一氏、岡田晃氏、鈴木一広氏、松隈順也氏、12期生の鈴木那津輝氏、星川雅春氏、宮本淳子氏、安田忠史氏、13期生の石原健二氏、安田浩一朗氏、山内秀恭氏をはじめとする学生諸氏には、講義や各種ゼミ、学内外イベント、実験・研究、学会発表、論文執筆、日常生活に至るまで、さまざまな場で切磋琢磨し、友好を深めることができました。また本学卒業生である藤原弘康博士、加藤なつみ博士、森下桂嗣博士には貴重な経験と知識を多くいただきました。互いに異なる背景と願望を抱いた学生が本学に集ったことで、筆者の今に至る人生の中で最も刺激的な勉学が可能となり、そして一生の財産となりました。一技術者でしかなかった筆者の意識がこの3年間を通じて、大きく変容したのは皆様のおかげだと確信しています。ここに心からの深謝を表するとともに、謝辞の結びとさせていただきます。

2018年3月 木島宏樹

# 業績目録

## 1. 査読論文

① Hiroki Kibata and Katsuhiro Ishii, “Three-dimensional microscope tracking system using the astigmatic lens method and a profile sensor,” *Optical Review*, (accepted).

## 2. 国際会議発表

① Hiroki Kibata and Katsuhiro Ishii, “Development of three-dimensional tracking system using astigmatic lens method for microscopes,” European Conference of Biomedical Optics 2017 (ECBO2017), EW3A.1, 2017/6/28.

② Hiroki Kibata and Katsuhiro Ishii, “Three-dimensional position detection by astigmatic lens method and application to automatic tracking observation of microscope,” The Twelfth Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering (OIE17), 2017/9/13.