

平成 23 年度博士学位論文

マイクロ視野における  
画像計測およびその応用に関する研究

2012 年 3 月

宇都宮大学大学院工学研究科

システム創成工学専攻

大澤 茂治



# 目次

<b>第 1 章 序論</b> .....	1
1.1 本研究の背景 .....	1
1.2 本研究の目的 .....	4
1.3 本論文の構成 .....	5
<b>第 2 章 奥行き方向の距離推定方法の提案</b> .....	6
2.1 提案する奥行き方向の距離推定方法の方針.....	6
2.1.1 微細作業システムの現状.....	6
2.1.2 マイクロ視野における従来の奥行き方向の距離推定方法 .....	9
2.1.3 画像に生じるボケと距離の関係.....	13
2.1.4 本提案方法の方針 .....	14
2.2 奥行き方向距離とボケ幅の関係.....	15
2.3 ボケ幅の差を用いた奥行き方向の距離推定.....	17
2.3.1 前側焦点面の前方に存在する場合の距離推定 .....	17
2.3.2 前側焦点面の後方に存在する場合の距離推定 .....	18
2.3.3 推定式の導出.....	19
2.3.4 推定式の導出手順 .....	20
2.4 推定式の導出実験 .....	22
2.4.1 実験目的.....	22
2.4.2 実験装置.....	22
2.4.3 使用する微小物体 .....	24
2.4.4 画像処理による物体の検出.....	24
2.4.5 ボケ幅の抽出.....	26
2.4.6 実験条件.....	29
2.4.7 実験結果.....	30
2.4.8 考察.....	34
2.5 位置合わせ実験.....	35
2.5.1 実験目的.....	35
2.5.2 実験装置および微小物体.....	35
2.5.3 実験方法および条件.....	36

---

2.5.4	実験結果.....	38
2.5.5	考察.....	43
2.6	本章のまとめ.....	44
<b>第3章</b>	<b>微粒子の自動把持と解放.....</b>	<b>46</b>
3.1	把持と解放.....	46
3.1.1	対象とする微小物体と方針.....	46
3.1.2	従来の把持と解放に関する研究.....	47
3.1.3	従来法の本方針における考察.....	49
3.2	把持と解放の自動化.....	50
3.2.1	把持方法.....	50
3.2.2	把持における提案した奥行き方向の距離推定方法の適用.....	50
3.2.3	把持方法の流れ.....	51
3.2.4	解放方法.....	53
3.3	自動把持および解放実験.....	54
3.3.1	実験目的.....	54
3.3.2	実験装置.....	54
3.3.3	実験方法および条件.....	57
3.3.4	実験結果.....	58
3.3.5	考察.....	65
3.4	本章のまとめ.....	66
<b>第4章</b>	<b>マイクロマニピュレータを用いた微小砥粒の評価への応用.....</b>	<b>68</b>
4.1	マイクロマニピュレータを用いた微小砥粒評価方法.....	68
4.1.1	一般的な砥粒の評価.....	68
4.1.2	画像処理による砥粒の評価.....	69
4.1.3	マイクロマニピュレータを用いた微小砥粒の三次元評価.....	70
4.2	一台のマイクロマニピュレータによる自動把持.....	73
4.2.1	把持の概要.....	73
4.2.2	自動把持の流れ.....	74
4.2.3	接触評価.....	75
4.2.4	付着評価.....	76
4.3	自動把持実験.....	78
4.3.1	実験目的.....	78
4.3.2	実験装置及び対象物.....	78
4.3.3	実験方法と条件.....	79

---

4.3.4	実験結果.....	79
4.3.5	考察.....	85
4.4	本章のまとめ.....	86
<b>第5章</b>	<b>画像計測による微小傷の検出.....</b>	<b>87</b>
5.1	円筒形状製品における傷検査の要求仕様.....	87
5.1.1	検査対象物の具体例.....	88
5.1.2	要求仕様.....	89
5.2	画像処理による傷検査.....	90
5.2.1	画像処理による傷検査の利点.....	90
5.2.2	従来方法.....	91
5.2.3	利用する画像処理方法.....	95
5.3	画像間の差分を用いた傷検出方法.....	96
5.3.1	閾値の設定方法.....	98
5.3.2	傷検出処理.....	99
5.3.3	判定処理.....	102
5.4	検査装置.....	103
5.4.1	検査対象物.....	103
5.4.2	検査装置の概要.....	103
5.4.3	検査部.....	104
5.5	予備実験.....	105
5.5.1	実験目的.....	105
5.5.2	実験方法.....	105
5.5.3	実験結果.....	106
5.5.4	考察.....	108
5.6	検査実験.....	109
5.6.1	実験目的.....	109
5.6.2	実験方法.....	109
5.6.3	実験結果.....	111
5.6.4	考察.....	111
5.7	本章のまとめ.....	112
<b>第6章</b>	<b>結論.....</b>	<b>113</b>
6.1	本研究の結論.....	113
6.2	展望.....	116

参考文献.....	117
謝辞.....	123
付録 A 奥行き距離の推定式導出時における評価項目のための実験.....	124
A.1 輝度変化の影響調査実験.....	124
A.1.1 実験目的.....	124
A.1.2 実験方法および条件.....	124
A.1.3 実験結果と考察.....	125
A.1.4 考察.....	132
A.1.5 まとめ.....	132
A.2 各項の符号と距離との関係の調査実験.....	133
A.2.1 実験目的.....	133
A.2.2 実験方法および条件.....	133
A.2.3 実験結果.....	134
A.2.4 考察.....	139
A.2.5 まとめ.....	139
本研究に関する発表論文.....	140

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 本研究の背景

近年、マイクロ領域を観察できる高倍率のマクロレンズや光学顕微鏡、およびマイクロマニピュレータに代表されるマイクロサイズの物体を操作する機器の研究・開発[1]~[4]により、産業、医療、農畜など、様々な分野において作業の微小化が可能となってきた。作業の微小化により、例えば、産業分野においては、品質低下の原因になる微小異物の除去や微小傷の検査により、高品質の製品が生産できるようになった。医療分野においては、細胞の観察および切り取りによる病気の研究や人工授精などが行えるようになった。また、農畜分野では、家畜の細胞のクローニングによる品種改良や希少品種の確保、植物の花粉の観察による品種改良の解析が行えるようになった。このように、我々人間が得られる利益は、マクロの世界だけではなく、マイクロの世界からも得られるようになってきた。上記のように扱う対象物の大きさが 1mm から 1nm の範囲にある作業は、一般的にマイクロ・ナノマニピュレーションと呼ばれている[3]。本研究では、これを単純に、微細作業と呼ぶこととする。また、微細作業の対処となる物体を微小物体と呼ぶこととする。

現在、上述した微細作業は、主に光学顕微鏡、または高倍率なマクロレンズを用いて、人間が微小物体を観察し、マイクロマニピュレータを操作することにより行われている。微細作業の利益への期待から、微細作業の増加が予測されるが、人間の手作業により微細作業を行っているため、次の問題が存在する。

#### (1) 作業の正確性を持続させることが困難：

作業員の熟練度や作業時の体調などにより、すべての対象物に対して同じ評価基準で作業が行えない。例えば、製品の傷検査では、傷の判定精度が作業員の熟練度に依存してしまう。また、人工授精や家畜の胚操作は複雑困難な作業であり、熟練作業員でも操作ミスを行ってしまうため、成功率が低い。人工授精の成功率は 50~80%程度と報告されている[8]。さらに、花粉の観察は、対象物が膨大になるため、安定に正確な観察を行うことは非常に困難である。花粉を観察後、マイクロマニピュレータなどを用いて操作する必要がある場合、対応は現実的に不可能である。

### (2) 作業員への負担が大きい：

微細作業は、顕微鏡を覗き、または、ディスプレイに映された顕微鏡からの画像を観察しながら、非常に正確な作業を繰り返さなければならない。この作業は、長時間に渡り同じ姿勢で、目を酷使する作業である。このため、作業員は視力の低下と慢性的な肩こりや頭痛などを発症することが、容易に予測できる。

これらの問題のため、微細作業の自動化が切望されており、微小物体を操作する機器の研究・開発だけではなく、微細作業の自動化の研究も行われるようになってきた。微細作業の自動化には、マイクロマニピュレータのような装置を用いて行うものと、用いないものがある。

現在、マイクロマニピュレータのような微小物体を操作する装置を用いて行う自動化の研究は、対象作業が人工授精や家畜の卵細胞のクローニングであり、液体中で行われている[5]~[11]。今後、微細作業の増加とともに、空気中のような環境で存在する微小物体に対する作業に対しても自動化が要求されることが予測できる。ここで空気中とは、微小物体が空気中に浮いている状態ではなく、プレパラート上に置かれている状態を意味する。空気中において微小物体を操作する場合、主にマイクロマニピュレータにエンドエフェクタと呼ばれる器具を取り付けて行う。このとき、必ずエンドエフェクタを微小物体の位置に合わせ、作業を行う。自動化を考えたとき、まず、この位置合わせを行うための距離計測が必要となる。光軸に対して水平面での距離計測は、単純な画像計測で行うことができる。しかしながら、光軸方向である奥行き方向の距離計測は非常に難しい。さらに、空気中に存在する微小物体は、例えば花粉などであり、数が膨大になることが予測できる。操作対象物が膨大な数になる場合、操作の短時間化のため、一度のマイクロマニピュレータ移動で微小物体へ位置合わせが行えることが要求される。つまり、高い精度での奥行き方向の距離計測方法が必要である。

また、マイクロマニピュレータを用いた微細作業の基本的な動作の1つとして、微小物体を掴んで持ち上げることが挙げられる。本研究では、この動作を把持と呼ぶ。微小物体の把持に関連する研究は多く行われている[12]~[31]。安定な把持を行うためには、二本のエンドエフェクタによる把持が良いとされているが、操作目的により一本のエンドエフェクタで把持を行う場合もある。把持に関連する研究は多く報告されているが、自動で把持を実現した報告はない。強いて挙げるとすれば、液体中において、吸引装置を用いて細胞を吸引した報告があるのみである[8]。空気中においてマイクロマニピュレータを用い、自動把持を実現するためには、把持の方法だけではなく、高い精度の奥行き方向の距離推定が必要であると考えられる。

さらに、マイクロマニピュレータのような装置を使用しない自動化の研究として、製品の微小傷の検査が挙げられる。微小傷の検査は、導入コストや処理速度から画像計測を用いた研究が多く[32][33]、具体的な対象物を挙げ、検査の要求仕様を満たす傷検査方法を提案、開発を行っている。しかしながら、円筒形状製品に対しては、未だ傷検出



方法は提案されておらず、円筒形状製品に対する画像計測を用いた傷検出方法が必要である。

上記から、本研究は、マイクロマニピュレータを用いて微小物体を操作する作業の自動化のため、奥行き方向の距離推定方法を提案し、さらに提案方法の応用として微小物体の自動把持の実現を行う研究である。また、マイクロマニピュレータを使用しない微細作業の自動化として、円筒形状製品の微小傷検査を挙げ、検査の要求仕様を満たす傷検出方法の提案を行う研究である。

## 1.2 本研究の目的

第 1.1 節で述べた研究の背景から、マイクロ視野における微細作業の自動化の期待が高まっていることがわかる。そこで本研究は、微細作業の自動化のための画像計測による奥行き方向の距離推定に関する研究、および円筒形状製品の微小傷検出方法に関する研究を行う。

通常、微小物体の奥行き方向の位置へエンドエフェクタを合わせるためには、まず、レンズまたはステージを移動させ、対象物に焦点を合わせ、次にエンドエフェクタを焦点の合っている位置へ移動させることにより行う。しかし、このような方法では、膨大な数の対象物を操作するためには効率的であるとはいえない。そこで、一度の距離計測により一度のエンドエフェクタ移動で微小物体に位置合わせが行える方法が必要である。本研究は、「一度のエンドエフェクタ移動で位置合わせが行えること」を方針として、奥行き方向の距離推定方法を提案することを目的とする。さらに、提案方法を応用し、微小物体の自動把持を実現することを目的とする。対象物や操作目的に応じて、二台のマイクロマニピュレータを用いた自動把持と一台のマイクロマニピュレータを用いた自動把持を実現する。

また、微小傷検出については、円筒形状製品を対象物として検査の要求仕様を述べ、これを満たす微小傷の検出方法を提案する。そして、実際の運用環境における検査実験を行い、提案方法の有用性を示すことを目的とする。

本研究の目的を以下にまとめる。

1. 奥行き方向の距離推定方法の提案、および有用性を示すため、以下を目的とする。

- マイクロ視野における特徴から、奥行き方向の距離推定方法を提案する。
- 位置合わせ実験により、本提案方法の有用性を確認する。
- 提案方法の応用として、次の二通りの自動把持を実現する。
  - 二台のマイクロマニピュレータによる自動把持および解放
  - 一台のマイクロマニピュレータによる自動把持

2. 円筒形状製品の微小傷検出方法の提案、及び有用性を示すため、以下を目的とする。

- 検査の要求仕様を挙げ、これを満たす傷検査方法を提案する。
- 実際の運用環境において検査実験を行い、提案する傷検出方法の有用性を示す。

## 1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に述べる。

本章では，研究の背景および目的について述べた。

第2章では，奥行き方向の距離推定方法を提案する。まず，現在の微細作業とシステム，およびマイクロ視野における従来の奥行き方向の距離推定方法，マイクロ視野の特徴から，提案する奥行き方向の距離推定方法の方針を述べる。次に，示した方針から奥行き方向の距離推定方法を提案する。そして，推定式導出実験により，本奥行き方向の距離推定方法の精度を確認する。最後に，エンドエフェクタを微小物体へ位置合わせを行う実験により，本奥行き方向の距離推定方法の有用性を示す。

第3章では，提案した奥行き方向の距離推定方法の応用として，生体微粒子を対象とし，二台のマイクロマニピュレータを用いた自動把持と解放について述べる。そして，実験において，自動把持と解放が実現できることを示し，本奥行き方向の距離推定方法の有用性を示す。

第4章では，第3章と同様に，提案した奥行き方向の距離推定方法の応用について述べる。微小砥粒の評価にマイクロマニピュレータを用いることを提案し，この評価の自動化のため，一台のマイクロマニピュレータによる自動把持について述べる。そして，実験において，一台のマイクロマニピュレータで微小砥粒の自動把持を実現し，本奥行き方向の距離推定方法の有用性を示す。

第5章では，画像計測を用いた製品の微小傷の検出方法を提案する。まず，具体的な検査対象物を挙げ，要求仕様を明確にする。そして，その要求仕様に基づき，微小傷の検出方法を提案し，実際の運用環境において実験を行い，提案する傷検出方法の有用性を示す。

第6章では，本研究の結論について述べ，論文をまとめる。

## 第 2 章

# 奥行き方向の距離推定方法の提案

本章では、まず、現在の微細作業とシステム、およびマイクロ視野における従来の奥行き方向の距離推定方法から、提案する奥行き方向の距離推定方法の方針を述べる。次に、示した方針から奥行き方向の距離推定方法を提案し、推定式導出実験により、本奥行き方向の距離推定方法の精度を確認する。そして、微小作業の最も基本となる動作である位置合わせを行う実験により、本奥行き方向の距離推定方法の有用性を示す。

### 2.1 提案する奥行き方向の距離推定方法の方針

本節では、まず、微細作業とそのシステムの現状および微細作業の自動化に関する研究について述べ、本研究の対象及び環境を明確にする。次に、マイクロ視野における奥行き方向の距離計測および位置合わせに関する従来の研究について述べ、提案する奥行き方向の距離推定方法の方針を明確にする。

#### 2.1.1 微細作業システムの現状

##### 微細作業システム

本節では、顕微鏡とマイクロマニピュレータのような機器を使用した微細作業とそのシステムの現状、および自動化に関する研究について述べ、本研究の対象を明確にする。図 2.1 に微細作業の対象物の大きさ、操作環境と操作形態を簡単に表した図を示す[3]。

環境として、真空中、液体中、空気中が挙げられ、顕微鏡として、光学顕微鏡、電子顕微鏡、走査プローブ顕微鏡が存在する。微細作業は、空気中、真空中での操作が多いが、細胞や微生物などの生体を扱う分野においては、乾燥を避けるため液体中で行われる場合が多い。作業形態は大きく分けて、接触型と非接触型がある。接触型とは、エンドエフェクタ(ツール)と対象物との物理的な接触を伴う操作形態であり、非接触型は、物理的な接触を伴わない操作形態である。

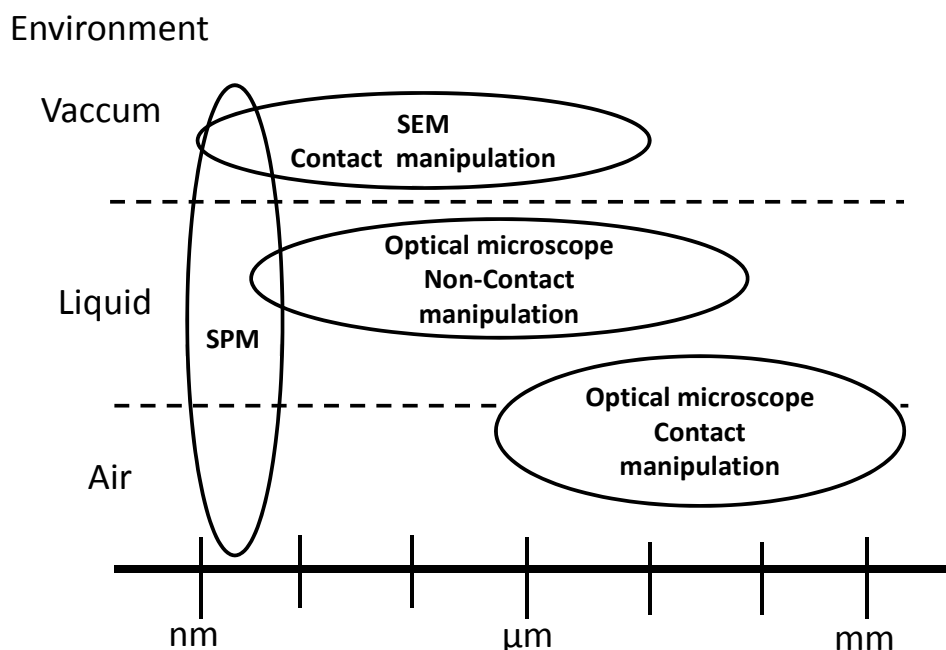


図 2.1 微細作業の操作環境と操作形態

接触型の作業システムは、エンドエフェクタとして先端が針状のものを使用することが多いが、微小物体を把持するため、空気吸引、静電気力[14]、液架橋力[15][16]などを発生させる装置とそれぞれ専用のエンドエフェクタを使用するシステムも存在する[17]。また、微小物体の加工や操作を行うため、エンドエフェクタが回転するシステム[18]~[21]や、二本指を有するマイクロハンドにより微小物体を、箸を扱うような動作で操作できるシステム[22]~[26]、対象物を VR 空間で表現し、操作性の向上を図るシステム[34]が存在する。また、非接触型の方法として、レーザー光を利用した方法[27]や超音波[28][29]を利用した方法、誘電泳動を用いた方法[30][31]などが知られているが、利用する環境は液体中のみである。バイオ分野で対象となる細胞、微生物などを扱う場合、乾燥を避けるため液体中で操作することが多く、対象物の大きさが  $100\mu\text{m}$  前後（卵細胞など）であれば液体の乾燥による影響が少ないため接触型のシステムを用いる。しかし、数  $\mu\text{m}$  程度（イースト菌など）の場合、液体の乾燥を避けるため対象物をカバーガラスで覆う。このため、非接触型のシステムを用いる。

### 本研究の対象と提案する奥行き方向の距離推定方法の方針

上記のように、微細作業およびそのシステムは、操作形態として接触型が多いことがわかる。また環境は、微小部品の加工や、製品の検査及び異物除去、花粉の観察などの作業から空気中が多く、光学顕微鏡を使用することが多い。また、対象物も上記のように数が膨大になるものが多い。今後さらにこのような作業の需要が増すことが予測できるため、空気中に存在する膨大な数の対象物を自動で操作するための研究が必要である。しかしながら、現在、微細作業の自動化の研究は、対象作業が人工授精[5]~[8]や家畜の卵細胞のクローニング[9]~[11]であり、液体中のみである。

そこで、本研究は、対象環境を「空気中」とし、光学顕微鏡と接触型であるマイクロマニピュレータを用いた微細作業を自動化の研究の対象とした。これは、図 2.1 における右下の領域であり、対象物の大きさは、 $\mu\text{m}$  スケールとなる。このような対象における微細作業の自動化のためには、まず、エンドエフェクタを物体へ位置合わせする必要がある、このための距離計測技術が不可欠となる。特に光学顕微鏡視野では、計測は画像に頼るほかはなく、光軸に対して水平面での計測は比較的単純な画像処理により行うことができるが、光軸方向、つまり、奥行き方向の距離計測は、非常に難しい。さらに、対象物が膨大な数になることから、一個当たりの作業は短時間で行えることが望ましい。したがって、計測及び位置合わせを短時間で行えるような方法が要求される。このため、提案する奥行き方向の距離推定方法の方針として「一度のエンドエフェクタ移動で位置合わせが行えること」を挙げる。

### 従来の微細作業の自動化の研究における奥行き方向の距離推定

現在、行われている微細作業の自動化における、奥行き方向の距離推定および位置合わせに関する研究は、ほとんど行われていない。卵細胞のクローニングの自動化[9]~[11]は、マイクロマニピュレータを使用せず、微小流路と呼ばれる器具を使用し、流路内を卵細胞が流れることによりクローニングに必要な作業を随時、行っていくものである。卵細胞は、直径約  $100\mu\text{m}$  であり、微小流路は断面形状が  $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$  程度であるため、卵細胞は奥行き方向にはほとんど移動しない。このため、奥行き方向の距離推定は必要としない。また、人工授精の自動化[5]~[8]は、卵子へ精子を注入するときにエンドエフェクタを卵子の位置へ合わせるため、奥行き方向の位置合わせが必要となる。しかしながら、人工授精は、対象が卵子と精子であるため、対象物の数が非常に少ない。このため、奥行き方向の位置合わせは完了している状態を想定している研究が多い。また、テンプレートマッチングにより焦点位置へ合わせる方法を用いている研究[6]もあるが、これは、エンドエフェクタを移動させ、画像を取得し、焦点が合っているときの画像と比較する方法であり、画像処理に時間がかかることから、エンドエフェクタはステップ

移動を行うか、ゆっくりした速度で移動しなければならない。このため、膨大な数の微小物体を対象とした場合、適切ではない。このように従来の微小物体の自動化の研究に使用されている奥行き方向の距離推定および位置合わせは、本研究が対象とするものには適さない。

そこで、次節において、上記以外のマイクロ視野における奥行き方向の距離推定および位置合わせに関する研究について、本研究の方針である「一度のエンドエフェクタ移動で位置合わせが行えること」の観点から検討する。

### 2.1.2 マイクロ視野における従来の奥行き方向の距離推定方法

光学顕微鏡を用いたマイクロ視野における奥行き方向の距離計測および位置合わせに関する研究について述べ、本研究の方針である「一度のエンドエフェクタ移動で位置合わせが行えること」の観点から検討する。

従来の研究として、両眼立体視法[35]~[38]やコントラストを用いた方法[39]、レンズの色収差を用いた方法[40][41]、物体に生じるボケ具合を用いた方法[42]~[45]が報告されている。以下にそれぞれについて述べる。

#### 両眼立体視法

両眼立体視法[35]~[38]は、双眼実体顕微鏡の接眼部の左右のカメラから取得する画像上の対象物の視差を利用し、奥行き方向の距離を求め、微小物体への位置合わせを行う方法である。ロボットビジョンで良く用いられる方法であり、ステレオ視の一種である[46]。奥行き方向の距離を算出するためには、焦点距離とカメラ間の距離が必要であるが、この方法では、視差と距離の関係を近似式で導出している。これより、距離を算出するとき、焦点距離とカメラ間の距離が不要であるという特徴がある。計測精度は、エンドエフェクタが微小物体から離れるほど悪く、このため、微小物体にエンドエフェクタを近づけるまでに何度も距離計測とエンドエフェクタの移動を繰り返さなければならない。また、双眼の顕微鏡のみ適用できないことも問題点として挙げられる。

#### コントラストを用いた方法

コントラストを用いた方法[39]は、焦点が合っている場合、対象物のコントラストが最大になることを利用した方法である。コントラストとして、画像間の輝度値の差を用いている。この方法は、距離計測ではなく、物体を移動させながら、焦点にあっているかを判定するものである。このため、物体に対してエンドエフェクタの位置合わせを行

うためには、まず、レンズを移動させ、物体に焦点を合わせ、次に、エンドエフェクタを移動させ、焦点に合わせるという流れになる。正確な位置合わせを行うためには、高性能な計算機、または、レンズやエンドエフェクタのステップ移動、または、低速度の移動が必要である。

### レンズの色収差を用いた方法

レンズの色収差を用いた方法[40][41]は、焦点の前側と後側で物体の周囲の色が変わることに着目した方法であり、R, G, B 値の R と B の比から位置合わせを行う。用途として、二本指を有するマニピュレータの指の位置合わせに使用されており、適用される距離は非常に小さいが、精度が非常に良いことが報告されている。しかし、本研究のように物体とエンドエフェクタとの位置合わせを行うことを考えた場合、ある程度の長い距離（最低でも物体のサイズ程度）を計測できなければならないが、結果から計測は困難であると考えられる。また、位置合わせを考えた場合、上記のコントラストを用いた方法と同じように、まず、レンズを移動させ、物体に焦点を合わせ、次に、エンドエフェクタを移動させ、焦点に合わせるという流れになる。さらに、正確な位置合わせを行うためには、高性能な計算機、または、レンズやエンドエフェクタのステップ移動、または、低速度の移動が必要である。

### ボケ具合を用いた方法

物体に生じるボケ具合を用いた方法[42]~[45]は、Depth from focus, Depth from defocus などと呼ばれている。モデル化したボケ具合から距離を求める方法であるが、mm スケールでの実験報告が多い。また、距離計測とともに、全焦点画像（物体全体に焦点が合っている画像、つまりボケている個所がない画像）作成に使用されている。距離算出やボケ具合のモデルに焦点距離などのレンズパラメータが必要であり、レンズパラメータの精度が計測精度に影響を与える。このため、レンズが複数組み合わせられている  $\mu\text{m}$  スケールを観察できる光学顕微鏡においては、複数のレンズパラメータの誤差が累積する。良好な計測精度を得るためには、非常に高い精度のレンズパラメータが要求される。また、距離を求めるためには、複数毎の画像が必要であり、複数回のレンズ移動が必要となる。



## 従来法における本方針に基づく考察

上記の方法は、全て、複数回のレンズ、または、ステージ移動およびマイクロマニピュレータの移動が必要であり、画像処理の回数も多くなる。このため、本研究の方針である「一度のエンドエフェクタ移動で位置合わせが行えること」を満たしておらず、本研究が対象としているような膨大な数の対象物への適用を考えた場合、効率的であるとは言えない。このため、新しい奥行き方向の距離推定方法が必要である。

人間は、光学顕微鏡視野における作業において、エンドエフェクタを微小物体の位置へ合わせる場合、ボケを利用していると考えられる。微小物体に焦点が合っている場合と、その位置からレンズを  $10\mu\text{m}$ ,  $20\mu\text{m}$ ,  $30\mu\text{m}$ ,  $40\mu\text{m}$ ,  $50\mu\text{m}$  移動させた画像をそれぞれ図 2.2 の(a), (b), (c), (d), (e), (f)に示す。なお、横方向の視野は  $260\mu\text{m}$  である。図 2.2 のように焦点位置から距離が離れるに従い、物体のぼけている部分が大きくなっているのがわかる。光学顕微鏡は、このように僅かに焦点面からずれただけでも大きくボケが生じることが特徴である。人間は、このようなボケを感覚的、かつ経験的に距離と関連させて、微細作業を行っていると考えられる。また、上記のボケ具体を用いた方法のようにボケと距離には関係があることがわかる。本研究では、これらのことから、物体に生じるボケに着目し、ボケと距離との関係を検討する。

本研究は、ボケと距離との関係をモデル化することになると考えられるが、焦点距離のようなレンズパラメータが必要となる可能性がある。レンズパラメータは、上記のボケ具合を用いた方法のように距離算出の精度に影響を与えられ、高い精度のものが必要となる。しかしながら、レンズパラメータが  $\mu\text{m}$  スケールの距離推定に十分な精度として仕様提示されているとは限らない。このため、コントラストを用いた方法や色収差を用いた方法のようにレンズパラメータを用いないことが望ましいと考える。レンズパラメータが必要である場合、双眼立体視法のように距離を算出するモデルを近似式で表すことにより、距離を算出するときレンズパラメータ等を用いないようにすることが可能である。したがって、「距離算出において、レンズパラメータを用いないこと」を提案方法の方針とする。

本節では、従来方法が本方針に沿わないことを述べ、新しい奥行き方向の距離推定方法が必要であることを明確にした。そして、ボケと距離との関係に着目し、従来方法から、「距離算出において、レンズパラメータを用いないこと」を方針とすることとした。次節は、ボケと距離との関係から、提案する奥行き方向の距離推定方法の方針について、さらに検討する。

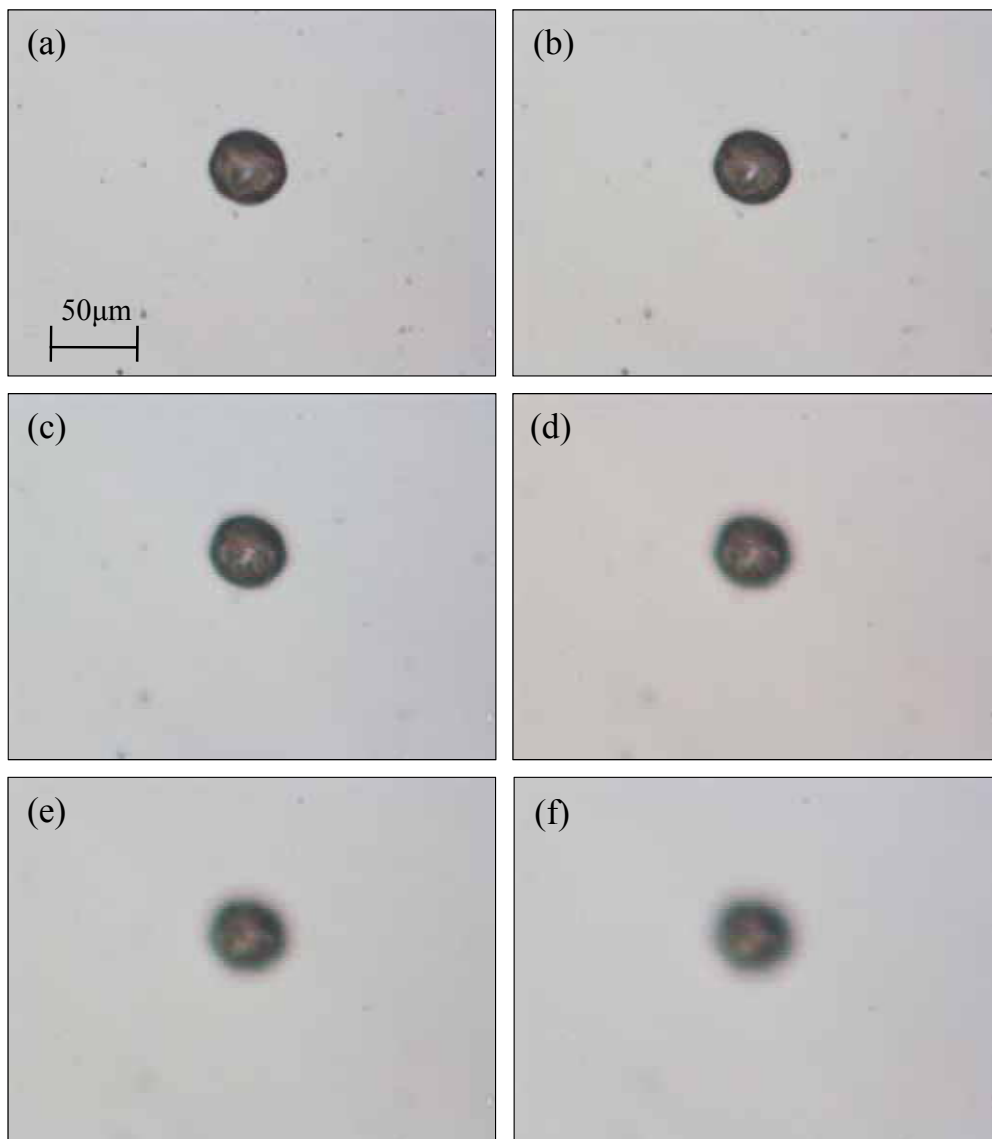


図 2.2 ボケの大きさと距離

### 2.1.3 画像に生じるボケと距離の関係

本節では、ボケと距離の関係から、提案する奥行き方向の距離推定方法の方針について検討する。一般的に画像計測を行う上で、ボケは問題である。しかし、人間は、光学顕微鏡視野における作業においてボケから距離を感覚的、かつ経験的にとらえ、位置合わせを行っている。ボケが生じる原因は、焦点が合っている領域から外れてしまうことであり、焦点が合っている領域を被写界深度という。図 2.3 に図 2.2(a)の画像のように焦点が微小物体に合っているイメージを示す。AB 間の距離が被写界深度であり、図 2.2(a)は微小物体がほぼ被写界深度内に入っているため、ボケがほとんどないが、図 2.2(f)は、微小物体が被写界深度内に入っていないため大きくぼけていた。

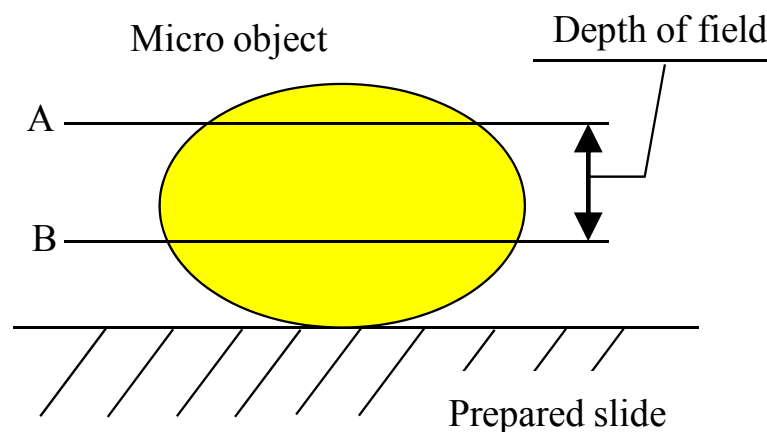


図 2.3 微小物体と被写界深度

被写界深度は、ボケが生じていないとされる領域であるが、実際には、人間が認識できないだけで僅かにボケは生じている。一般的に、このボケの大きさを許容錯乱円と呼ぶ。つまり、被写界深度である AB 間の距離において、許容錯乱円の大きさのボケが生じていると考えると、ボケと二点間の距離には関係があると考えられる。そこで、本研究は、提案する奥行き方向の距離推定方法の方針として「被写界深度に基づき、ボケから距離を求めること」とした。

### 2.1.4 本提案方法の方針

第 2.1.1 節, 第 2.1.2 節, 第 2.1.3 節から得た提案する奥行き方向の距離推定方法の方針を以下にまとめる.

- 一度のエンドエフェクタ移動で位置合わせが行えること  
現在の微細作業およびそのシステムは, 空気中における自動化の研究が行われていない. 空気中の対象物は, 膨大な数になるため, 一つ一つの作業の短時間化を考慮し, 一度のエンドエフェクタ移動で位置合わせが行えることが望ましい. これを達成するためには, 高い計測精度を有することが必要である.
- 距離算出において, レンズパラメータを用いないこと  
光学顕微鏡は複数のレンズを組み合わせてあり, それぞれのレンズパラメータにおける誤差が累積し, 計測精度に影響を与えると考えた. このため, 距離算出時にはレンズパラメータを用いないこととした.
- 被写界深度に基づき, ボケから距離を求めること  
被写界深度は二点間の距離であり, その二点間において許容錯乱円径のボケが生じることから, ボケと距離には関係があると考えた. そこで, 被写界深度に基づき, ボケから距離を求めることとした.

## 2.2 奥行き方向距離とボケ幅の関係

第 2.1.4 節で述べた方針「被写界深度に基づき、ボケから距離を求めること」から、奥行き方向の距離とボケの関係を被写界深度に基づき述べる。被写界深度は、物体がボケていない（ボケが許容錯乱円より小さい）とみなせる物体面側の範囲であり、被写界深度と関連するレンズパラメータを図示すると、図 2.4 のようになる。

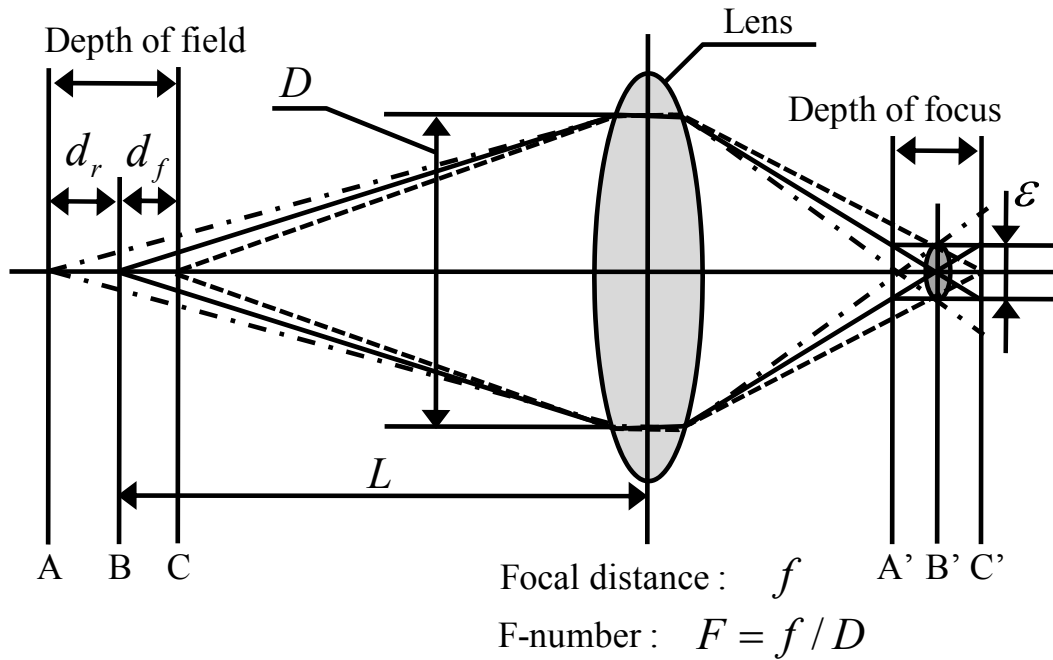


図 2.4 被写界深度

被写界深度は、前側被写界深度  $d_f$  及び後側被写界深度  $d_r$  を足したものであり、それぞれを式 (2.1), (2.2) に示す[49]. 図 2.4 において、 $L$  はレンズから被写体までの距離、 $f$  は焦点距離、 $F$  は  $F$  値 ( $F = f/D$ ,  $D$  は有効レンズ径),  $\varepsilon$  は許容錯乱円径である。なお、本稿では、物体側の完全に焦点が一致する面である  $B$  点を前側焦点面と呼ぶこととする。

$$d_f = \frac{L(L-f)\varepsilon F}{f^2 + (L-f)\varepsilon F} \quad (2.1)$$

$$d_r = \frac{L(L-f)\varepsilon F}{f^2 - (L-f)\varepsilon F} \quad (2.2)$$

図 2.4 から被写界深度は、前側焦点面の位置からボケ幅が許容錯乱円の 1/2 のときの位置（図 2.4 の A 点，または C 点）までの距離であることがわかる．したがって，式 (2.1)，(2.2) を微小物体のボケ幅と微小物体と前側焦点面との距離の関係式に置き換えることが可能である．ボケ幅を錯乱円径の 1/2 と仮定し，微小物体のボケ幅を  $b$ ，微小物体と前側焦点面との距離を  $z_f(b)$ ，および  $z_r(b)$  とすると，式 (2.1)，(2.2) は式 (2.3)，(2.4) となる．これより，微小物体と前側焦点面の距離が微小物体のボケ幅から算出できることがわかる．ただし，微小物体の位置が前側焦点面よりもレンズ側に存在する場合は (2.3) 式を用い，反対側に存在する場合は (2.4) 式を用いなければならない．なお， $F$  は  $f/D$  であるため，変換を行っている．

$$z_f(b) = \frac{2L(L-f)b}{Df + 2(L-f)b} \quad (2.3)$$

$$z_r(b) = \frac{2L(L-f)b}{Df - 2(L-f)b} \quad (2.4)$$

## 2.3 ボケ幅の差を用いた奥行き方向の距離推定

### 2.3.1 前側焦点面の前方に存在する場合の距離推定

式 (2.3), (2.4) により, 前側焦点面から微小物体までの距離をボケ幅から算出することができるが, 本研究の目的は, 微小物体とエンドエフェクタの距離を求めることである. そこで, ひとまず, 図 2.5 のような微小物体とエンドエフェクタが前側焦点面の前方 (レンズ側) に存在する場合において, 式 (2.3) から距離を求める式を導出することとする. 図 2.5 は, 図 2.4 において, 説明に不要な値を削除し, 新たに, 微小物体の位置を  $O$  とし, レンズから微小物体までの距離を  $L_o$ , 結像点  $B'$  にできるボケ幅を  $b_o$ , エンドエフェクタの位置を  $E$  とし, レンズからエンドエフェクタまでの距離を  $L_e$ , 結像点  $B'$  にできるボケ幅を  $b_e$  とし, 微小物体とエンドエフェクタの距離を  $\Delta z$  とし, 追加した図である. なお, 図 2.5 での  $L$  は, レンズから前側焦点面 (図 2.5 の  $B$ ) までの距離である.

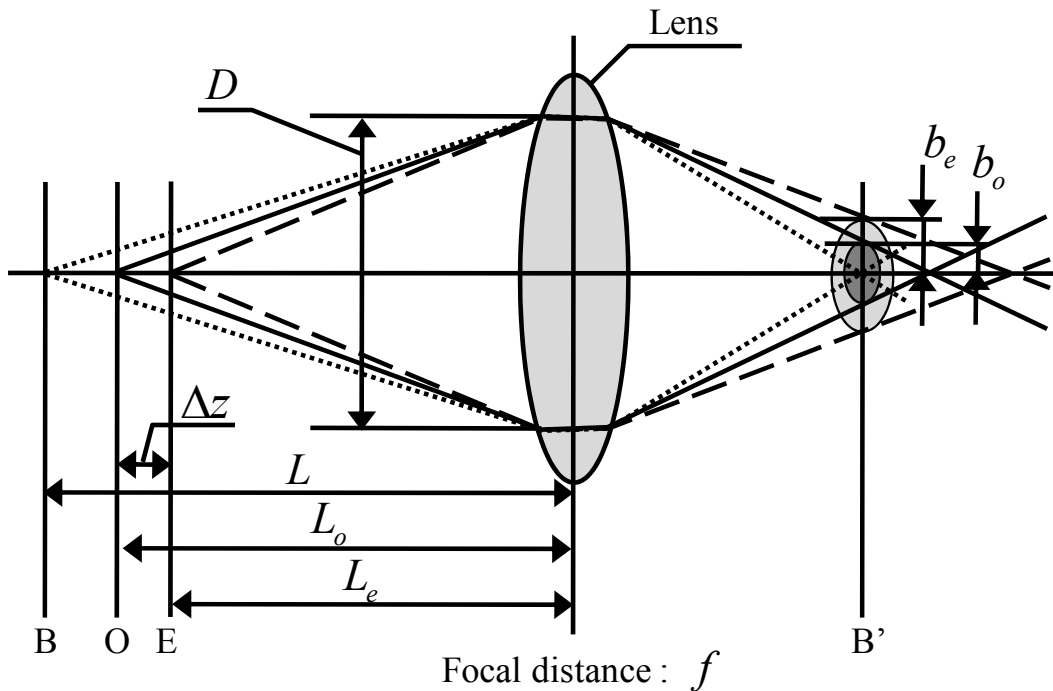


図 2.5 エンドエフェクタと微小物体の距離

式 (2.3) のボケ幅  $b$  は、図 2.4 の A 点、または C 点からの光により、結像点 (図 2.4 の B') に生じたボケの幅であるが、B 点からの光による結像点でのボケ幅と、A 点または C 点からの光によるボケの幅の差ともとれる。この考えに基づくと、被写界深度の式を基にした奥行き方向の距離は、ボケ幅の差から算出できることとなる。そこで、図 2.5 において、エンドエフェクタのボケ幅  $b_e$  と微小物体のボケ幅  $b_o$  からボケ幅の差を式 (2.5) のように表すこととする。

$$\Delta b = b_e - b_o \quad (2.5)$$

そして、図 2.5 の位置関係での奥行き方向の距離を  $\Delta z(\Delta b)$  とおくと、 $\Delta z(\Delta b)$  は、式 (2.3) において  $L = L_o$ 、 $b = \Delta b$  とすることにより、式 (2.6) のように表すことができる。

$$\Delta z(\Delta b) = \frac{2L_o(L_o - f)\Delta b}{Df + 2(L_o - f)\Delta b} \quad (2.6)$$

エンドエフェクタと微小物体との位置が反対になった場合、式 (2.4) を基に距離を求める式を、式 (2.6) と同様に導出しなければならない。しかし、この場合  $\Delta b$  が負になるため、式 (2.4) から導出した式に負の符号をつけたものと同じになる。したがって、エンドエフェクタと微小物体の位置が図 2.5 と反対になった場合でも、式 (2.6) で対応可能である。

### 2.3.2 前側焦点面の後方に存在する場合の距離推定

上記は、エンドエフェクタと微小物体が前側焦点面よりもレンズ側にあった場合である。反対側にエンドエフェクタと微小物体がある場合についても検討しなければならないが、この場合、 $\Delta b$  を式 (2.7) のようにすれば、式 (2.6) で対応可能である。

$$\Delta b = b_o - b_e \quad (2.7)$$

2.3.1 節で述べたようにエンドエフェクタが微小物体よりもレンズ側にある場合、位置関係から、式 (2.3) を基に導出した式 (2.6) で距離を算出することになるが、ボケ幅が負になるため、適切な距離を求めることができない。そこで、式 (2.7) のようにボケ幅を定義すると、ボケ幅は正になるため、式 (2.6) で距離を求めることができる。また、エンドエフェクタと微小物体の位置が反対になった場合、位置関係から式 (2.4) を基に距離式を導出しなければならないが、ボケ幅が負になるため、式 (2.4) を用いて導出した式に負の符号をつけたものと同じとなる。したがって、この場合でも式 (2.6) と式 (2.7) により正しく距離を求めることが可能である。



### 2.3.3 推定式の導出

式 (2.5), (2.6), および式 (2.6), (2.7) を用いることによりエンドエフェクタと微小物体の距離を求めることが可能であるが, 式 (2.6) のレンズから微小物体までの距離  $L_o$  が未知であり, 距離算出において, これが問題である. また, 第 2 章で示した本方針「距離算出において, レンズパラメータを用いないこと」から, 焦点距離  $f$  と有効レンズ径  $D$  を用いないようにしなければならない. そこで, 式 (2.6) が  $\Delta b$  を変数とする曲線の方程式であることを利用し, 近似式を用いて表すこととする. これにより, 上記のレンズから微小物体までの距離  $L_o$  が未知である問題の解決, およびレンズパラメータを使用せず, 奥行き方向の距離を算出することができる.

まず, 式 (2.6) をマクローリン展開により多項式化を行い, 最小二乗法で定数を求め, 近似式を導出する. しかし, 式 (2.6) をそのままマクローリン展開すると, 変数  $\Delta b$  が大きい値をとることもあるため, 誤差が大きくなる可能性がある. そこで, 変数になるべく小さくなるように,  $\Delta b$  を計測したボケ幅の最大値  $b_{max}$  で割った値  $r$  を変数として用いることとした (式 (2.8)). これにより,  $r$  は 1 未満の値であるため, マクローリン展開での誤差を限りなく小さくできる. そして,  $r$  を用いるため, 式 (2.6) は式 (2.9) となる.

$$r = \frac{\Delta b}{b_{max}} \quad (2.8)$$

$$\Delta z(r) = \frac{2L_o(L_o - f)r}{\frac{Df}{b_{max}} + 2(L_o - f)r} \quad (2.9)$$

式 (2.9) をマクローリン展開し, レンズから微小物体までの距離  $L_o$ , 焦点距離  $f$ , 有効レンズ径  $D$  を  $c_1, c_2, c_3 \dots$  とまとめると, 式 (2.10) となり, 最小二乗法により,  $c_1, c_2, c_3 \dots$  を求めることにより, エンドエフェクタと微小物体の距離の近似式が導出できる. ただし, 定数  $c_n$  は,  $n$  が奇数のとき正の値であり,  $n$  が偶数のとき負の値である. 本研究では, この近似式の各項の定数を算出した式を「奥行き方向の距離推定式」, または単に「推定式」と呼ぶこととする.

$$\Delta z(r) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n r^n \quad (2.10)$$

### 2.3.4 推定式の導出手順

推定式を導出するために、複数のボケ幅と距離のデータが必要である。図 2.6 に推定式を導出する手順を示す。最初に対象微小物体を決める。次にエンドエフェクタを移動させ、エンドエフェクタと微小物体のボケ幅を抽出する。そして、移動距離とそれらのボケ幅を記録する。この処理をそれらのボケ幅が等しくなるまで繰り返す。それらのボケ幅が等しくなった後、最小二乗法を用いて、推定式の定数  $c_n$  を算出する。

このとき導出された推定式は、まず、定数  $c_n$  の符号により評価を行う。推定式の元となった式 (2.9) は曲線であるため、エンドエフェクタと微小物体との距離が小さい場合、適切な符号が得られない可能性がある。このため、定数  $c_n$  において、 $n$  が奇数のとき正の値、 $n$  が偶数のとき負の値であるという条件に満たない場合、再度、データを算出する。データを算出する前に、エンドエフェクタは、初期位置から定距離  $d$  だけ微小物体から遠ざけた位置へ移動させる。これにより、エンドエフェクタと微小物体との距離が初期状態において小さくても、徐々に距離が大きくなるため、最終的に正しい符号を得ることができる。

$c_n$  の符号が正しく算出された場合、次に、実測値と推定式による値との差の平均により評価を行う。以降、実測値と推定式による値との差を単に「誤差」と呼ぶこととする。光学顕微鏡の照明の輝度は瞬間的に変化する。この変化が微小である光学顕微鏡では、誤差の評価は不要であるが、輝度変化が大きい光学顕微鏡では輝度変化の影響を受け、大きい誤差が生じる可能性もある。そこで、誤差の平均が閾値  $Ta$  以上の場合、照明の輝度変化の影響を大きく受けているとみなし、再度、初期位置へエンドエフェクタを移動させ、上記手順を繰り返し、推定式を導出し直すこととする。そして、実測値と推定式による値との差が  $Ta$  よりも小さい値となった場合、推定式の導出は完了となる。

本提案方法は、推定式導出時には、上記のように複数回のエンドエフェクタの移動が必要となるが、微小物体への位置合わせを行う場合、導出した推定式を用いて距離を算出するため、レンズやステージの移動は必要なく、一度のエンドエフェクタ移動で位置合わせが行えることとなる。

なお、推定式導出時の評価である「誤差」と「各項の符号」についてそれぞれ調査実験を行い、上記の評価観点が適切であることを確認している。「誤差」に対しては、「付録 A.1 輝度変化の影響調査実験」、 「各項の符号」に対しては、「付録 A.2 各項の符号と距離との関係の調査実験」に詳細に示している。

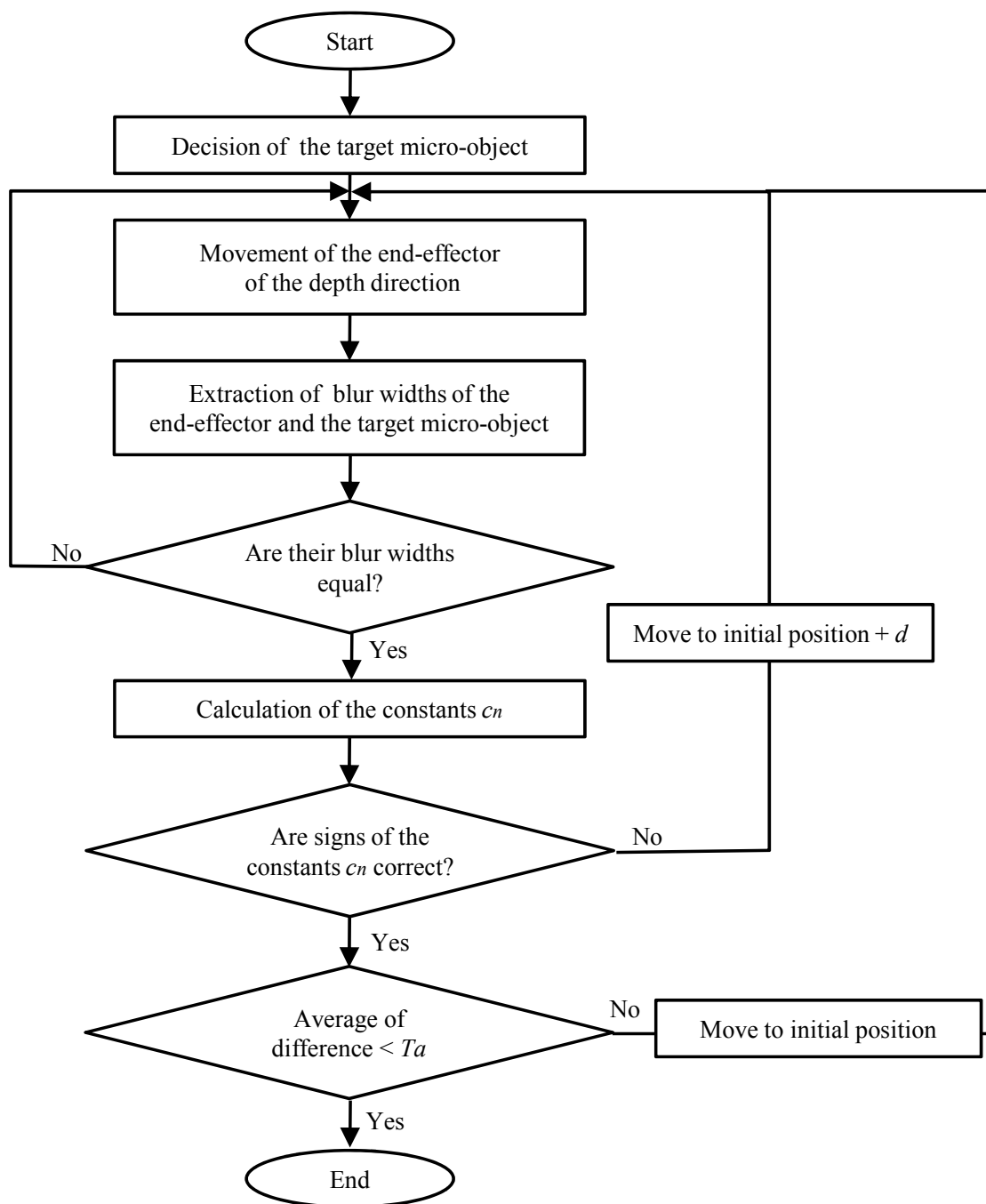


図 2.6 推定式導出の流れ

## 2.4 推定式の導出実験

### 2.4.1 実験目的

本実験は、提案した奥行き方向の距離推定方法において導出した推定式の精度を確認することを目的とする。

### 2.4.2 実験装置

使用した実験装置の構成を図 2.7 に、PC、対物レンズ、画像、エンドエフェクタ、マイクロマンピュレータおよびステージの仕様を表 2.1 に示す。本稿での X, Y, Z 軸は、図 2.7 の右下のように定義する。奥行き方向は、Z 軸方向のことである。

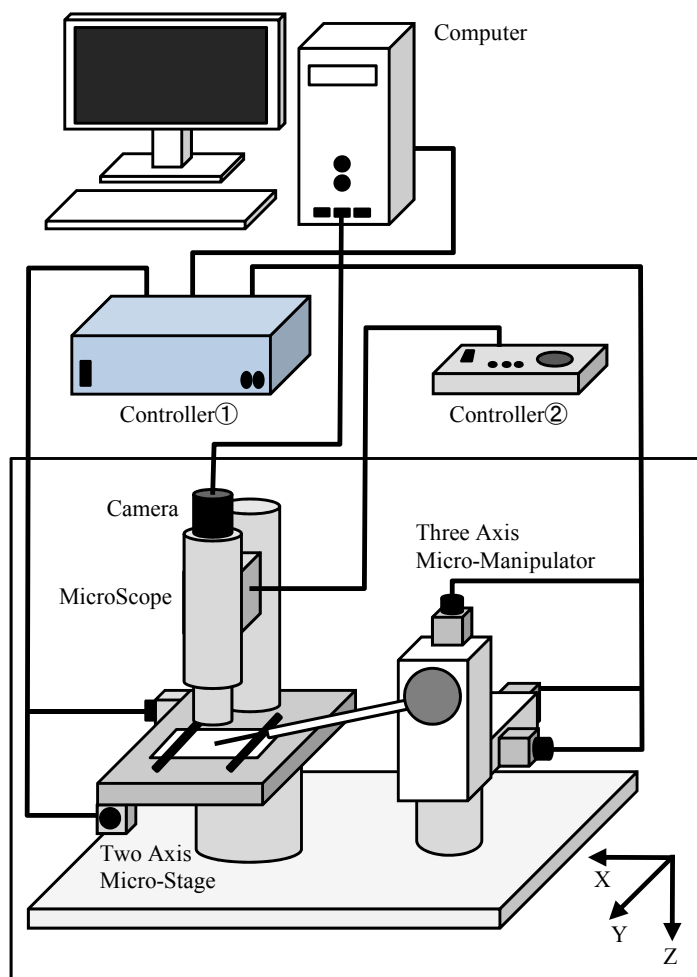


図 2.7 実験装置の構成

表 2.1 システムの仕様

Computer	
CPU	Core2 T9600 2.8 GHz
Memory Size	4.0 GByte
OS	Windows Vista sp1
Microscope	
Magnification ratio	1400
Field of view	260 $\mu\text{m}$
Depth of field	12 $\mu\text{m}$
Input Image	
Size	800 $\times$ 600 pixel
Pixel size	0.325 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
EndEffector	
Diameter of point	5 $\mu\text{m}$
Micro-Manipulator and Stage	
Resolution	1 $\mu\text{m}$
Movement speed	100 $\mu\text{m}/\text{s}$

本装置は、顕微鏡として、ハイロックス社製 CX-10C に対物レンズ OL-140 を装着し、画像取得のため PointGrey 社製 Flea2 デジタルカメラを使用した。二軸ステージと三軸マニピュレータの制御は、PC からの制御命令を駿河精機社製のコントローラ D220 (図 2.7, Controller①) に送り、同じく駿河精機社製の二軸ステージおよび三軸マイクロマニピュレータを動作させることにより行う。マイクロマニピュレータの先端には、針形状のエンドエフェクタを装着している。なお、マイクロスコープ (対物レンズ) の Z 軸移動は、PC での制御ではなく、ハイロックス社製のコントローラ CT-7 (図 2.7, Controller②) を用いて行っている。

### 2.4.3 使用する微小物体

本実験に用いる微小物体として，胡桃の花粉を用いた（図 2.8）．花粉は，空気中に存在し，膨大な数であることから，本研究に対象として適切である．大きさは，おおよそ  $25\sim 45[\mu\text{m}]$  である．

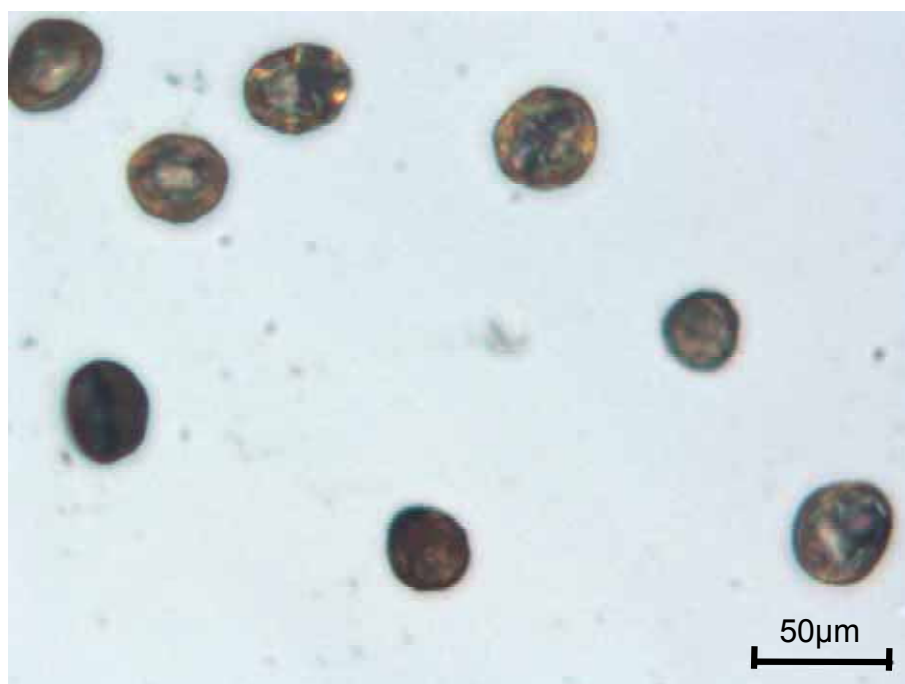


図 2.8 花粉の概要

### 2.4.4 画像処理による物体の検出

花粉とエンドエフェクタの画像処理による検出方法を述べる．図 2.9 に概要を示す．まず，取得した画像をグレースケールに変換後，閾値により二値化を行い，ラベリング，ノイズ除去，花粉などのような物体の模様を埋める処理を行う．そして，面積，縦横比，画像端に接しているか，で花粉，エンドエフェクタを検出する（図 2.9 (b)）．図 2.9 (b) で緑の四角で囲まれている物体がエンドエフェクタ，黄色の四角で囲まれている物体が花粉として検出した結果である．花粉が複数存在する場合，エンドエフェクタ先端に最も近い花粉を処理対象として選択する．

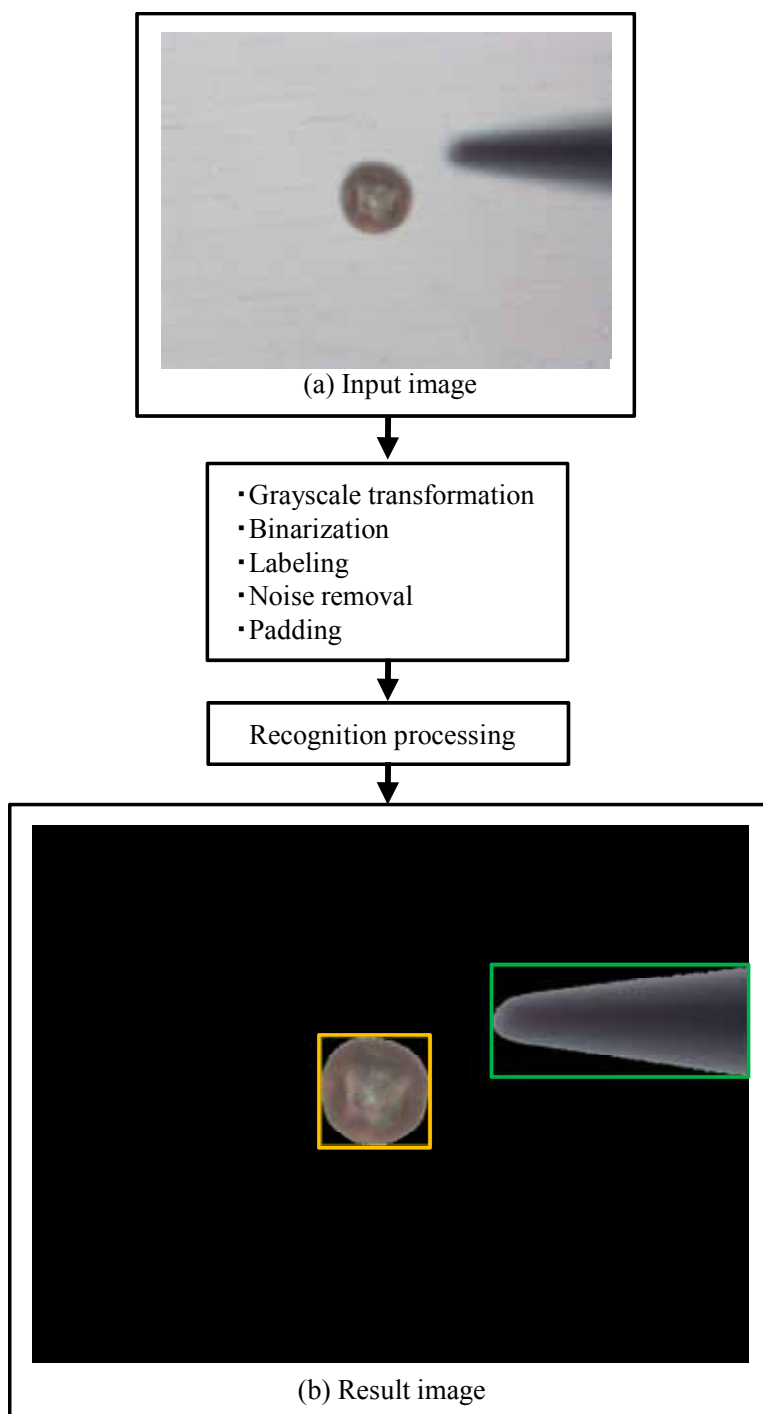


図 2.9 物体の検出

## 2.4.5 ボケ幅の抽出

## ボケ幅の抽出処理の流れ

本実験で用いたボケ幅の抽出方法の概要を図 2.10 に示す。

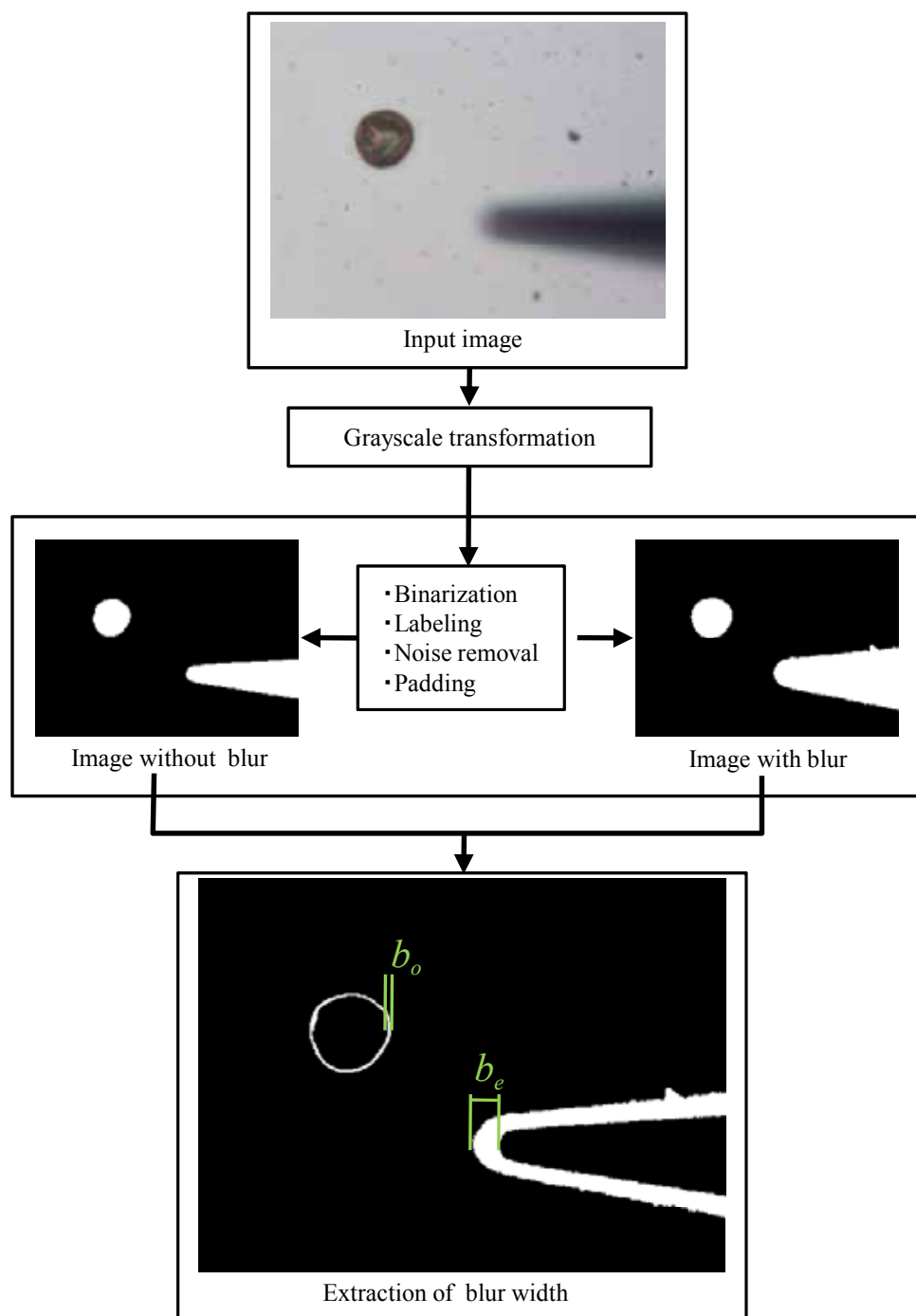


図 2.10 ボケ抽出方法の流れ



まず、入力画像を 8bit グレースケールに変換する。そして、ボケを含む領域を抽出する閾値とボケを含まない領域を抽出する閾値により、二値化を行い、さらに、ラベリング、ノイズ除去（微小領域除去）、パディング処理（花粉の模様部分を埋める）を行い、ボケを含む領域を抽出した画像とボケを含まない領域を抽出した画像を作成する。作成した2つの画像の差分をとることにより、ボケ幅を抽出する。なお、このボケ幅の抽出方法は、ボケが重なっている物体には適用できないため本実験においては、花粉は重なっていないものを選び、花粉とエンドエフェクタはボケが重ならないように十分に距離をとって実験を行った。

## 閾値の設定

本実験環境において、適切にボケ幅を抽出するための二値化閾値の設定方法について述べる。提案方法は、ボケ幅の差を用いて奥行き方向の距離を推定するため、二値化閾値は、エンドエフェクタと花粉の焦点一致面からの距離とボケ幅の関係が等しくなるような値でなければならない。そこで、二値化閾値設定のための予備実験を行う必要がある。まず、図 2.11 のようにエンドエフェクタと微小物体を、エンドエフェクタ先端と微小物体の外縁部の距離が一致するように設置する。次に、レンズを移動させ、図 2.11 中の  $n=0$  の場所が焦点一致面になるようにする。そして、 $n=1, n=2, \dots$  のようにレンズを一定間隔  $d$  ずつ移動させることにより、焦点一致面を移動させ画像を取得する。本画像処理によりボケ幅を抽出し、焦点一致面からの距離とボケ幅の関係を求める。そして、この関係が等しく（ボケ幅の差が 0）なるように閾値を設定することとした。

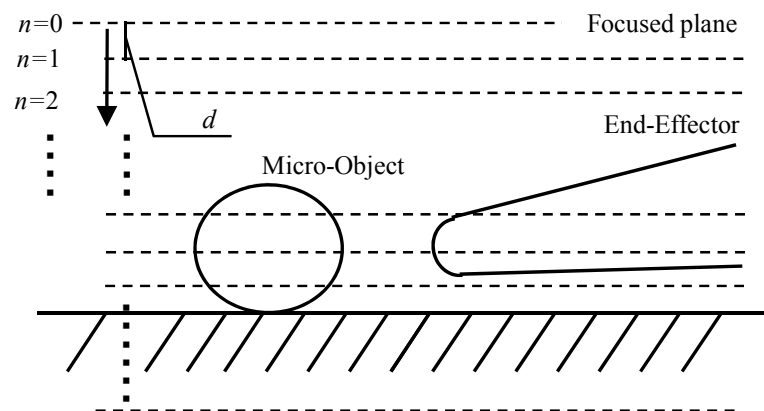


図 2.11 二値化閾値設定のための予備実験

予備実験の結果、設定した閾値はボケを含まない領域抽出の閾値が 130、ボケを含む領域抽出の閾値が 160 となった。このときのボケ幅の差を図 2.12 に示す。横軸が焦点一致面からの距離、縦軸がエンドエフェクタ先端と花粉のボケ幅の差である。ボケ幅の差は、平均値で  $0.25\mu\text{m}$  であり、僅かにずれはあるが一致していたといえる。この予備実験を他の任意の花粉に対しても行った結果、図 2.12 の結果と同様となることを確認した。したがって、以下、ここで設定したボケ幅抽出の閾値を用いることとした。

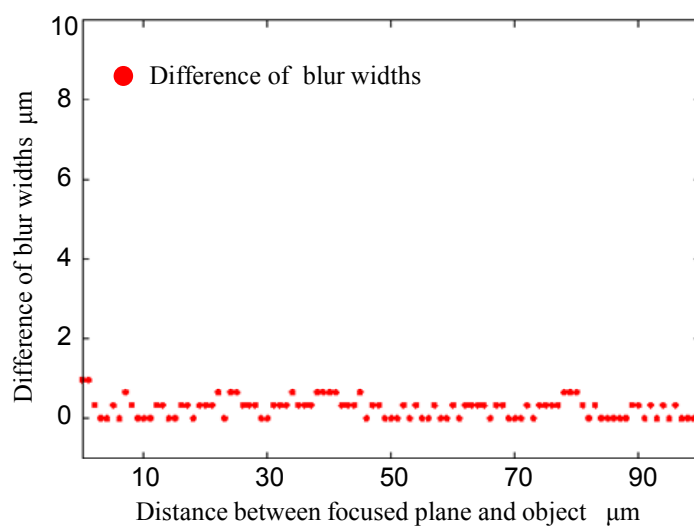


図 2.12 エンドエフェクタと花粉とのボケ幅の差

### 2.4.6 実験条件

以下に推定式導出時の条件をまとめる.

- ボケ幅の差は, 式 (2.5) を使用する
- エンドエフェクタの初期位置は, 花粉から約  $50\mu\text{m}$  離れた位置とする
- 花粉の初期状態は, ボケが生じた状態とする
- エンドエフェクタの 1 ステップの移動量は  $2\mu\text{m}$  とする
- 推定式は, 第三項までを使用する
- 5 個の花粉に対して推定式を導出する

奥行き方向距離の推定式は, 図 2.5 のようにレンズと前側焦点面の間に花粉とエンドエフェクタを置き, 図 2.6 の流れに従い, 導出する. したがって, ボケ幅の差  $\Delta b$  を求める式は, 式 (2.5) を用いる.

エンドエフェクタの初期位置は, 焦点が合っている花粉からレンズ側へ約  $50\mu\text{m}$  離れた位置とした. この位置は, 第 2.4.5 節のボケ抽出方法でボケが安定に抽出できる位置である. そして, エンドエフェクタを初期位置に移動させた後, ボケ幅を計測しやすくするため, 花粉に僅かなボケが生じるようにレンズを移動させた.

推定式導出時のエンドエフェクタの移動量 (図 2.6 参照) は経験的に  $2\mu\text{m}$  とした. なお, 推定式は, 式 (2.10) の第三項までを使用することとした. これは, 入力値  $r$  が  $0\sim 1$  の間をとる可能性が非常に高く, 推定式が精度良く導出可能であることが予測できるためである.

そして, 安定な精度で推定式が導出できることを示すため, 5 個の花粉に対して推定式を導出した.

## 2.4.7 実験結果

実験結果として、5個の花粉に対する推定式導出実験における実測値と推定式による値との差の平均、標準偏差、最大値を示したものを表 2.2 に示す。平均は、 $0.75\mu\text{m}$ ～ $1.3\mu\text{m}$ であった。

実測値と推定式による値を示したグラフを図 2.13, 図 2.14, 図 2.15, 図 2.16, 図 2.17 に示す。赤線が推定式による値であり、緑十字が実測値である。また、5回の実験における初期のエンドエフェクタと花粉の状態を図 2.18 に示す。(a)が花粉 1, (b)が花粉 2, (c)が花粉 3, (d)が花粉 4, (e)が花粉 5 である。

表 2.2 実測値と推定式による値との差

	Average [ $\mu\text{m}$ ]	Standard deviation	Maximum [ $\mu\text{m}$ ]
Pollen 1	1.25	1.25	4.83
Pollen 2	0.99	0.63	2.01
Pollen 3	1.27	1.04	3.63
Pollen 4	0.75	0.61	2.35
Pollen 5	1.3	0.96	3.96

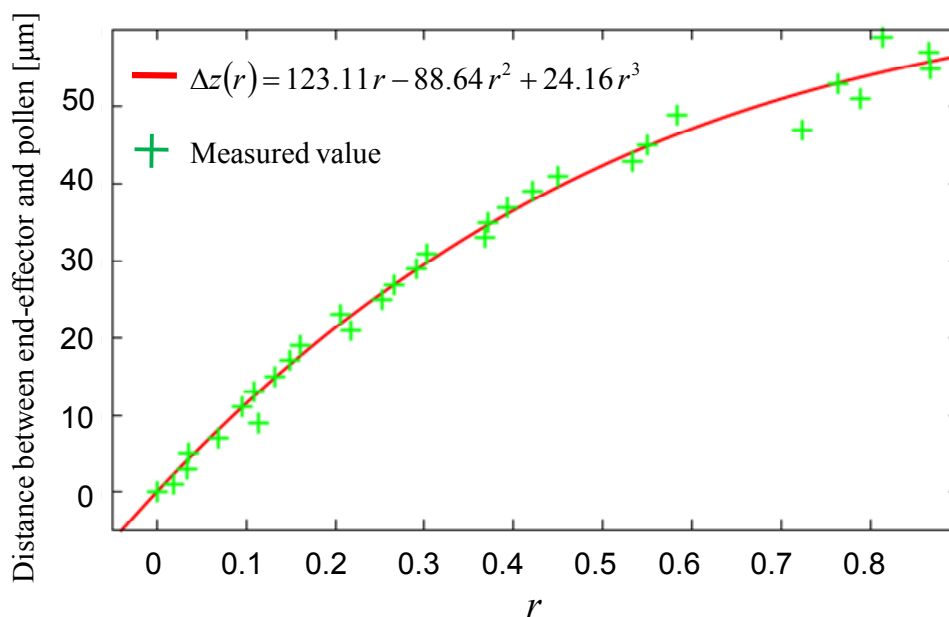


図 2.13 花粉 1 のときの推定式と実測値

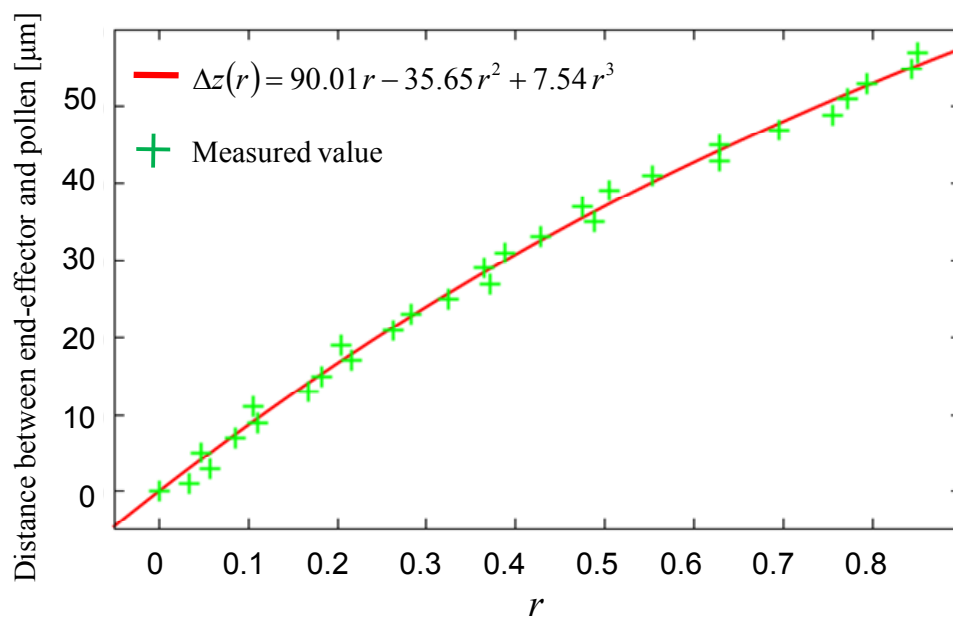


図 2.14 花粉 2 のときの推定式と実測値

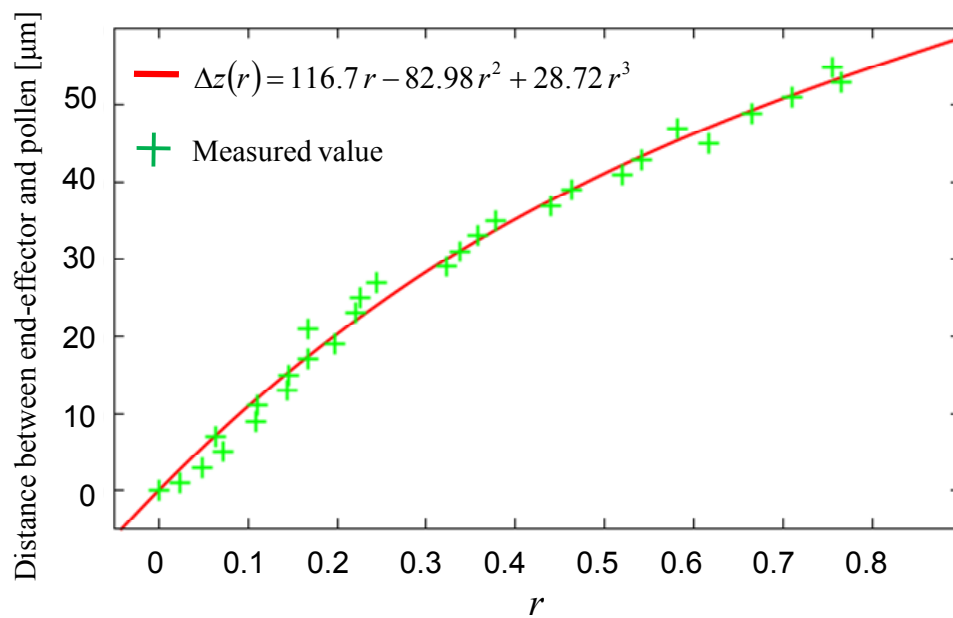


図 2.15 花粉 3 のときの推定式と実測値

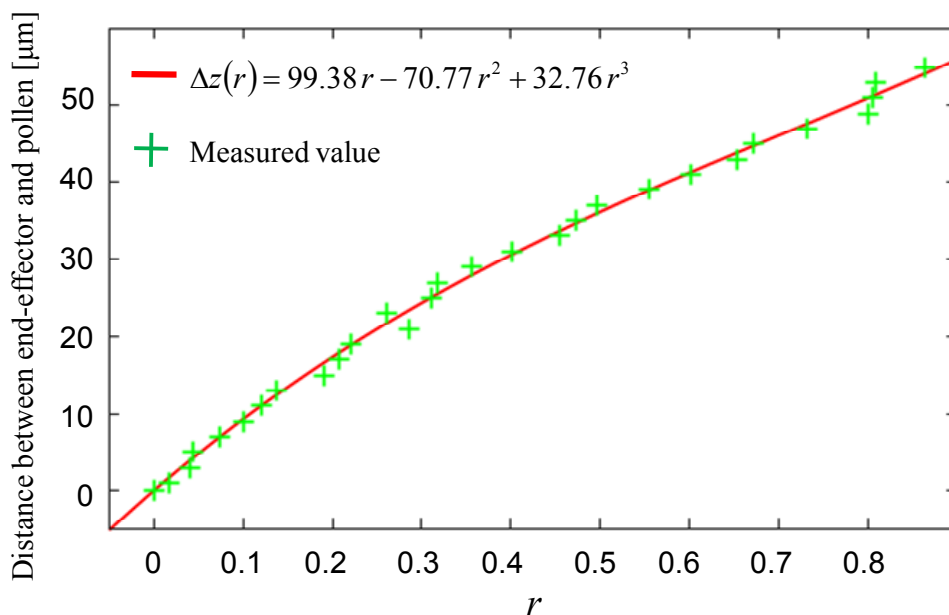


図 2.16 花粉 4 のときの推定式と実測値

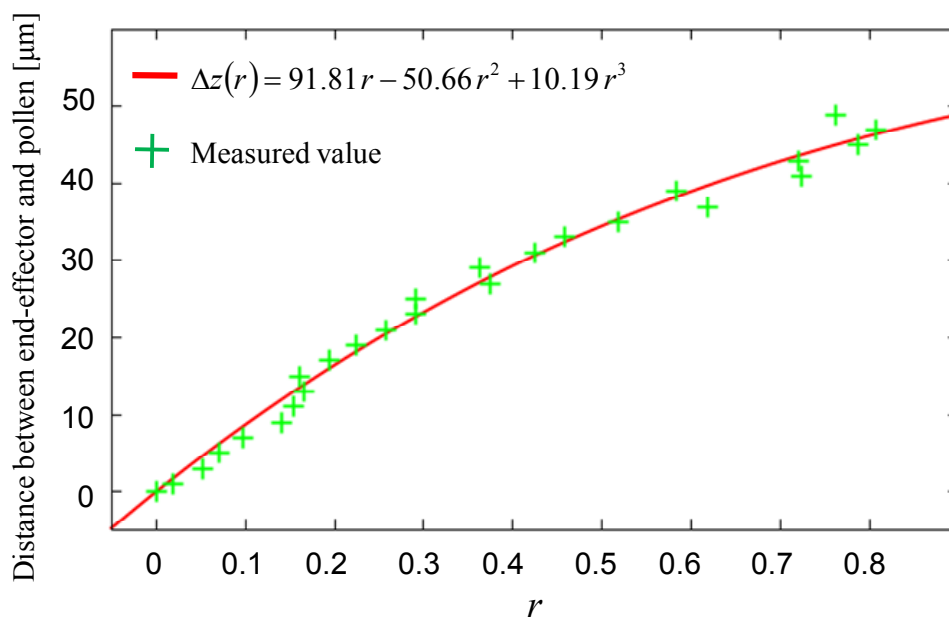


図 2.17 花粉 5 のときの推定式と実測値

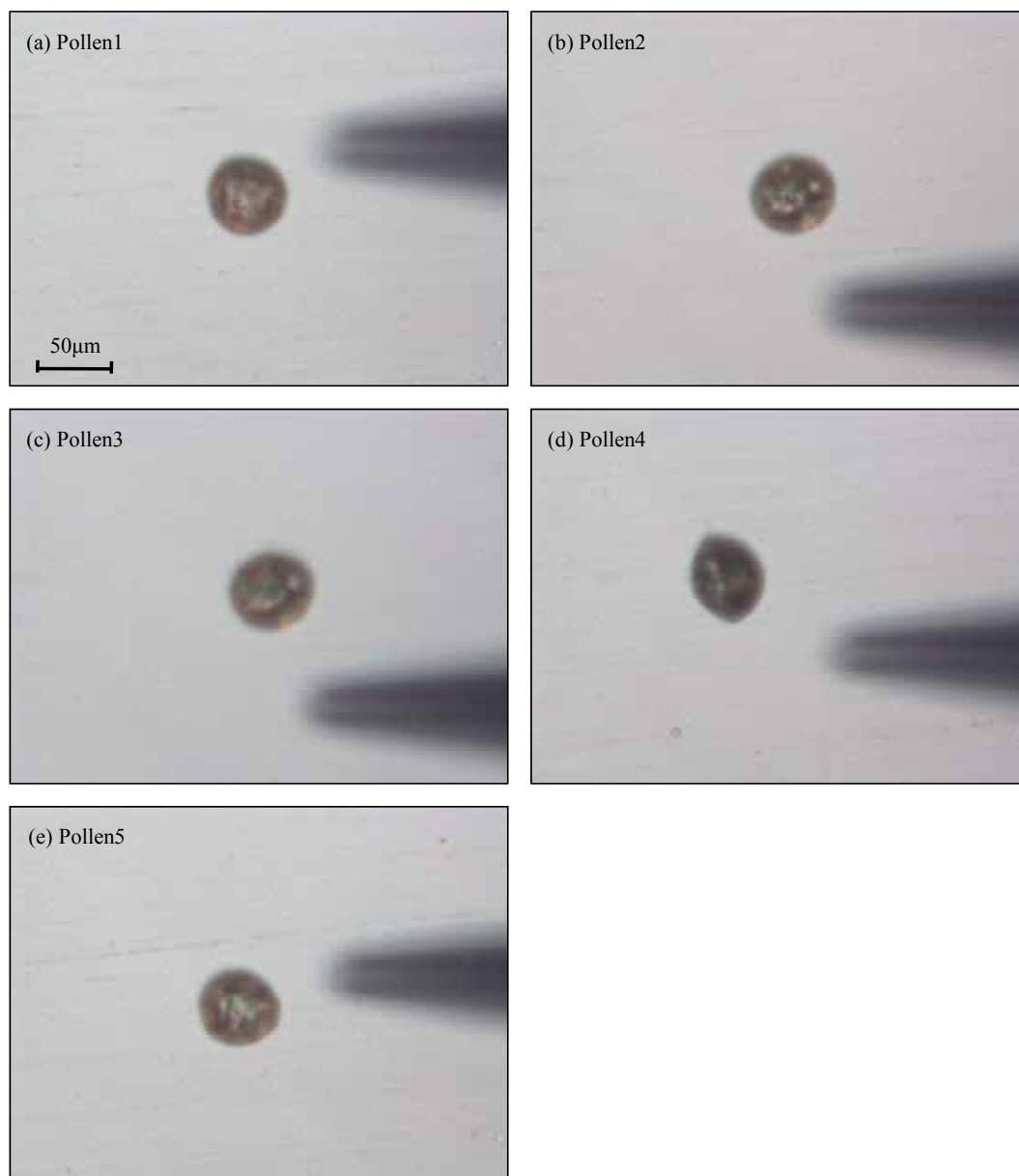


図 2.18 エンドエフェクタと花粉の初期状態

### 2.4.8 考察

5回の推定式導出実験において、誤差の平均値はそれぞれ  $1.25\mu\text{m}$ ,  $0.99\mu\text{m}$ ,  $1.27\mu\text{m}$ ,  $0.75\mu\text{m}$ ,  $1.3\mu\text{m}$  であり、標準偏差は  $1.25$ ,  $0.63$ ,  $1.04$ ,  $0.61$ ,  $0.96$  であり、誤差が小さく、ばらつきもないことから精度が良いことがわかる。先端径  $5\mu\text{m}$  のエンドエフェクタを用いて、位置合わせを行うことを考えた場合、求めた距離が、微小物体位置  $\pm 5\mu\text{m}$  (エンドエフェクタ先端径) 以内となれば、一度の距離推定と一度のエンドエフェクタ移動で位置合わせが行える。本実験結果は、上記で述べたとおり、誤差の平均は  $0.75\mu\text{m}$  から  $1.3\mu\text{m}$  であり、最も誤差が大きかった値でも  $4.83\mu\text{m}$  であり、 $5\mu\text{m}$  以内である。このことから、本奥行き方向の距離推定方法は、一度のエンドエフェクタ移動で位置合わせが行える精度を有しているといえる。

また、本実験では、推定式の項数は3項のみとした。この理由は、推定式がマクローリン展開し導出したものであるため、項数が少なくても変数が小さければ、誤差は小さくなると期待できたため(第2.3.3節および第2.4.6節 実験条件参照)であり、実験結果から期待通りの結果が得られた。

図2.13~図2.17から、精度よく推定できる距離も約  $60\mu\text{m}$  あり、本実験で使用した花粉の直径が約  $40\mu\text{m}$  であることから、花粉の直径の1.5倍程度まで精度の良い距離推定が行えることがわかる。1回目の結果(図2.13)および5回目の結果(図2.17)から距離が  $45\mu\text{m}$  以上で誤差が  $3\mu\text{m}$  よりも大きい点が存在するが、他の3回の結果では、距離が大きくなっても誤差は他の領域とほぼ変わらなかった。このことから、対象物により若干の差はあるが、 $60\mu\text{m}$  以上でもある程度の精度で推定が行えることが期待できる。なお、計測点が  $60\mu\text{m}$  程度まで存在する理由は、エンドエフェクタの初期位置を目視により決めたことから、正確に花粉の外縁部の位置にエンドエフェクタを合わせられなかったためと、各項の符号が正しく算出されなかった場合があったこと(1回目と2回目の実験)から第2.3.4節で述べたとおり、再計測とき、初期位置を  $10\mu\text{m}$  移動させたためである。

光学顕微鏡は、一般的に視認性を確保するために安定した照明が設置されているが、現実的には多少の変動は生じてしまう。このような輝度の変化は、僅かながらボケに影響を及ぼす。しかしながら、本提案方法は、ボケ幅の差を利用している。このため、輝度変化が生じて、花粉とエンドエフェクタのボケ幅に、ほぼ同様に影響を与えるため、ボケ幅の差としての影響は小さいものとなる。このことも、安定した精度が得られた要因だと考えられる。しかしながら、本実験で用いた顕微鏡の照明よりも、輝度変化が大きいものを使用する場合、ボケ幅の差にも大きい影響が表れ、推定精度の低下が予測できる。したがって、このような場合、輝度変化にロバストなボケ幅の抽出方法が必要となると考えられる。なお、照明の輝度変化による影響の詳細は、付録A.1に示している。



## 2.5 位置合わせ実験

本節では、提案した奥行き方向の距離の推定方法を用い、エンドエフェクタと微小物体との距離を推定し、マイクロマニピュレータを用いた微細作業において最も基本的な動作である位置合わせを行う。微小物体として、大きさに個体差がある花粉を用いた。そして、導出した推定式の精度と位置合わせ結果について考察し、本奥行き方向の距離推定方法の有用性を示す。

### 2.5.1 実験目的

以下に本実験の目的を示す。

1. 本奥行き方向の距離推定方法において導出した推定式の精度を確認する。
2. 推定式で求めた距離により、エンドエフェクタを微小物体へ位置合わせできることを確認し、本方法の有用性を示す。

### 2.5.2 実験装置および微小物体

実験装置は、第 2.4.2 節で述べた装置と同じため説明は省略する。また、本実験に用いる微小物体は、第 2.4.3 節で述べた胡桃の花粉を用いた。大きさは、おおよそ 25～45[ $\mu\text{m}$ ]とばらついており、エンドエフェクタと微小物体との距離が位置合わせ毎に異なるため、本提案方法の有用性を確認するための対象物として適している。

### 2.5.3 実験方法および条件

実験は、5個の花粉に対して奥行き方向の位置合わせを行う。ただし、使用する推定式は、最初の花粉において導出する。ボケ幅の抽出方法、推定式導出時の条件は、それぞれ第2.4.5節、第2.4.6節で述べたものと同様であるため、省略する。本節では、位置合わせが行えているかを判断する成功確認と、位置合わせの手順について述べる。

#### 位置合わせの成功確認

位置合わせの成功確認のイメージ図を図2.19に示す。位置合わせが成功したか否かの確認は、位置合わせ後、花粉を押すようにエンドエフェクタを少しずつ移動させ、花粉が押された場合、成功とする(図2.19(a))。そして、エンドエフェクタ先端が花粉に隠れる(図2.19(b))、または、上側になる場合(図2.19(c))、位置合わせが正確に行えなかったと判断できるので、失敗とする。なお、成功確認を行う前にレンズを移動させ、花粉とエンドエフェクタが明確に目視で確認できるようにする。

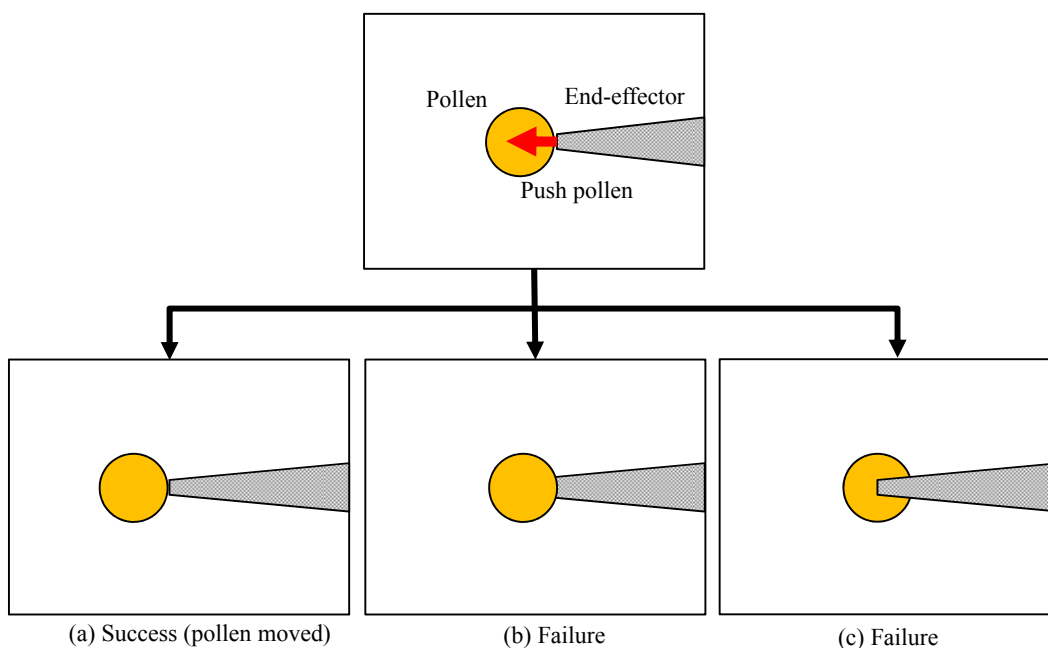


図 2.19 位置合わせの成功確認

## 位置合わせの手順

エンドエフェクタと花粉の奥行き方向の距離のみ画像計測により自動で算出し、実際の位置合わせは手動によりマイクロマニピュレータ、ステージ、レンズを操作し行う。位置合わせ実験の手順を以下にまとめる。

- ① ステージを移動させ、花粉を探索する
- ② ボケ幅を計測し、推定式によりエンドエフェクタと花粉との距離を求め、エンドエフェクタを奥行き方向へ移動させる
- ③ レンズを移動させ、花粉にピントを合わせる（位置合わせ成功確認のため）
- ④ エンドエフェクタの x 軸, y 軸移動を行い、花粉へ合わせる（ボケ幅を計測した位置どうしを合わせる）
- ⑤ エンドエフェクタの x 軸を  $1\mu\text{m}$  ずつ移動させ、花粉に接触するか確認する
- ⑥ 接触しない場合、エンドエフェクタの z 軸を  $1\mu\text{m}$  ずつ花粉側へ移動させる（x 軸を④終了時の位置へ戻してから z 軸移動を行う）
- ⑦ 接触するまで⑥を繰り返し、⑥で移動させた z 軸の量を記録する（推定式による距離推定の差の記録）
- ⑧ 接触確認後、エンドエフェクタをレンズ側へ  $50\mu\text{m}$  移動させる
- ⑨ レンズを元の位置へ戻す
- ⑩ ①から⑨を 5 回繰り返す

## 2.5.4 実験結果

実験結果として、奥行き方向の距離推定式と位置合わせ結果について述べる。

## 推定式について

推定式の値と推定式を導出する際に用いた計測値を図 2.20 に示す。縦軸がエンドエフェクタと花粉の距離であり、横軸が  $r$  である。そして、赤線が推定式による値であり、緑十字が実測値である。また、推定式導出に用いた花粉と初期位置にあるエンドエフェクタの画像を図 2.21 に示す。

導出した推定式の定数は、 $c_1=86.6$ 、 $c_2=-81.2$ 、 $c_3=57.9$  であった。推定式の値と計測値との差は、最大で約  $3\mu\text{m}$  であり、平均では  $0.9\mu\text{m}$  であり、標準偏差は、 $0.76$  であった。

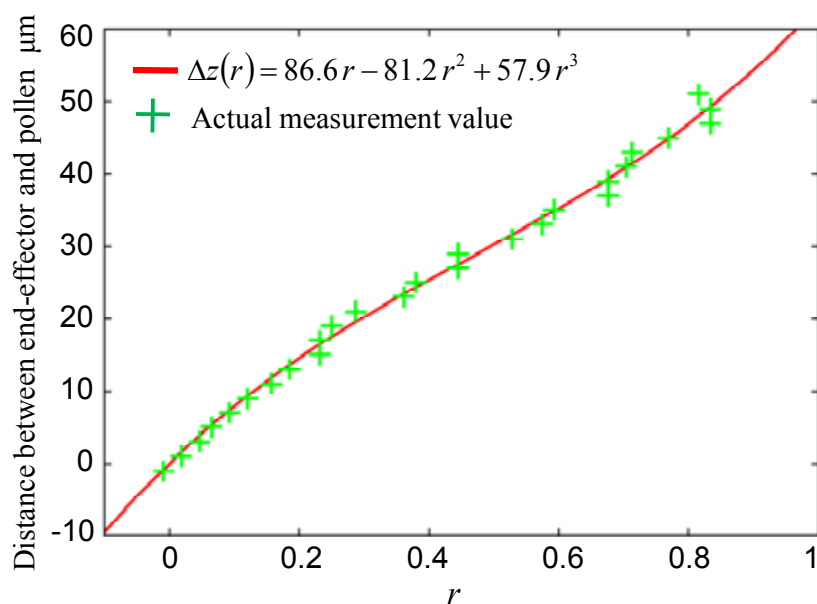


図 2.20 計測値と推定値



図 2.21 初期位置のエンドエフェクタと花粉

## 位置合わせについて

実験の結果、5回の位置合わせは、すべて一度のエンドエフェクタの移動により行えた。つまり、推定式で求めた距離とエンドエフェクタと花粉との接触位置の差は、すべて  $0\mu\text{m}$  であった。結果の詳細として、エンドエフェクタのボケ幅  $b_e$  と花粉のボケ幅  $b_o$ 、推定式の変数  $r$ 、推定式により求めた花粉とエンドエフェクタの距離  $\Delta z(r)$ 、を表 2.3 に示す。ただし、 $\Delta z(r)$  はエンドエフェクタの移動量の分解能が  $1\mu\text{m}$  であることから、小数点第1位を四捨五入した値を記してある。

表 2.3 実験結果

No	$b_e \mu\text{m}$	$b_o \mu\text{m}$	$r$	$\Delta z(r) \mu\text{m}$
1	7.605	1.300	0.898	54
2	6.825	1.430	0.7685	45
3	7.930	1.300	0.9444	58
4	6.370	1.430	0.7037	41
5	6.110	1.300	0.685	40

また、図 2.22～図 2.26 に 5 回の位置合わせ前の画像（左側）と位置合わせ後の画像（右側）を示す。位置合わせ前の画像は、第 2.5.3 節 位置合わせの手順で述べた実験手順①終了時であり、位置合わせ後の画像は、実験手順⑤終了時である。なお、図 2.22 の花粉は、推定式導出に用いた花粉である。また、5 個の花粉の大きさは、短径と長径を用いて(短径[ $\mu\text{m}$ ], 長径[ $\mu\text{m}$ ])と表すと、花粉 1 は(36, 39), 花粉 2 は(34, 40), 花粉 3 は(29, 33), 花粉 4 は(37, 43), 花粉 5 は(30, 43)であった。

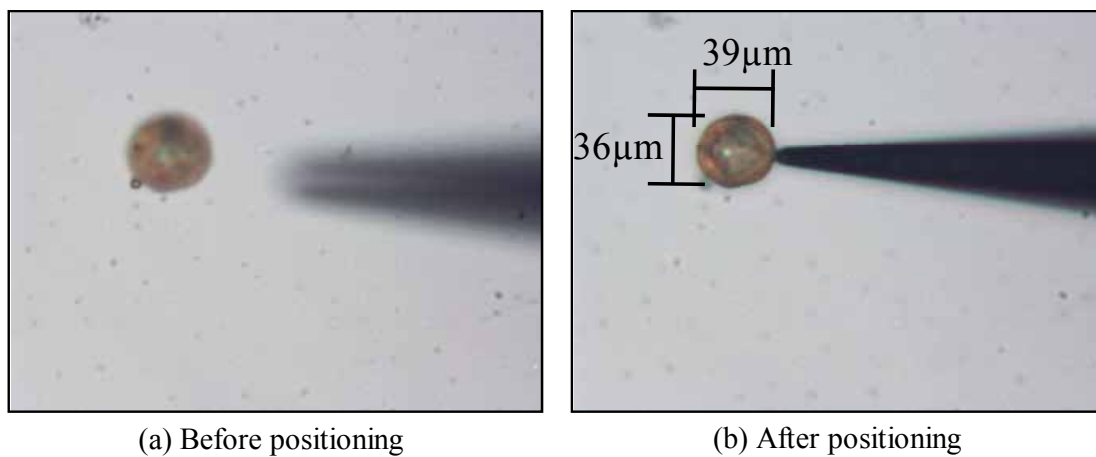


図 2.22 花粉 1

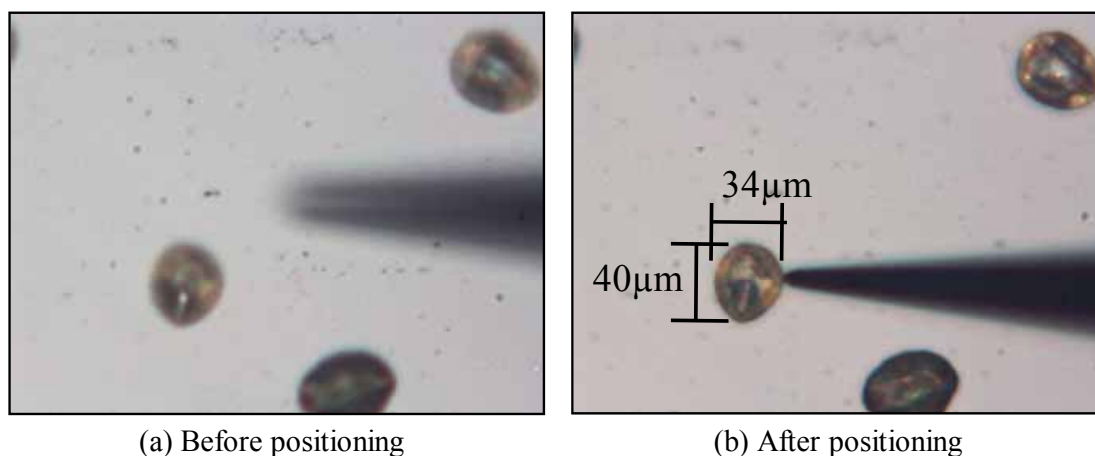


図 2.23 花粉 2

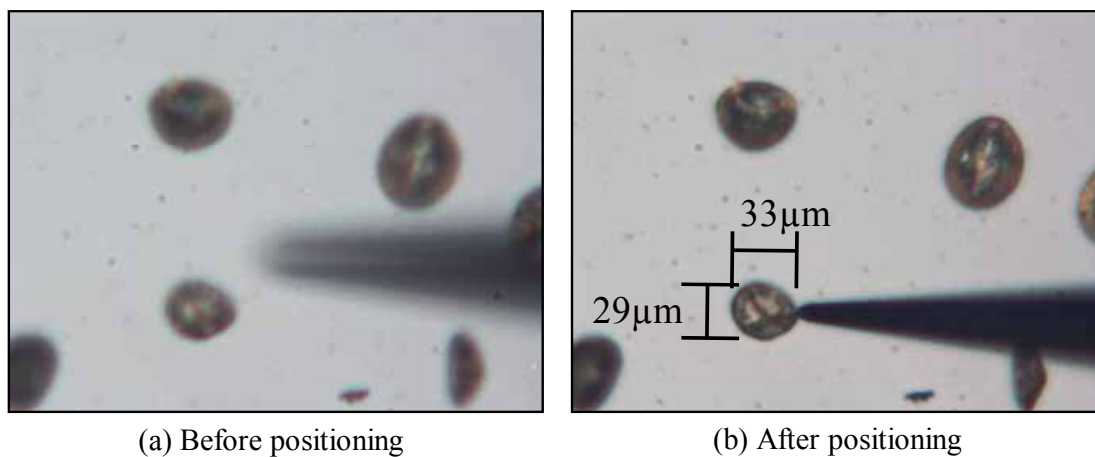


図 2.24 花粉 3

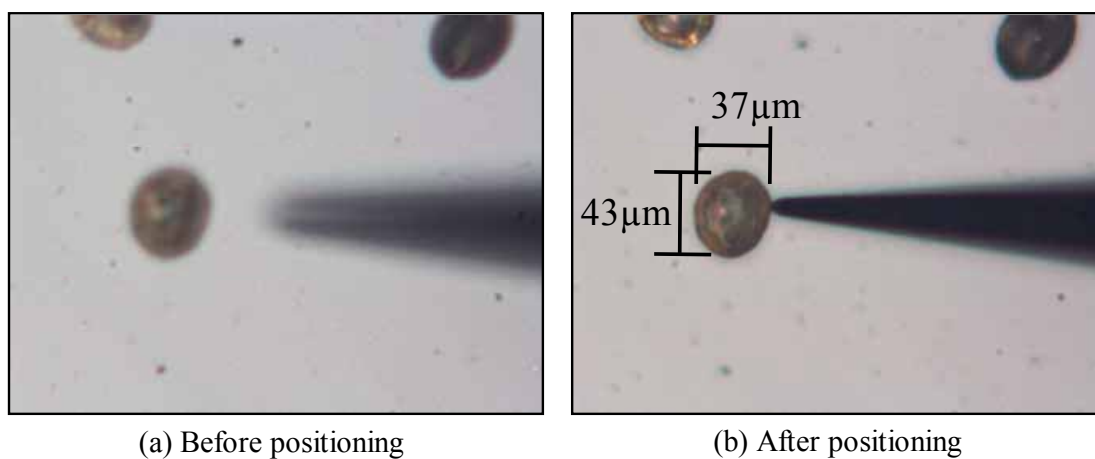


図 2.25 花粉 4

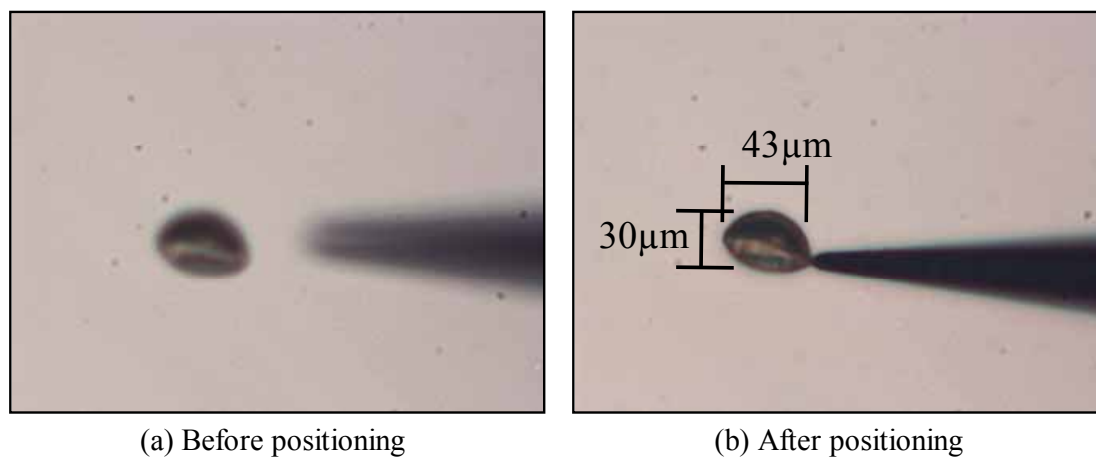


図 2.26 花粉 5



### 2.5.5 考察

先端径  $5\mu\text{m}$  のエンドエフェクタを用いて、一度のエンドエフェクタ移動で微小物体に位置合わせを行うには、求めた距離が、微小物体位置 $\pm 5\mu\text{m}$  (エンドエフェクタ先端径) 以内とならなければならない。本提案方法は、導出した推定式から、計測値との差は最大でも約  $3\mu\text{m}$  であり、先端径  $5\mu\text{m}$  のエンドエフェクタを使用した場合、確実に一度のエンドエフェクタ移動により、位置合わせが行えることがわかる。また、計測値との差が平均  $0.9\mu\text{m}$ 、標準偏差が  $0.76$  であることから、エンドエフェクタ先端径が  $1\mu\text{m}$  のものでも、高い確率で一度のエンドエフェクタ移動により、位置合わせが可能であることがわかる。実際に位置合わせを行った結果、大きさが異なる 5 個の花粉に対して、全て一度の距離推定および一度のエンドエフェクタ移動により、位置合わせが行えた。

本提案方法の問題点として、エンドエフェクタと微小物体の位置が前側焦点面の前後で、用いる式を式 (2.5) または式 (2.7) に変えなければならないことが挙げられる。しかしながら、微細作業の最初に、前側焦点面の前側、または後側を使用すると決めておけば特に問題とはならないと考える。また、プレパラートが大きく歪んでいるなどで、微小物体群が前側焦点面の前後に存在してしまうことも考えられるが、対策として、レンズの色収差を用いた方法[40][41]を利用することが考えられる。前側焦点面の前後で色みが変わるので、これを利用し、エンドエフェクタと微小物体の色みが同じ傾向になるようにレンズ、またはステージを  $z$  軸移動させる。これにより、前側焦点面の前側、後側のどちらかで位置合わせを行うことができると考える。

本提案方法は、花粉のような大きさに個体差がある微小物体に対しても、奥行き方向の距離を推定でき、一度のエンドエフェクタ移動により、位置合わせを行うことができる。以上のことから、本提案方法は有用であることが示せた。

## 2.6 本章のまとめ

本章では、二つの物体のボケ幅の差から奥行き方向の距離を求める方法を提案し、実験により、その有用性を示した。以下に本章で述べたことをまとめる。

1. 微細作業とそのシステムの現状について述べ以下のことを明確にした。
  - 微細作業システムの研究は多いが、自動化の研究はほとんど行われていない。
  - 微細作業の自動化に関する研究は、細胞を対象としているため液体中が主であり、空気中に存在する膨大な微小物体を対象とした研究はない。
2. 従来の奥行き方向の距離計測および位置合わせに関する研究について述べ、これらが膨大な微小物体を対象とした場合、効率的ではないことを明確にした。
3. ボケの生じる要因について述べ、被写界深度からボケと距離の関係に着目した。
4. 上記記から、提案する奥行き方向の距離推定方法の方針を決定した。以下に方針を示す。
  - 一度のエンドエフェクタ移動で位置合わせが行えること
  - 距離算出において、レンズパラメータを用いないこと
  - 被写界深度に基づき、ボケから距離を求めること
5. 上記 4 で示した方針に基づき、提案した奥行き方向の距離推定方法の特徴を以下にまとめる。
  - 2つの物体のボケ幅の差から、奥行き方向の距離を推定する方法である。
  - 距離算出のとき、焦点距離などのレンズパラメータの情報を必要としない。
  - 近似式導出時には、複数回のエンドエフェクタの移動が必要となるが、微小物体への位置合わせを行う場合、導出した近似式を用いて距離を算出するため、レンズやステージの移動は必要なく、一度のエンドエフェクタ移動で位置合わせが行える。

6. 推定式導出実験の結果により、明確になった点を以下にまとめる。
  - 5 回の推定式導出実験から得られた推定式は、実測値との誤差が  $0.75\mu\text{m}$  から  $1.3\mu\text{m}$  であり、標準偏差が  $0.61$  から  $1.25$  であり、誤差が小さくばらつきもない。
  - 上記から、本実験装置において、先端径  $5\mu\text{m}$  のエンドエフェクタを用いた場合、一度の距離推定および一度のエンドエフェクタ移動により位置合わせが行える精度を有している。
  - 上記の精度は、推定距離が約  $60\mu\text{m}$  でも同様の精度が得られる。
  
7. マイクロマニピュレータを用いた微細作業において最も基本的な動作である位置合わせを実験として行った結果、5 個の大きさが異なる花粉に対して、一度の奥行き方向の距離推定によるエンドエフェクタ移動により位置合わせが行えた。この結果から、本奥行き方向の距離推定方法は、推定する距離が変わっても、高い精度で距離推定が行えることを示した。

## 第 3 章

# 微粒子の自動把持と解放

本章は、第 2 章において提案した奥行き方向の距離推定方法を用いることにより、微細作業において基本的な動作である微小物体の把持と解放を二台のマイクロマニピュレータを用いて、自動で実現することを目的とする。まず、対象となる微小物体を挙げる。次にこれを把持、解放するために適した方法を従来方法について調査することにより検討し、開発する[50][51]。そして、実験により自動把持と解放が実現できることを示し、本自動把持と解放、および本奥行き方向の距離推定方法の有用性を示す。

### 3.1 把持と解放

微細作業において把持と解放は、基本的な動作であり、これを自動化することは微細作業の自動化にとって非常に重要なことである。しかしながら、微小物体の把持と解放に関する研究は多く行われているが、自動で実現した報告はない。本研究では、まず、対象とする微小物体について述べ、これを把持、解放するための方針について述べる。そして、従来の把持と解放について述べ、開発する自動把持及び解放の検討材料とする。ここで、把持とは、微小物体を掴み、持ち上げることをいい、解放はエンドエフェクタに付着した微小物体を落とすことを言う。

#### 3.1.1 対象とする微小物体と方針

本研究では、空気中に存在する微小物体を対象としていることから、第 2 章の実験で使用した胡桃の花粉を対象とした。花粉は生体のため、作業中に損傷を与えないことが重要である。また、花粉の形状は、楕円体、または半球体であり、表面はやや凹凸が存在し、理想的な球体ではない。一般的に微小物体は、複雑な形状のものはないが、やや歪んでいる形状が多く、このような物体に適用ができなければならない。

以上から、本把持、および解放の方針は以下とする。

- 微小物体へ損傷を与えないこと
- やや歪んでいる形状の微小物体でも適用できること

### 3.1.2 従来の把持と解放に関する研究

本節では、従来のマイクロ領域における把持と解放の方法について、前節で述べた本方針、および自動化の観点から述べ、開発する自動把持および解放の方法の検討材料とする。

マクロ領域でのマニピュレータによる物体の操作は、ニュートン力学主体であるが、マイクロ領域では、ファン・デル・ワールス力（分子間、または原子間に働く相互作用力の総和）や静電気力、液架橋力などの凝着力が支配的である。このため、エンドエフェクタを微小物体へ接触させただけで付着してしまい、離れないことがある。このようにマイクロ領域は特殊な環境であり、多くの把持、解放方法が提案されている。

報告されている把持と解放の方法として、空気吸引を利用した方法[17]、静電気力を利用した方法[14][17]、液架橋力を利用した方法[15]~[17]、機械的方法[22]~[26]、力学に基づく方法[12][13]が挙げられる。また、解放のみの方法として振動を利用した方法[17]が報告されている。

#### 空気吸引を利用した方法

空気を吸引することにより、微小物体を吸着させ、把持を行う方法である。解放は、吸引していた空気を止める、または吐き出すことにより行う。このため、対象物が生体であっても損傷の危険性は少ないと考えられる。しかしながら、工業製品のような理想的な形状であれば、把持は高い確率で成功するが、生体のように表面に凹凸がある場合、そこから空気が漏れ、吸引力が落ち、把持が行えない場合もあり成功率は低下する。また、解放するとき、空気を吸引するパイプの縁に微小物体が付着し、解放に失敗することがある。自動化を考えた場合、制御はエンドエフェクタを微小物体へ位置合わせするだけでよい。

#### 静電気力を利用した方法

静電気力を利用した方法は、針状のエンドエフェクタとステージ間に電圧を印加し、それぞれに電場を発生させる（エンドエフェクタの方が強く発生する）ことにより、微小物体に分極を生じさせ、その結果、エンドエフェクタに引き寄せることにより把持する方法である。解放は、エンドエフェクタとステージを短絡させ、両者の電荷を相殺することにより行う。しかし、実際にはこの操作だけでは対象物の分極が消えないため、解放の成功率は低い。また、印加する電圧は数百 V であり、生体を対象とした場合、生体への損傷が懸念される。自動化を考えた場合、空気吸引を利用した方法と同様に、制御はエンドエフェクタを微小物体へ位置合わせするだけでよい。ただし、解放する際

は、エンドエフェクタとステージを短絡させることから、高い精度の奥行き方向の距離推定が必要である。

#### 液架橋力を利用した方法

パイプ状のエンドエフェクタを用いて、エンドエフェクタ先端に液体を充填させ、微小物体に近づけると、液体だけが対象物に接触する。このとき、液架橋力が発生し、エンドエフェクタ先端に微小物体が付着し、把持が行える。解放は、ライトを当てることによる熱で水分を蒸発させ行う。液体に水を使用すれば、生体にも有効な方法であるが、液体の調整が難しく、液体が多すぎると、解放が行えないだけでなく、生体への損傷にもつながる。また、解放時に液体を蒸発させなければならないことから、時間を要すること、熱による生体へ損傷が問題である。自動化を考えた場合、制御はエンドエフェクタを微小物体へ位置合わせするだけでよい。

#### 機械的方法

機械的方法は、空気吸引、静電気力、液架橋力を利用した方法のように把持や解放に要する力を発生させる特殊な装置を使用せず、一般的な針状のエンドエフェクタを用いて、制御を工夫することにより把持や解放を行う方法である。簡単な例を挙げると、二本のエンドエフェクタを掴むような動作で制御し、把持を行うことである。このため、把持および解放の成功率は、作業者の経験や技量、またはシステムの操作性に依存する。代表的なシステムとして、二本指を有するマイクロハンドが存在する[22]~[26]。これは、二本の指を、箸のように操作し、物体を掴むように把持する。また、片方の指に付着した微小物体を弾くような動作で解放する。制御を工夫すれば、生体への損傷を防ぐことも可能であり、かつ、やや歪んだ形状の微小物体へも対応が可能だと考えられる。

#### 力学に基づく方法

機械的方法の一種であり、エンドエフェクタの操作により発生する力を力学的に解析し、これを用いて微粒子とプレパレート、またはエンドエフェクタに生じる凝着力を増加、減少させ、把持と解放を行う方法である。理想的な球体の微粒子に対しては高い成功率が報告されている。一台のマイクロマニピュレータで把持と解放が行えるため、他の方法と比較し、システムが最も簡単に構築できる。さらに特殊な装置を用いないことから、生体へ損傷を与える危険性は少ないが、力学モデルに基づいているため、完全な球体でのみ適用可能であり、花粉には適用できない。また、自動化には、繊細な制御が必要である。

## 振動による解放

振動モータを動作させることにより、エンドエフェクタに付着した微小物体を振り落とすような動作で解放する方法である。マイクロスケールの物体であれば、100Hz以上の振動によりほぼ100%の確率で解放が行えると報告されている。また、解放するとき、プレパラートから十分な距離をとれば、微小物体に損傷を与える危険はない。

### 3.1.3 従来法の本方針における考察

第 3.1.2 節で述べた方法について、生体への損傷の危険性、やや歪な形状への適用、自動化のための制御の複雑さ、把持の成功率、解放の成功率を○、△、×でまとめたものを表 3.1 に示す。表の「損傷」は、生体への損傷の危険性がないものは○、危険性があるものは×とした。「形状」はやや歪な微小物体への適用が可能な場合○、不可能な場合×とした。「制御」は複雑さが低いものは○、高いものは×とした。そして、「把持」と「解放」は成功率が高いものは○、低いものは×とした。

表 3.1 従来法における考察のまとめ

	損傷	形状	制御	把持	解放
空気吸引を利用した方法	○	△	○	△	△
静電気力を利用した方法	×	○	○	△	×
液架橋力を利用した方法	×	○	○	○	○
機械的方法	○	○	△	○	△
力学に基づく方法	○	×	×	○	○
振動を利用した方法	○	○	○		○

静電気力、液架橋力を利用した方法は、対象物へ損傷を与える可能性が高いため本方針に沿わない。また、空気吸引を利用した方法は、やや歪な形状への適用に不安があり、把持と解放の成功率もあまり高くないため本方針に沿わない。力学に基づく方法は、繊細かつ複雑な制御を必要としているため自動化に向かない。これらに対して、機械的方法は、制御がやや複雑になる点と解放の成功率に不安があるが、本方針を満足させることが可能である。また、振動を利用した方法がすべての項目で○であり、これも本方針を満足させることができる。したがって、本研究における把持と解放は、以下とした。

- 把持は、機械的方法を参考にする
- 解放は、振動を利用する方法を採用する

## 3.2 把持と解放の自動化

把持方法を第 3.2.1 節から第 3.2.3 節，解放方法を第 3.2.4 節において述べる。

### 3.2.1 把持方法

本把持方法を述べる。第 3.1.3 節から，把持は，機械的方法を参考にすることとした。機械的方法における把持は，通常，安定に微小物体を把持するため，二本のエンドエフェクタを用い，掴むような動作で行う。自動でこれを行うためには，画像処理により把持するための目標点を計測すればよく，花粉の様にやや歪んだ形状でも問題ない。しかしながら，掴む動作は，微小物体がこぼれ落ちないようにするため，微小物体へ力のある程度加えなければならない。このため，次の問題点が存在する。

- 対象物に損傷を与える危険性がある
- 摩擦による静電気力の増大により，対象物とエンドエフェクタが付着し，解放できなくなる

そこで，本研究は，二本のエンドエフェクタを微粒子の下側へ差し込み，持ち上げるような動作，つまり，「すくい上げる動作」で把持を行うことを考えた。救い上げる動作のため，微粒子への力はほとんどかからない。このため，微粒子への損傷を防ぐことが期待できる。また，摩擦による静電気力の増加は掴む動作と比較し，小さくなることが推測できる。したがって，掴む動作と比較し，解放が行いやすい。しかしながら，「すくい上げる動作による把持」は，二本のエンドエフェクタの上に微小物体を乗せるだけで，固定しないため，「掴む動作による把持」と比べると安定性で劣ると考えられ，把持の成功率を確認する必要がある。

### 3.2.2 把持における提案した奥行き方向の距離推定方法の適用

すくい上げる動作で把持を行うためには，奥行き方向の距離推定の精度が高くなければならない。微粒子を把持するときの微粒子とエンドエフェクタ先端のイメージを図 3.1 に示す。微粒子は第 2 章の実験で使用した胡桃の花粉を想定し，直径  $40\mu\text{m}$  の球体と仮定し，エンドエフェクタは先端径が  $5\mu\text{m}$  を仮定している。微粒子をすくい上げる場合，エンドエフェクタ先端径の半分程度を花粉の外縁部の下側に入れる必要があると考える。この場合，エンドエフェクタ先端の下側位置からプレパラートまでの距離は約  $6.5\mu\text{m}$  であり，非常に小さい（図 3.1 参照）。つまり，奥行き方向の距離推定誤差は，この範囲内でなければならない。実際には，花粉は  $25\mu\text{m}$  から  $45\mu\text{m}$  の大きさであり，



この仮定よりも小さい場合もあり，さらに，エンドエフェクタ先端も  $5\mu\text{m}$  よりも大きいこともある．このため，実際には，誤差は  $6.5\mu\text{m}$  よりも小さくしなければならず，奥行き方向の距離推定の精度は高いものが要求される．第2章の実験において，本奥行き方向の距離推定方法の誤差の平均は約  $1\mu\text{m}$  であることを示した．このため，本奥行き方向の距離推定方法を用いることで，すくい上げる動作による把持を，自動で行うことができると考えた．

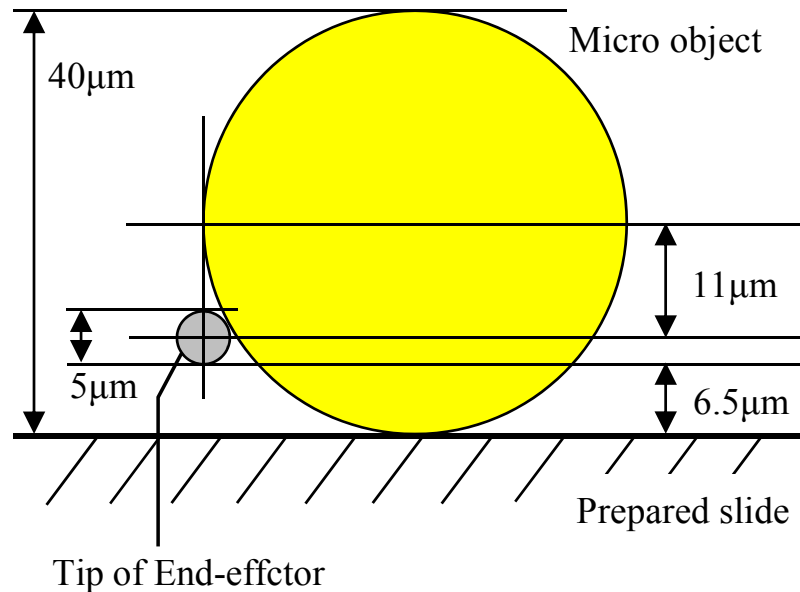


図 3.1 把持のときの微粒子とエンドエフェクタ先端の関係

### 3.2.3 把持方法の流れ

図 3.2 に把持の流れを示す．入力画像の横方向を X 軸，縦方向を Y 軸と定義する．奥行き方向は Z 軸と定義する．それぞれの方向において，エンドエフェクタと微粒子の端の距離を  $r_x, r_y, r_z, l_x, l_y, l_z$  とする． $r$  は，右のエンドエフェクタであり， $l$  は左のエンドエフェクタである．そして，それらの補正値を  $c_x, c_y, c_z$  とする．これらの補正値は，エンドエフェクタを微粒子の端の下側へ移動させるための値である．

把持の手順を述べる．まず，エンドエフェクタを奥行き方向へ移動させる（図 3.2 の(1)）．移動距離は， $r_z$  (または  $l_z$ ) +  $c_z$  である． $r_z$  と  $l_z$  は第2章で述べた方法により推定される．二番目に，二台のエンドエフェクタを微粒子の近くへ移動させる（図 3.2 の(2)）．目標位置は，図 3.2 の(2)の赤点である．三番目に，二台のエンドエフェクタを微粒子の端の下側へゆっくりと移動させる（図 3.2 の(3)）．最後に，2台のエンドエフェクタを奥行き方向へ移動させ，微粒子を持ち上げる（図 3.2 の(4)）．以上で把持は完了となる．

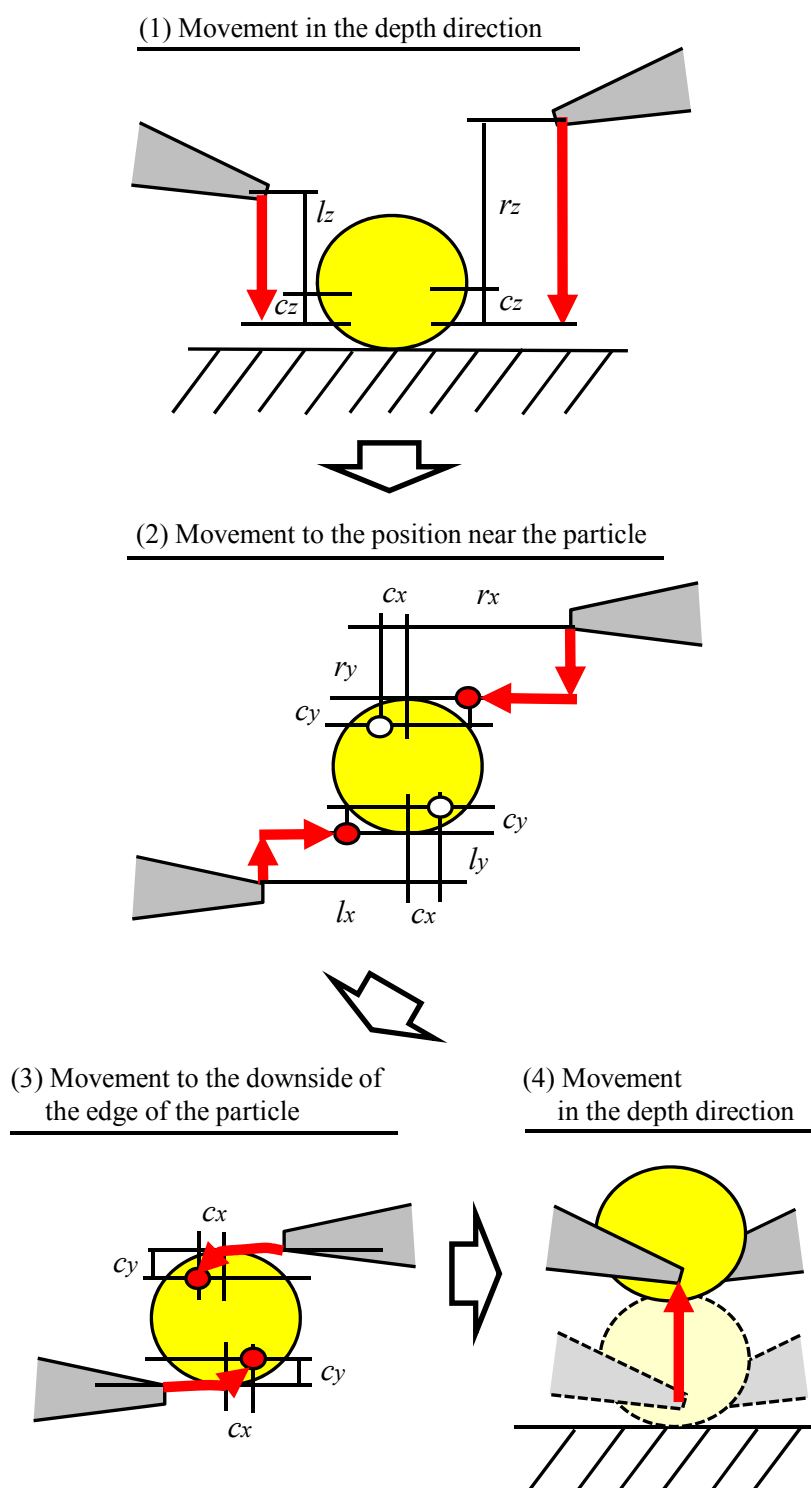


図 3.2 把持の流れ

### 3.2.4 解放方法

本解放方法について述べる．図 3.3 に把持の流れを示す．周波数 100Hz 以上の振動を利用することによりほぼ 100%の成功率で解放できることが報告されており，本研究でもこれを利用した．

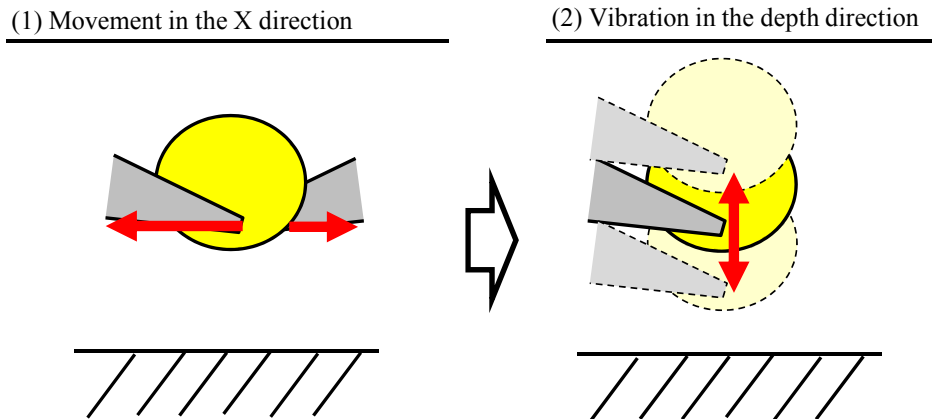


図 3.3 解放の流れ

まず，二台のエンドエフェクタを横方向へ移動させる（図 3.3 の(1)）．移動後，微小物体は，どちらかのエンドエフェクタに付着する．次に，微小物体が付着しているエンドエフェクタを画像処理により認識する．最後に，振動モータを動作させ微粒子を解放する．プレパラートから十分に距離をとることにより，微粒子へダメージを与えずに解放が行える．振動モータは，微小物体をエンドエフェクタの近くに解放するため，奥行き方向に振動させる．

## 3.3 自動把持および解放実験

### 3.3.1 実験目的

本実験の目的は、下記 2 点である。

- 奥行き方向の推定式の精度を確認する
- 自動で微粒子の把持と解放が行えることを確認し、成功率を示す  
「すくい上げる動作による把持」は、二本のエンドエフェクタの上に微小物体を乗せただけなので、「掴む動作による把持」と比べると安定性で劣ると考えられる。そこで、成功率を確認することとした。また解放は、期待通りの成功率が得られることを確認する。

### 3.3.2 実験装置

実験装置の構成図を図 3.4 に示す。また、PC、光学顕微鏡、画像、エンドエフェクタ、マイクロマニピュレータおよびステージ、振動モータの仕様を表 3.2 に示す。

顕微鏡として、ハイロックス社製 CX-10C に対物レンズ OL-140 を装着し、画像取得のため PointGrey 社製 Flea2 デジタルカメラを使用した。二軸ステージと三軸マニピュレータの制御は、PC からの制御命令を駿河精機社製のコントローラ D220 (図 3.4, Controller (1), (2)) に送り、同じく駿河精機社製の二軸ステージおよび三軸マイクロマニピュレータ (左はマイクロサポート社製) を動作させることにより行う。マイクロマニピュレータの先端には、針形状のエンドエフェクタを装着している。振動モータ (秋月電子製 FM34F) は、H8/3052F (図 3.4, Controller (3)) を介して、PC からの制御命令により動作する。

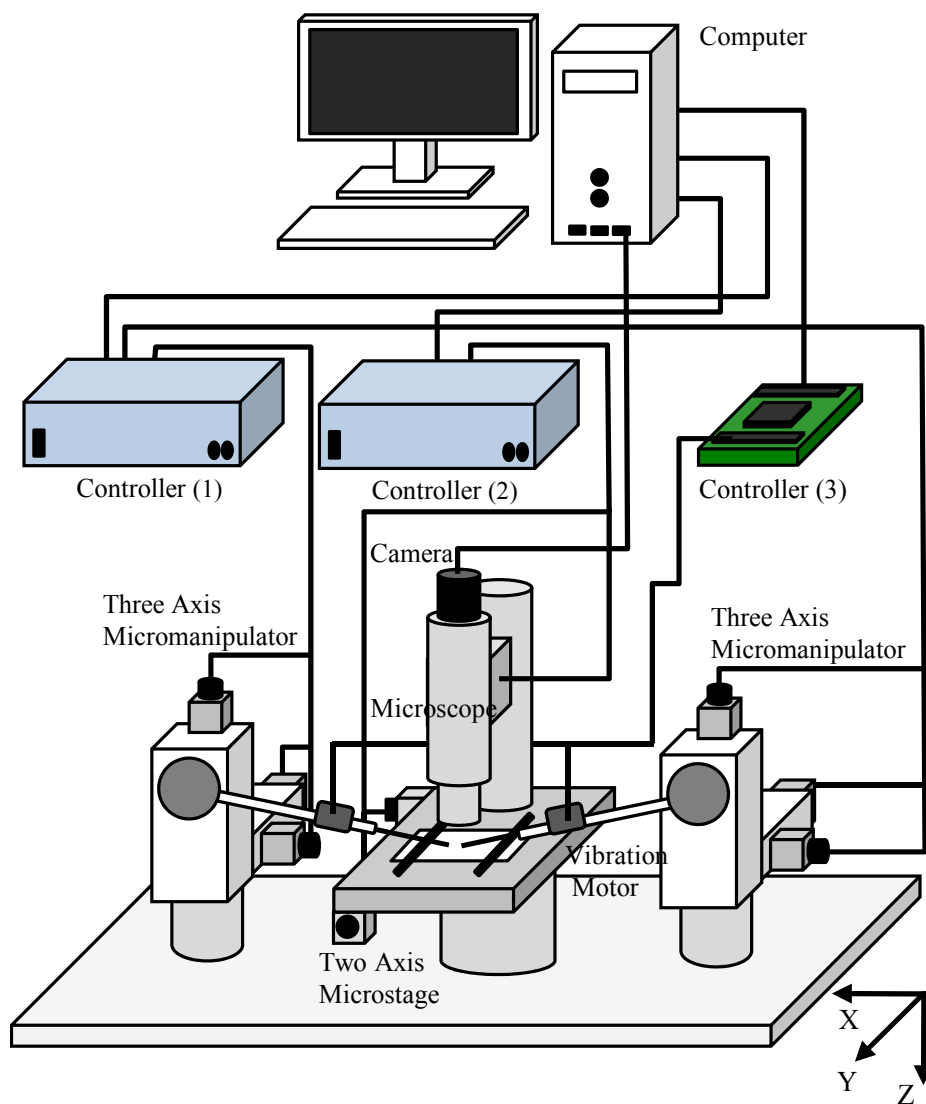


図 3.4 システム構成

表 3.2 装置の仕様

Computer	
CPU	Core2 T9600 2.8 GHz
Memory Size	4.0 GByte
OS	Windows Vista sp1
Microscope	
Magnification ratio	1400
Field of view	260 $\mu\text{m}$
Depth of field	12 $\mu\text{m}$
Input Image	
Size	800 $\times$ 600 pixel
Pixel size	0.325 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
EndEffector	
Diameter of point	5 $\mu\text{m}$
Micro Manipulator and Stage	
Resolution	1 $\mu\text{m}$
Movement speed	100 $\mu\text{m}/\text{s}$
Vibration Motor	
Standard Voltage	3.0 V
Standard Current	100 or less mA
Frequency	216 Hz
Vibration Time	1000 ms

本実験で使用した振動は、周波数 216Hz であり、振動時間は 1 秒とした。振動時のエンドエフェクタ先端の振幅は、約 30 $\mu\text{m}$  であった。

### 3.3.3 実験方法および条件

実験方法および条件を以下に示す.

- 第2章で述べた方法により, 奥行き方向の推定式を導出する  
(導出時の条件は, 第2.4.6節に記載された条件と同様とする)
- 20個の花粉に対して自動把持と解放を行い, 成功率を求める  
(解放は, 把持に成功した後に行う)
- 花粉は, 第2.4.3節で述べた胡桃を使用する
- 実験環境は, 画像内に微粒子が一個だけ存在する環境とする  
(環境認識によるエンドエフェクタの経路移動は実装していないため)
- 湿度40%の環境下において実験を行う
- 各方向の移動量の補正值  $c_x$ ,  $c_y$ ,  $c_z$  (第3.2.3節参照) は, それぞれ,  $c_x = 0\mu\text{m}$ ,  $c_y = 5\mu\text{m}$ ,  $c_z = 12.5\mu\text{m}$  とした.  $c_y$  は, エンドエフェクタの直径から設定し,  $c_z$  は約  $40\mu\text{m}$  の微粒子を想定し, 微粒子の赤道面の下側に先端径  $5\mu\text{m}$  のエンドエフェクタが差し込める大きさを設定した.

## 3.3.4 実験結果

実験結果を以下に示す。

## 奥行き方向の推定式の精度について

奥行き方向の距離の推定式導出時の  $r$  とエンドエフェクタと花粉との距離  $\Delta z(r)$  の関係を図 3.5 に示す。赤線が推定式 ( $\Delta z(r)$ ) による値であり、緑十字が実測値である。推定式  $\Delta z(r)$  は  $\Delta z(r) = 146.2r - 147.1r^2 + 75.9r^3$  が導出された。実測値と推定式による値との差は、平均で  $1.34\mu\text{m}$  であり、標準偏差は  $1.05$  であった。図 3.5 から、エンドエフェクタと花粉との距離が  $60\mu\text{m}$  程度であっても、良い精度で距離推定が行えることがわかる。

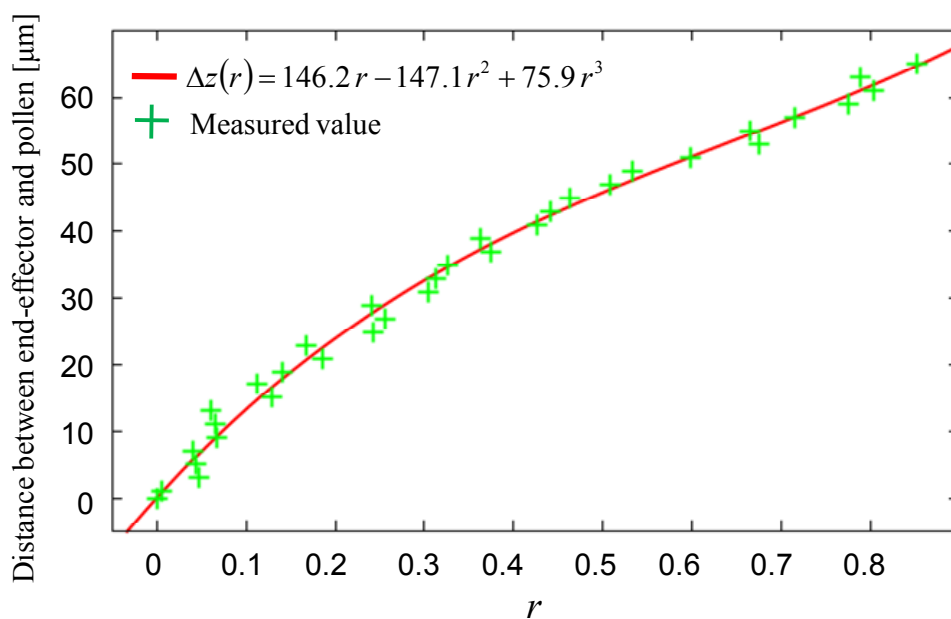


図 3.5 奥行き方向の距離推定



## 自動把持と解放について

20個の花粉に対して、自動で把持と解放を行った結果として成功率を表 3.3 に示す。把持の成功率は 90%、解放の成功率は 100%であった。解放は、把持に成功した後、実施したため、回数は 18 回であった。自動把持と解放の成功画像を図 3.6, 図 3.7, 図 3.8 に示す。それぞれ、(a)が初期状態、(b)が奥行き方向の位置合わせ後、(c)が X と Y 方向の位置合わせ後、(d)が把持後、(e)が振動による解放前、(f)が解放後、である。(c)から、エンドエフェクタ先端が花粉の下側に差し込んでいることがわかる。(f)から、微粒子がエンドエフェクタ先端の近くに開放されていることがわかる。また、把持に失敗した 2 回の画像を図 3.9, 図 3.10 に示す。

表 3.3 把持と解放の成功率

	Trial	Success	Success Rate(%)
Pickup	20	18	90
Release	18	18	100

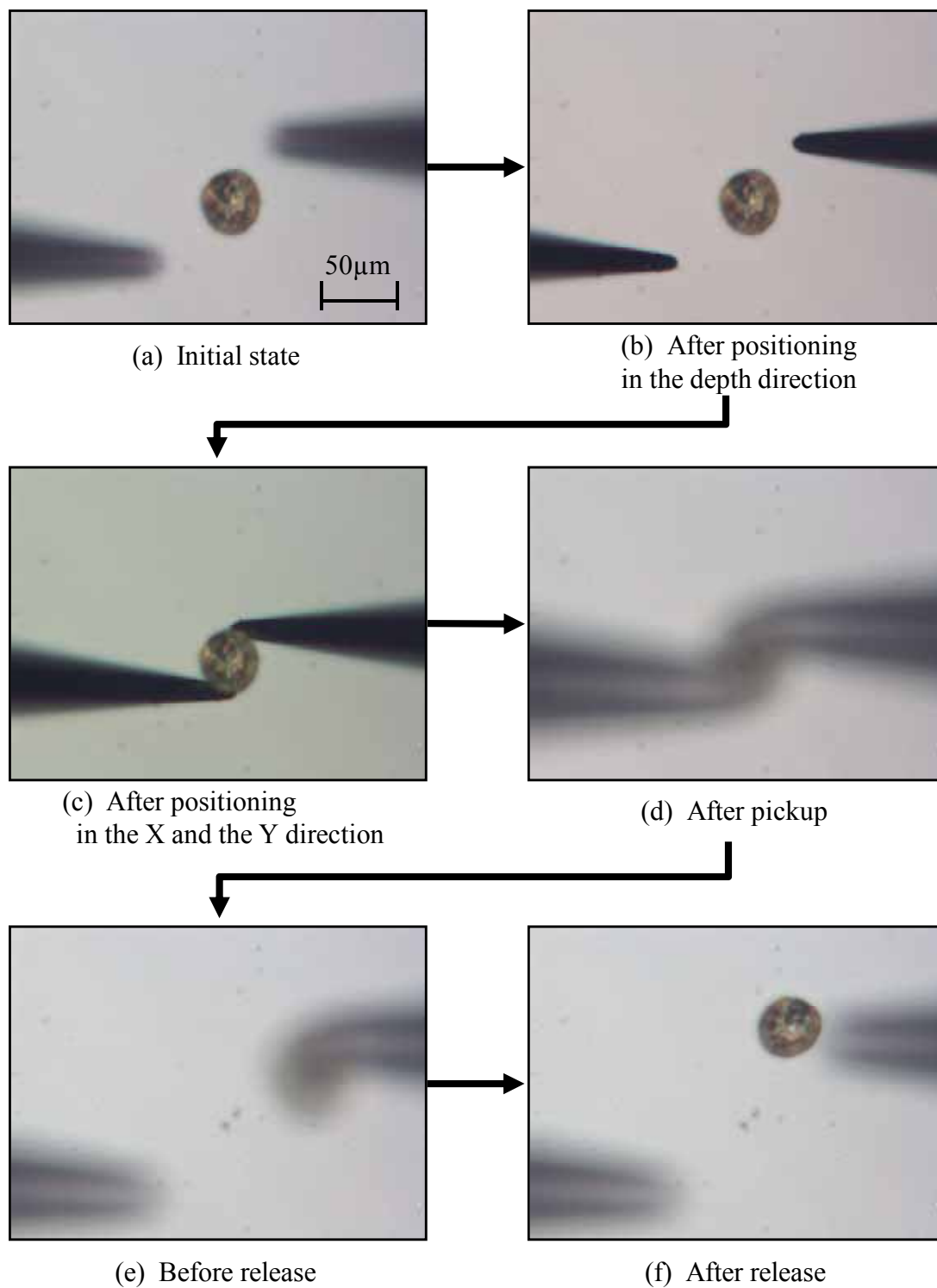


図 3.6 結果 1

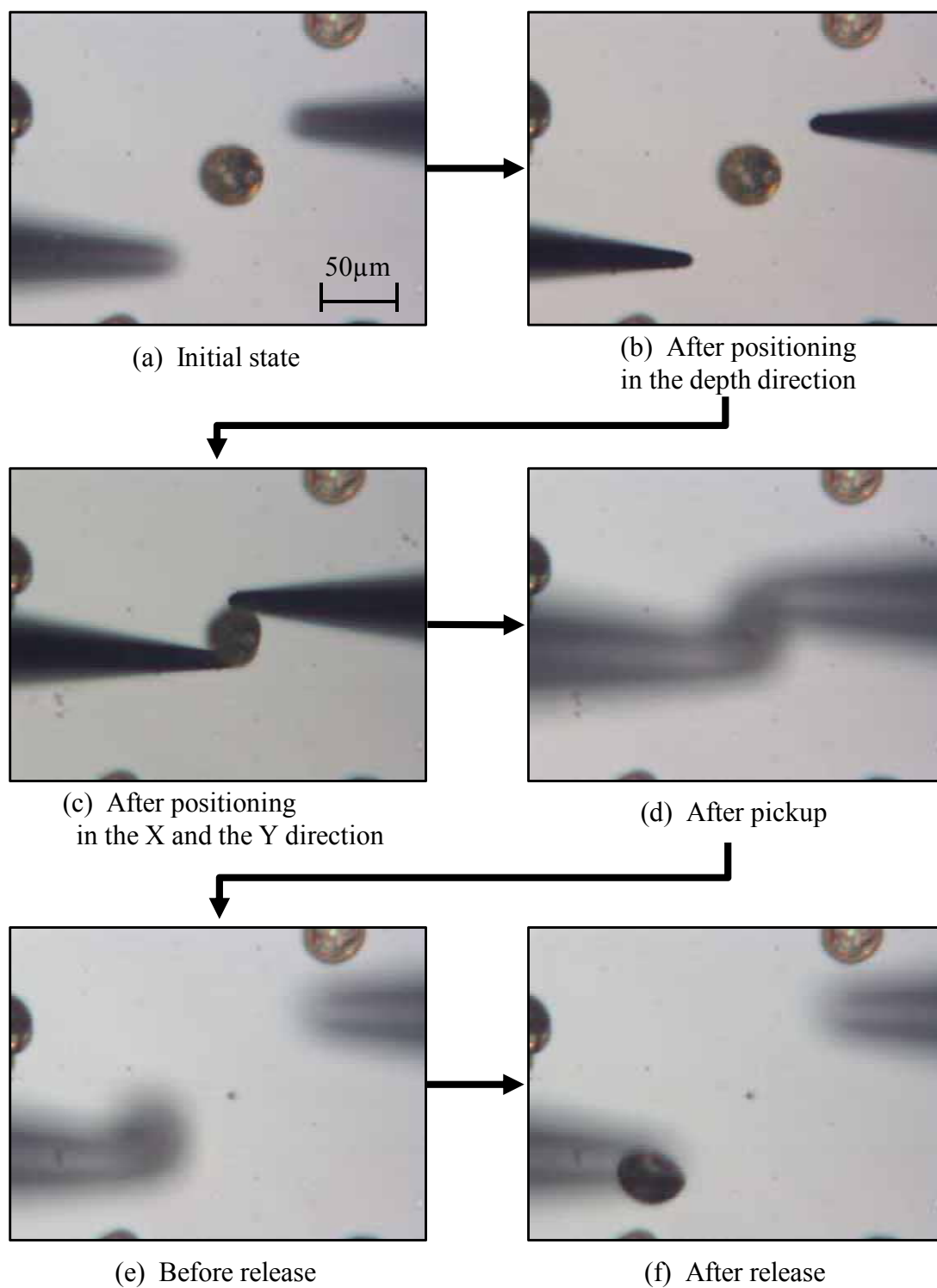


図 3.7 結果 2

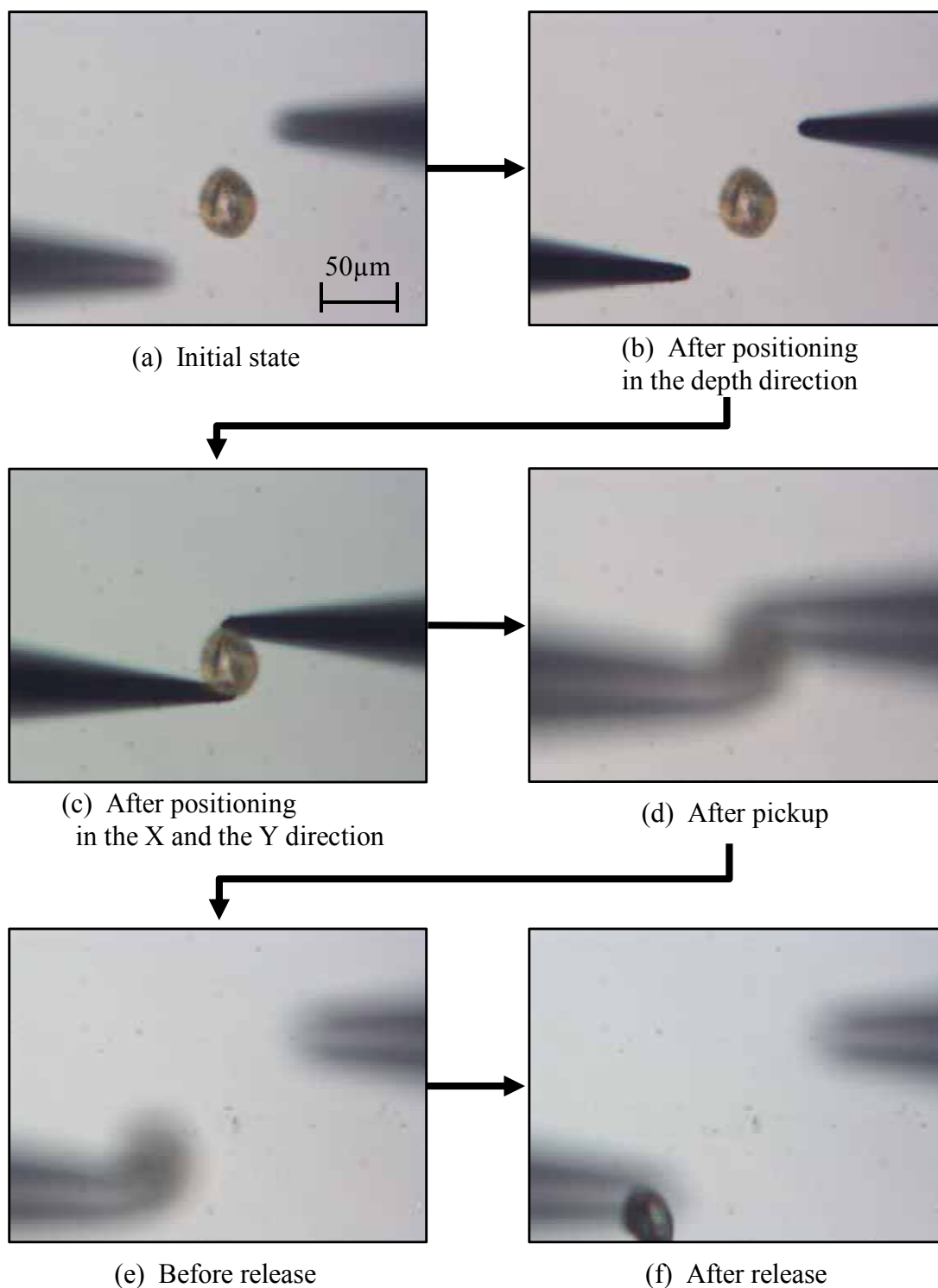


図 3.8 結果 3

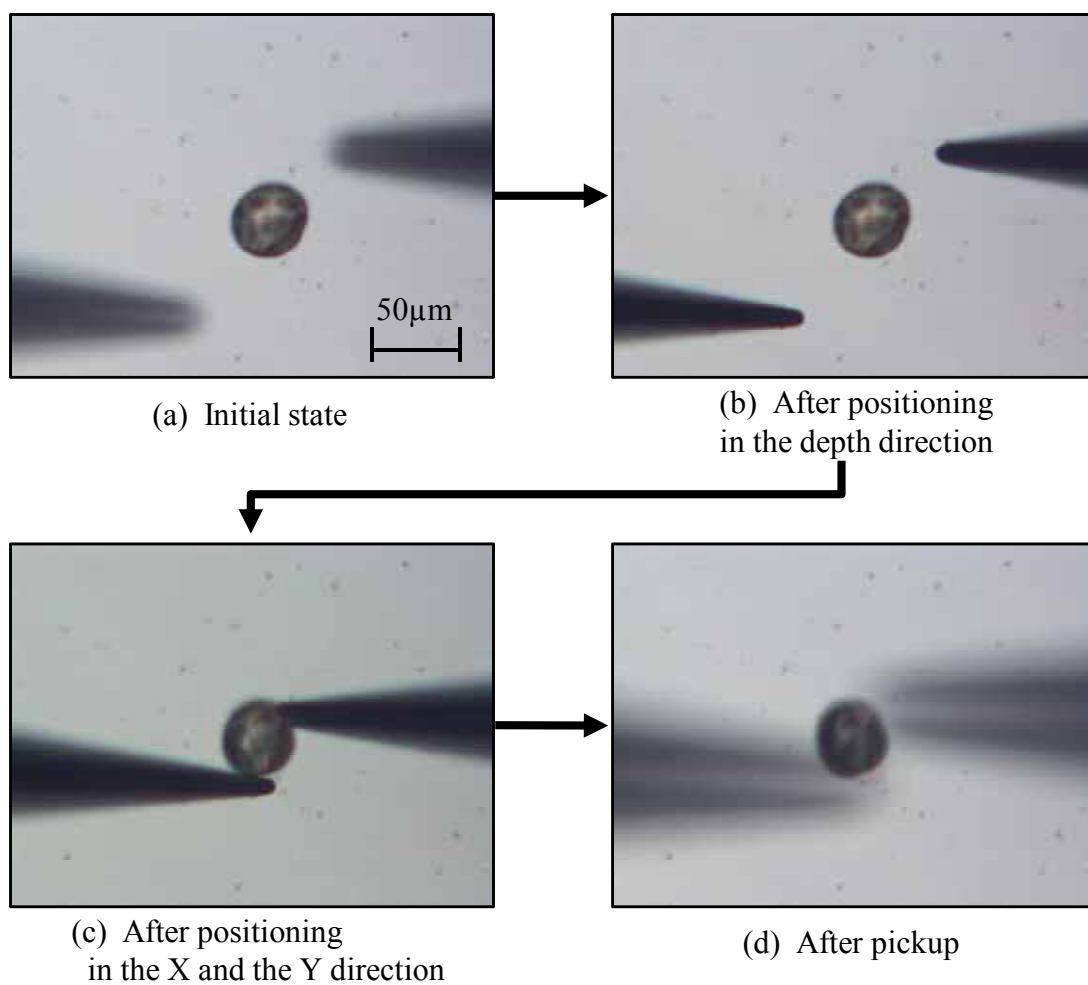


図 3.9 把持失敗 1

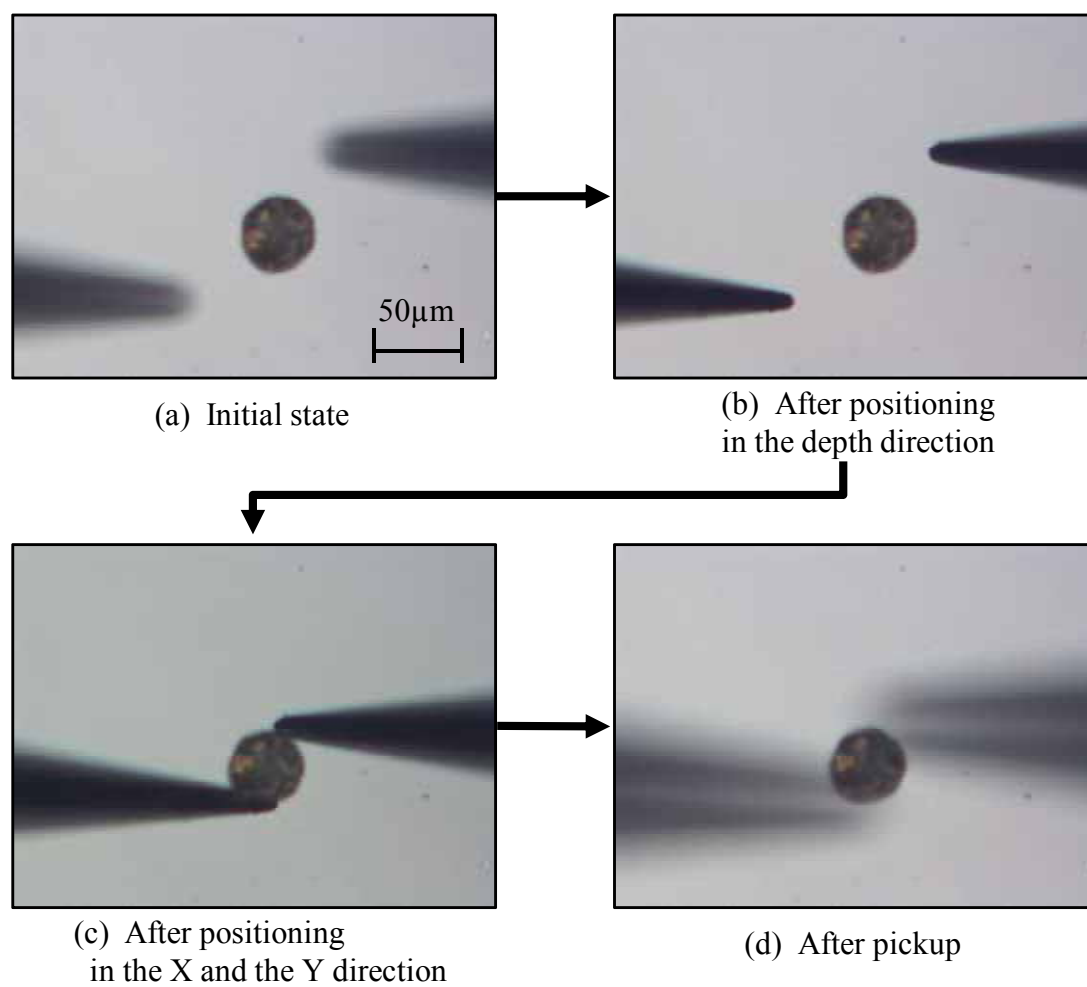


図 3.10 把持失敗 2

### 3.3.5 考察

#### 自動把持と解放の成功率

把持は、90%の成功率であり高い成功率であった。通常、二台のマイクロマニピュレータを使用し、微粒子を把持する場合、掴むような動作を行うが、本把持方法は、微粒子へ損傷を考慮して、エンドエフェクタを微粒子の下側へ入れ、すくい上げるような動作で行う。このため、すくい上げる動作中に微粒子が二本のエンドエフェクタの間から落ちてしまう危険性が伴い、掴む動作による方法よりも不安定な把持である。しかしながら、結果は高い成功率を示している。この結果の要因は、奥行き方向の距離が精度よく算出できたことである。精度が悪い場合、花粉の下側へエンドエフェクタを入れることは困難であるが、本提案方法による奥行き推定式の精度は、実測値と推定式との値の差が  $1.34\mu\text{m}$  であり精度が良い。これにより、確実に花粉の下側にエンドエフェクタを入れることができ、高い成功率となったと考える。以上のことから、高い成功率で自動把持を実現できたことから、本奥行き方向の距離推定方法は、有用であることが示せた。

また解放は、100Hz以上の振動を利用していることから期待通り、100%の成功率であった。また、実験環境の湿度40%程度であり、湿度が低いことから液架橋力が低く、この結果、凝着力が低かったことも100%の成功率の要因だと考えられる。

#### 把持の失敗について

20回中、2回把持に失敗した。この原因は、「エンドエフェクタ先端の太さが左右で異なること」と「花粉が傾いたこと」が考えられる。

花粉の直径は約  $40\mu\text{m}$  であり、花粉の下側のスペースは非常に狭く、先端径  $5\mu\text{m}$  のエンドエフェクタがやっと入る程度である。今回の実験で使用したエンドエフェクタの先端を確認すると、左右で若干大きさがことなることがわかる。画像から計測したところ、左側が約  $5\mu\text{m}$ 、右側が約  $8\mu\text{m}$  であった。左右の先端径が把持する際、微粒子のバランスが崩れやすく、二台のエンドエフェクタの間から微粒子が落ちやすくなってしまった。しかし、実験を行う際に、先端径の確認を行うことでこの問題は解決できる。

また、花粉が傾いていると、片側のスペースは広がるがもう片側のスペースは非常に狭くなる。特に、実験で使用した花粉は、形状が楕円体、半球体であるため、傾いているとスペースは狭くなりやすい。このため、エンドエフェクタが花粉下側に入らず、把持に失敗したと考えられる。対策として、花粉の外縁部全体に対して奥行き方向の距離を求め、花粉の傾きを認識することにより、傾きを修正する、または、広いスペースを認識し、エンドエフェクタを移動させることが考えられる。

## 3.4 本章のまとめ

本章では、二台のマイクロマニピュレータを使用し、自動把持と解放を実現した。実現には、高い精度の奥行き方向の距離推定が必要であり、本提案方法を用いた。自動把持と解放実験の結果、高い成功率が得られたことから、本提案方法の有用性を示せた。以下に本章のまとめを示す。

1. 本研究では、空気中に存在する微小物体を対象としていることから、花粉を対象とし、本把持および解放の方針を以下とした。
  - 微小物体へ損傷を与えないこと
  - やや歪んでいる形状の微小物体でも適用できること
2. 上記の方針に基づき、従来の手動による把持と解放の方法について考察し、以下の結論を得た。
  - 把持は、機械的方法を参考にする
  - 解放は、振動を利用する方法を採用する
3. 上記 1.および 2.に基づき、自動による把持と解放を開発した。特徴を以下にまとめる。
  - 把持は、二台のマイクロマニピュレータを使用し、すくい上げるような動作で行う。すくい上げる動作は、掴む動作と比較し、把持が不安定になることが考えられるが、花粉に対して力をほとんど加えないため、損傷させる可能性はほとんどない。
  - すくい上げる動作による把持を自動で実現するため、精度の高い奥行き方向の距離推定が必要であることから、本奥行き方向の距離推定方法を適用した。
  - 解放は、100Hz 以上の振動を用いるにより高い成功率による解放が行えるという報告がある。そこで、本研究もこれを参考にし、216Hz の振動を利用した。
  - 解放は、プレパレートから十分な距離をとることにより、花粉への損傷を防ぐことが可能である。
  - 解放は、振動を奥行き方向へ与えることにより、ほぼ真下に落とすことができる。



4. 20 個の花粉に対して、実験を行った結果、高い成功率で自動把持と解放が行えた。以下に結果をまとめる。
- 結果は、把持の成功率が 90%、解放の成功率が 100%であった。
  - 解放は、100Hz 以上の振動を利用しているため、期待通りの成果が得られた。
  - 把持に失敗する原因として、「エンドエフェクタ先端の太さが左右で異なること」と「花粉が傾いたこと」が挙げられ、これらに対する対策を検討した。
  - 把持の成功率の高さから、本提案方法により奥行き方向の距離を精度よく推定できていることがわかる。この結果は、本提案方法の有用性を示している。

## 第 4 章

# マイクロマニピュレータを用いた微小砥粒の評価への応用

本章では、マイクロマニピュレータを用いた微小砥粒の評価の自動化のため、本奥行き方向の距離推定方法を用い、一台のマイクロマニピュレータによる微小砥粒の自動把持を実現する。対象となる砥粒は、光学顕微鏡とマイクロマニピュレータを使用するため、微粉と呼ばれる平均粒径が  $67\mu\text{m}$  (#240) よりも小さい砥粒である。

まず、一般的な画像処理による砥粒の評価について述べ、次に先端が回転するマイクロマニピュレータを用いた砥粒の三次元の評価について述べる。そして、この評価を自動化するための機能の一つである自動把持について述べる。最後に本奥行き方向の距離推定を用いた自動把持実験を行い、本方法の有用性を示す。

### 4.1 マイクロマニピュレータを用いた微小砥粒評価方法

本節では、まず、一般的な砥粒の評価について述べ、次に、本研究は光学顕微鏡視野を対象としていることから、画像による評価について述べ、問題点を挙げる。問題点を解決するため、先端が回転するマイクロマニピュレータを用いた評価[52]について述べる。

#### 4.1.1 一般的な砥粒の評価

砥粒の大きさを表す指標として粒度があり、#240、#8000 のように表す。#240 の平均粒径は  $67\mu\text{m}$  であり、#8000 の平均粒径は  $1\mu\text{m}$  である。そして、#220 よりも粗い砥粒は粗粒と呼ばれ、#240 よりも細かい砥粒は微粉と呼ばれる。一般的に、粒度は加工する面粗さに影響し、良好な面粗さを得るためには、粒度の大きい砥粒を使用する。

粒度を決めるための砥粒の評価方法は、粗粒に対してはふるい分け試験法、微粉に対しては沈降法、拡大写真法が存在する[53]~[55]。ふるい分け試験法は、複数のふるいを用いて、各ふるいを通過する試料の百分率、または各ふるいにとどまる試料の質量百

分率を求め、評価する方法である。沈降法は、物体が液体中において沈降する速度に着目した方法であり、評価する砥粒の粒径を、形状・密度、沈降させる液体の粘性などから求め、評価する。拡大写真法は、光学顕微鏡を用いて、砥粒の画像を取得し、画像計測により評価を行う方法である。評価指標として、円相当径や円形度が多く使用されている。これの詳細は、第 4.1.2 節で述べる。

#### 4.1.2 画像処理による砥粒の評価

##### 画像処理による評価の概要

画像処理による砥粒の評価指標として、大きさの評価は円相当径、形状の評価は円形度が一般的である。円相当径  $H$  の算出式を式 (4.1)、円形度  $C$  の算出式を式 (4.2) に示す。 $A$  が面積、 $L$  が周囲長である。円相当径は、物体の面積と同一の面積を有する真円の直径を示した指標である。また、円形度は、物体が円るとき 1.0 であり、正方形のとき 0.79、正三角形のとき 0.60 を示し、円形に近いほど大きく（最大 1.0）、複雑になるほど小さい値となる。

$$H = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (4.1)$$

$$C = \frac{4\pi A}{L^2} \quad (4.2)$$

##### 画像処理による評価の問題点

画像による評価は二次元での評価であり、砥粒の一部のみの評価である。より正しく評価を行うためには、全体の評価、つまり三次元での評価が必要である。そこで、本研究はマイクロマニピュレータを用い、三次元での評価を行うことを提案する。

## 4.1.3 マイクロマニピュレータを用いた微小砥粒の三次元評価

画像による評価は二次元のみであり、砥粒全体の評価は行えない。そこで、全体、つまり三次元での評価を行うため、マイクロマニピュレータを使用することに着眼した。ここで使用するマイクロマニピュレータは、先端が回転する機構を有する。先端が回転する機構を有するマイクロマニピュレータは、微細加工に使用された例[19]や、微小物体のハンドリングに関する研究[20][21]として報告されており、その有用性が示されている。そこで本研究は、この先端が回転する機構を利用し、砥粒の三次元評価を行うことを考えた。

先端が回転する機構を有するマイクロマニピュレータのイメージ図を図 4.1 に示す。小型モータにエンドエフェクタを接続し、小型モータを動作させることによりエンドエフェクタを回転させる。PC で制御する場合、小型モータを H8 マイコンなどのようなコントローラを介して、PC に接続する構成となる。

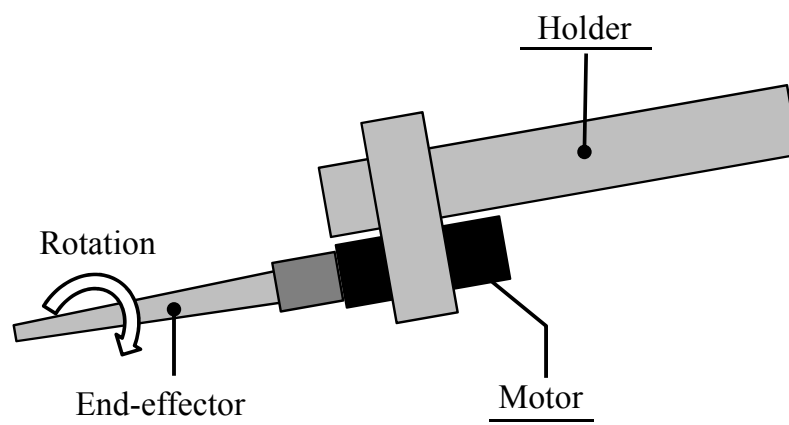


図 4.1 先端に回転機構を有するマイクロマニピュレータのイメージ

また、先端が回転する機構を有するマイクロマニピュレータを使用した砥粒の評価の概要を図 4.2 に示す。まず、砥粒を把持する。次に、画像による評価を行う。そして、モータを回転させることにより、砥粒が回転し、今まで見えていなかった砥粒の面を確認することができる。回転毎に、再度画像による評価を行い、最終的に、各回転後の評価結果から統合的に評価を行う。これにより、砥粒の三次元での評価が可能となる。

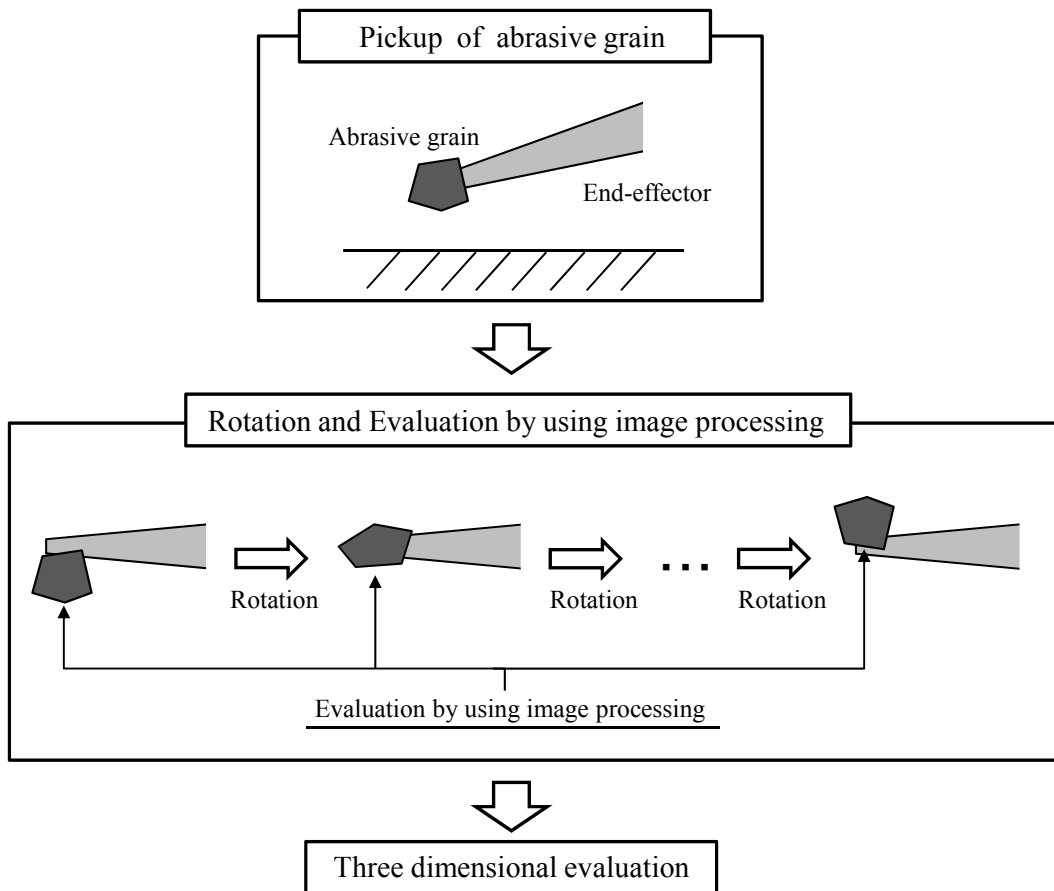


図 4.2 マイクロマニピュレータを使用した砥粒の評価の概要

実際に砥粒を把持し、先端を回転させた画像を図 4.3 に示す。(a)が回転度数 0[deg]であり、(b) , (c) , (d) , (e) がそれぞれ、45[deg], 90[deg], 135[deg], 180[deg]のときの画像である。

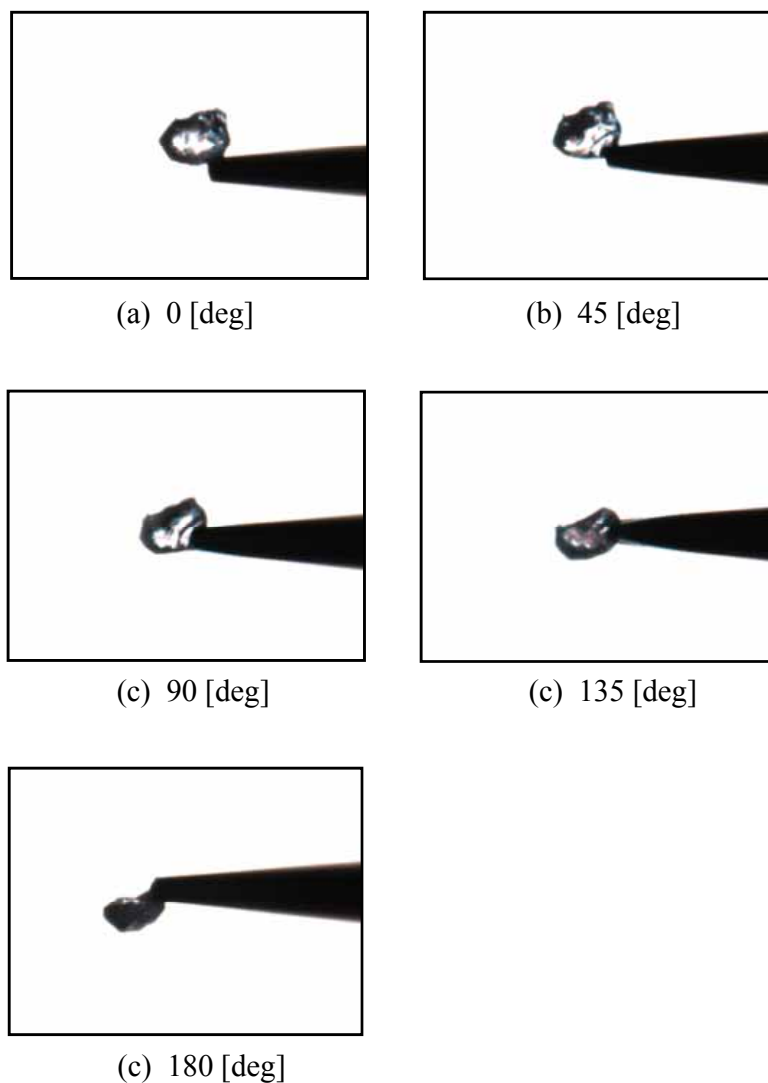


図 4.3 砥粒の回転画像

## 4.2 一台のマイクロマニピュレータによる自動把持

第3章において、二台のマイクロマニピュレータを使用し、微粒子を自動で把持する方法について述べたが、本章のように微小砥粒の評価を行う場合、一台のマイクロマニピュレータのみで把持が行えなければならない。本節では、一台のマイクロマニピュレータで把持を行う方法[56]について述べる。

### 4.2.1 把持の概要

本章では、先端が回転するマイクロマニピュレータを用いて微小砥粒の評価を行うことを目指しているが、他の対象物の評価にも使用できると考えられる。このため、把持方法は、生体にも適用できることが望ましい。そこで、本把持における方針は、第3.1.1節で挙げた方針を継承する。したがって、本把持は、機械的方法を参考とし、開発することとした。

通常、機械的方法は、二台のマイクロマニピュレータを用いて行われるが、一台で行う場合、何らかの力を利用し、把持を行わなければならない。一般的に湿度が非常に低い環境では、物体間の凝着力は静電気力が支配的であると言われている[57]。そこで、本研究では、静電気力を利用することを考えた。静電気を発生させる最も単純な方法として、摩擦による方法が挙げられる。つまり、図4.4のようにエンドエフェクタ先端と微小物体を擦り合わせる動作を行い、摩擦により静電気を発生させる。これにより凝着力を増加させ、エンドエフェクタに微小物体を付着させ、把持を行う。以降の節では、この動作を自動で行う方法について述べる。

なお、静電気を利用することから、第3.1.2節で述べた静電気力を利用した方法に分類してもよいが、機械的方法は、特殊な装置を用いず、制御を工夫することにより把持する方法の総称であるため、本方法は機械的方法に分類されると考える。

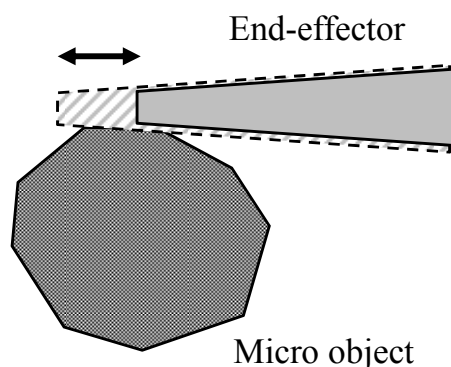


図 4.4 エンドエフェクタによる摩擦動作

## 4.2.2 自動把持の流れ

図 4.5 に自動把持の流れを示す。まず、把持する対象物を決定する。次に第 3 章で述べた本奥行き方向の距離推定方法を用いて、砥粒のボケ幅とエンドエフェクタのボケ幅の差から奥行き方向の距離を算出し、奥行き方向の位置合わせを行う。次に、画像処理により、X 方向、Y 方向の距離を算出し、位置合わせを行い、エンドエフェクタを砥粒に接触させる。このとき、斥力により、砥粒が移動してしまうことがある。そこで、エンドエフェクタと砥粒が接触しているかを評価する。そして、接触している場合、エンドエフェクタを砥粒へ擦り合わせるように摩擦動作を行い、静電気力による凝着力を増加させる。接触していない場合、再度、X 方向、Y 方向の距離を算出し、位置合わせを行う。最後に、砥粒が付着したかを評価する。付着している場合、把持は完了となるが、付着していない場合、ある程度の距離を置いてから、再度、砥粒への位置合わせを行う。接触評価、付着評価を第 4.2.3 節、第 4.2.4 節において、詳細に述べる。

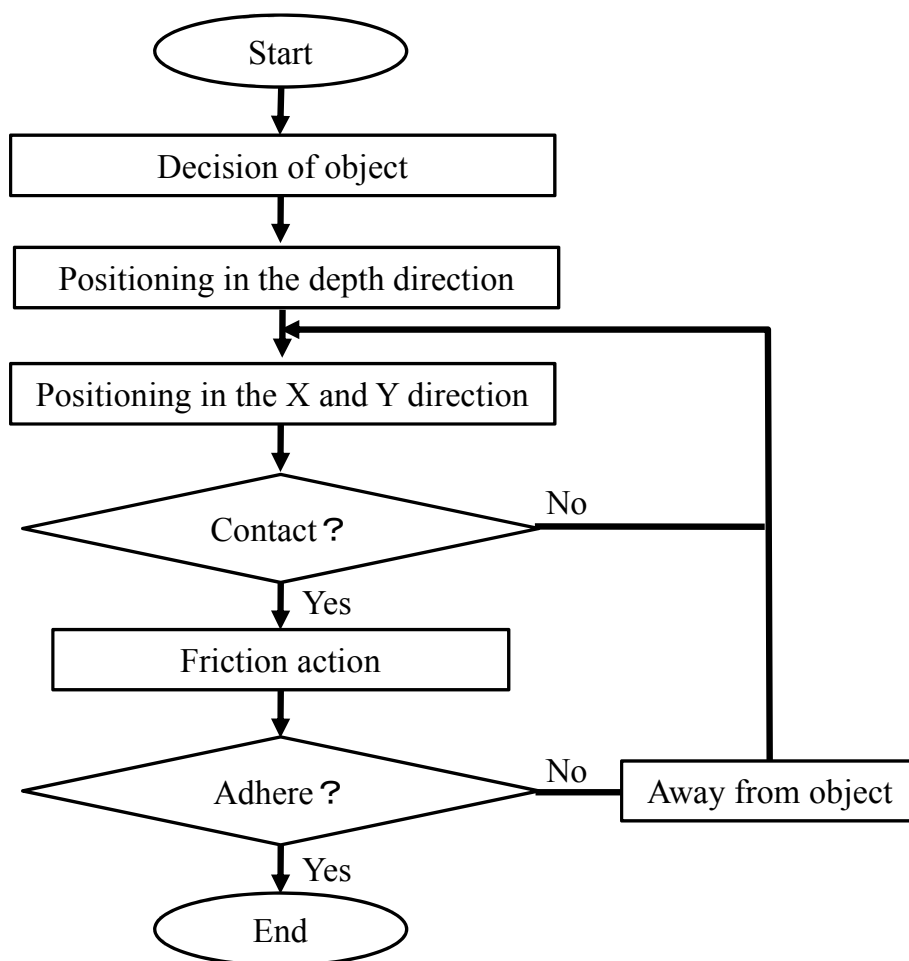


図 4.5 自動把持の流れ



### 4.2.3 接触評価

エンドエフェクタを対象物に近づけると、斥力により、対象物が移動してしまうことがある。そのため、エンドエフェクタと対象物が接触しているかを評価する機能が必要である。

図 4.6 を用いて接触評価を説明する。(a)は、エンドエフェクタが対象物に接触した状態のときの入力画像であり、(b)は二値化、ラベリング、認識処理を行った結果である。(c)は  $x$  軸を(b)の赤四角の解析領域の  $x$  軸とし、 $y$  軸を  $x=i$  での解析領域内の対象物とエンドエフェクタの画素数としたグラフである。緑線が画素数と  $x$  座標を最小二乗法により直線で表したものである。

接触評価の評価指標として、最小二乗法により直線を求めた際の、平均二乗誤差の値を利用する。エンドエフェクタと対象物が接触していない場合、平均二乗誤差の値は小さいが、図 4.6 のように対象物が接触している場合は、平均二乗誤差の値は大きくなる。平均二乗誤差の値が大きい場合、対象物とエンドエフェクタは接触できたとする。

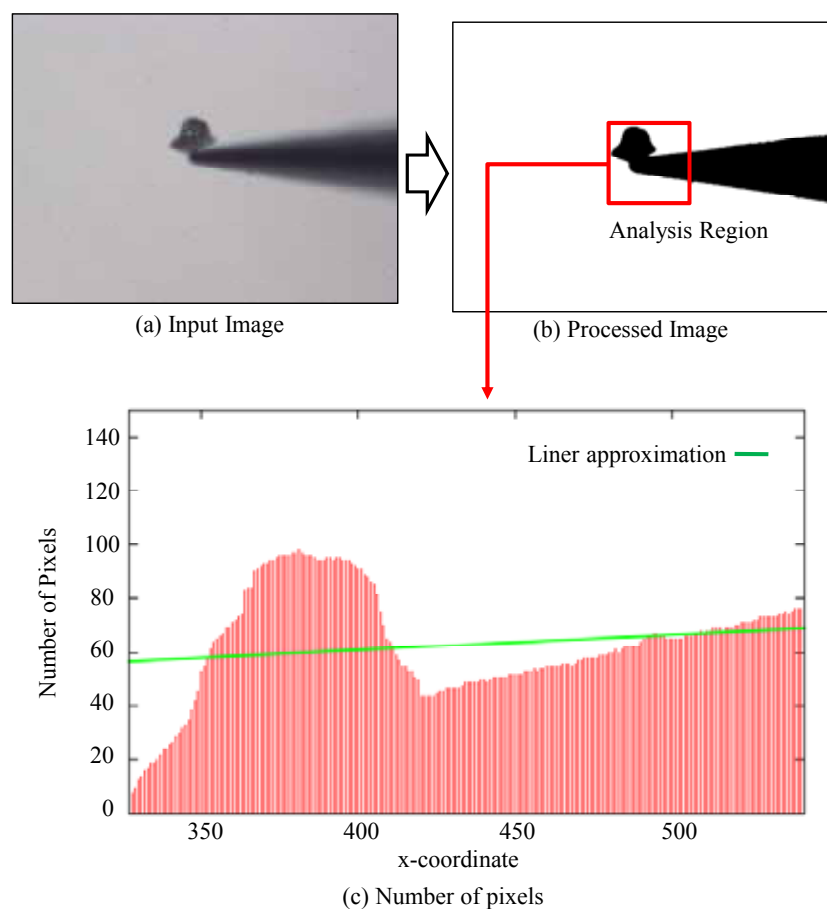


図 4.6 接触評価

#### 4.2.4 付着評価

対象物が接触していても、付着していない場合が多々、発生する。そこで、付着したかを評価する機能が必要である。

図 4.7 を用いて付着評価を説明する。(a)はエンドエフェクタと対象物を接触させたときの入力画像であり、(b)は画像(a)を二値化、ラベリングを行った画像、(c)は、エンドエフェクタから対象物の領域を分離した画像、(d)はエンドエフェクタを奥行き方向へ移動させ、対象物を把持した画像である。(e)は(c)の対象物の領域を(a)の画像にあたる部分に対して、輝度値ヒストグラムを作成したグラフであり、(f)も同様に(c)の対象物の領域を(d)の画像に適用し、輝度値ヒストグラムを作成したグラフである。

図 4.7 のように対象物がエンドエフェクタに付着している場合、奥行き方向へエンドエフェクタを移動させたとき、対象物領域の輝度値が移動前と比較し、大きく変化する。逆に、付着していない場合は、変化は少ない。このことを利用し、奥行き方向へエンドエフェクタを移動する前後の対象物領域の輝度差を付着の評価指標とする。閾値を設定し、輝度差が閾値よりも大きい場合、付着できたとする。

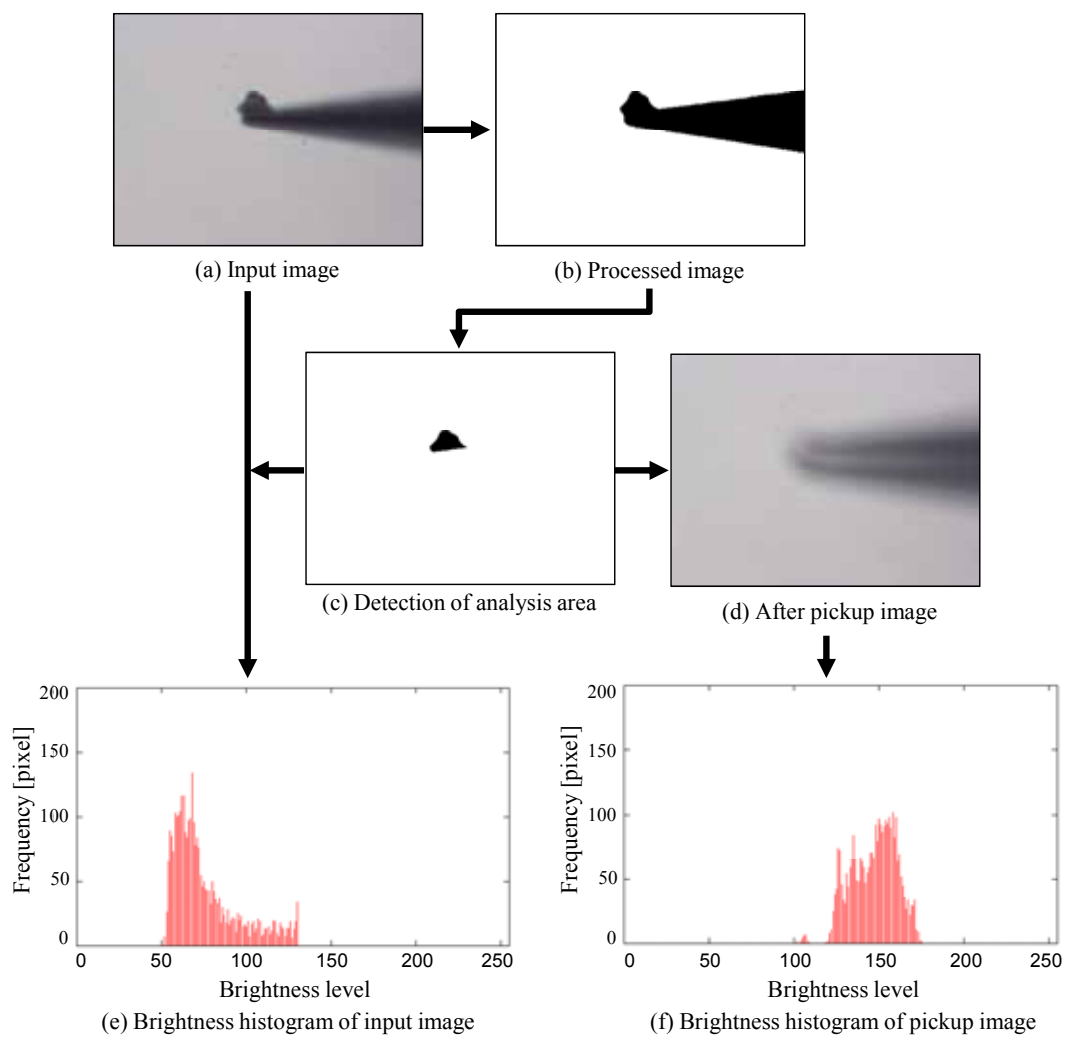


図 4.7 付着評価

## 4.3 自動把持実験

本章では、本奥行き方向の距離推定方法を適用し、一台のマイクロマニピュレータにより砥粒の自動把持実験を行う。

### 4.3.1 実験目的

実験目的を以下に示す。

- 推定式の精度を確認する。  
(砥粒に対しても本奥行き推定方法が適用できることを確認する)
- 一台のマイクロマニピュレータにより、自動把持が実現できることを確認する。

### 4.3.2 実験装置及び対象物

実験装置は、第 2.4.2 節で述べた装置を使用したため、説明は省略する。

対象物は、ホワイトアラランダム">#600 番 (平均粒径 30.0 $\mu\text{m}$ ) を使用した。この砥粒の外観図を図 4.8 に示す。

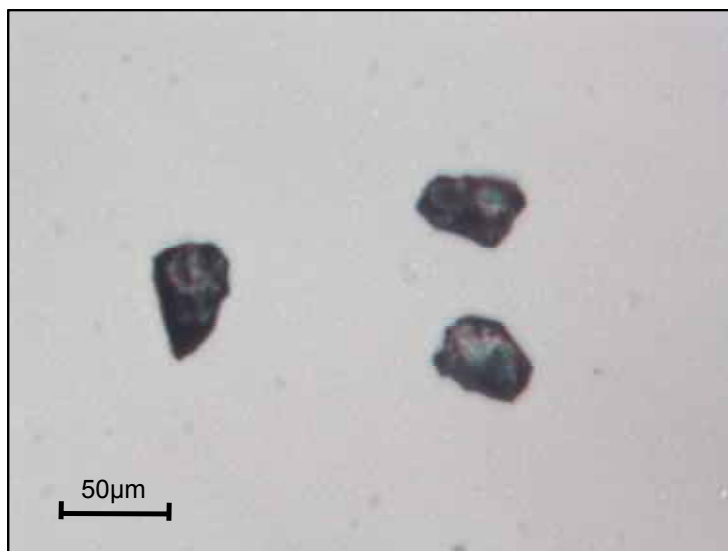


図 4.8 砥粒の外観 (#600)

### 4.3.3 実験方法と条件

実験方法と条件を以下に示す.

- 第2章で述べた方法により, 奥行き方向の推定式を導出する  
(導出時の条件は, 第2.4.6節に記載された条件と同様とする)
- 3個の砥粒に対して自動把持を行う
- 実験環境は, 画像内に砥粒が一個だけ存在する環境とする  
(環境認識によるエンドエフェクタの経路移動は実装していないため)

### 4.3.4 実験結果

三個の砥粒の自動把持の結果, 三個全てにおいて成功した. なお, 把持に要した時間は, それぞれ, 1分3秒, 15秒, 1分45秒であった. 時間が異なるのは, 一度の摩擦動作では, 付着力が足りず, 把持できなかつたため, 図4.5の位置合わせと摩擦動作を繰り返したためである. 繰り返した回数は, 1回目が3回, 2回目が1回, 3回目が6回であった. また, 砥粒の大きさは, (長径, 短径)とすると, 一個目が(26.7, 25), 二個目が(39.3, 33.2), 三個目が(41.3, 32.2)であった. 単位は $\mu\text{m}$ である.

奥行き方向の距離の推定式導出時の $r$ とエンドエフェクタと砥粒との距離 $\Delta z(r)$ の関係を図4.9に示す. 赤線が推定式( $\Delta z(r)$ )による値であり, 緑十字が実測値である. 距離の推定式 $\Delta z(r)$ は $\Delta z(r) = 191.1 r - 263.28 r^2 + 149.12 r^3$ が導出された. 実測値と推定式による値との差は, 平均で $1.49\mu\text{m}$ であり, 標準偏差は1.4であった. 図4.9から, エンドエフェクタと花粉のとの距離が $60\mu\text{m}$ 程度であっても, 良い精度で距離推定が行えることがわかる.

自動把持を行った一個目の砥粒の各動作の画像を図4.10, 図4.11, 図4.12, 二個目の初期状態と把持後の画像を図4.13, 三個目の初期状態と把持後の画像を図4.14に示す. 図4.10の(a)が初期状態, (b)が奥行き方向の位置合わせ後, (c)が1回目のXとY方向の位置合わせ後, (d)が1回目の摩擦動作の様子, (e)が把持成功確認の様子である. そして, 図4.10の(f)が2回目の把持動作を行うための位置へ移動した後, (g)が2回目のXとY方向の位置合わせ後, (h)が2回目の摩擦動作の様子, (i)が2回目の把持成功確認の様子である. そして, 図4.12の(j)が3回目の把持動作を行うための位置へ移動した後, (k)が3回目のXとY方向の位置合わせ後, (l)が3回目の摩擦動作の様子, (m)が把持成功の様子である. 奥行き方向の位置合わせ後の画像である図4.10の(c), 摩擦動作の様子の画像である図4.10の(d), 図4.11の(h), 図4.12の(l)から, 砥粒へ位置合わせが行えていることがわかり, 本奥行き方向の距離推定方法により, 良い

精度で奥行き方向の距離が算出できていることがわかる。

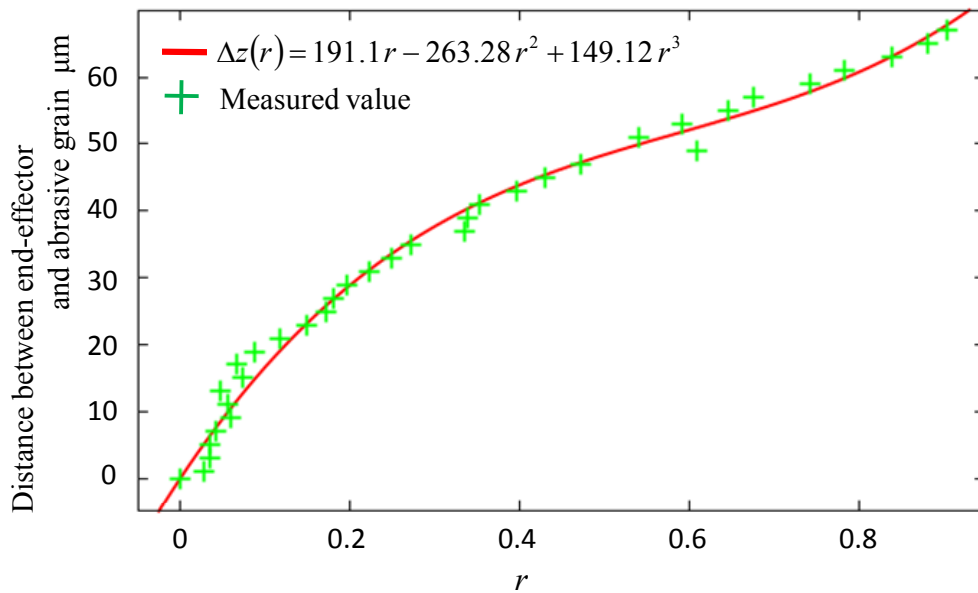


図 4.9 奥行き方向の距離推定

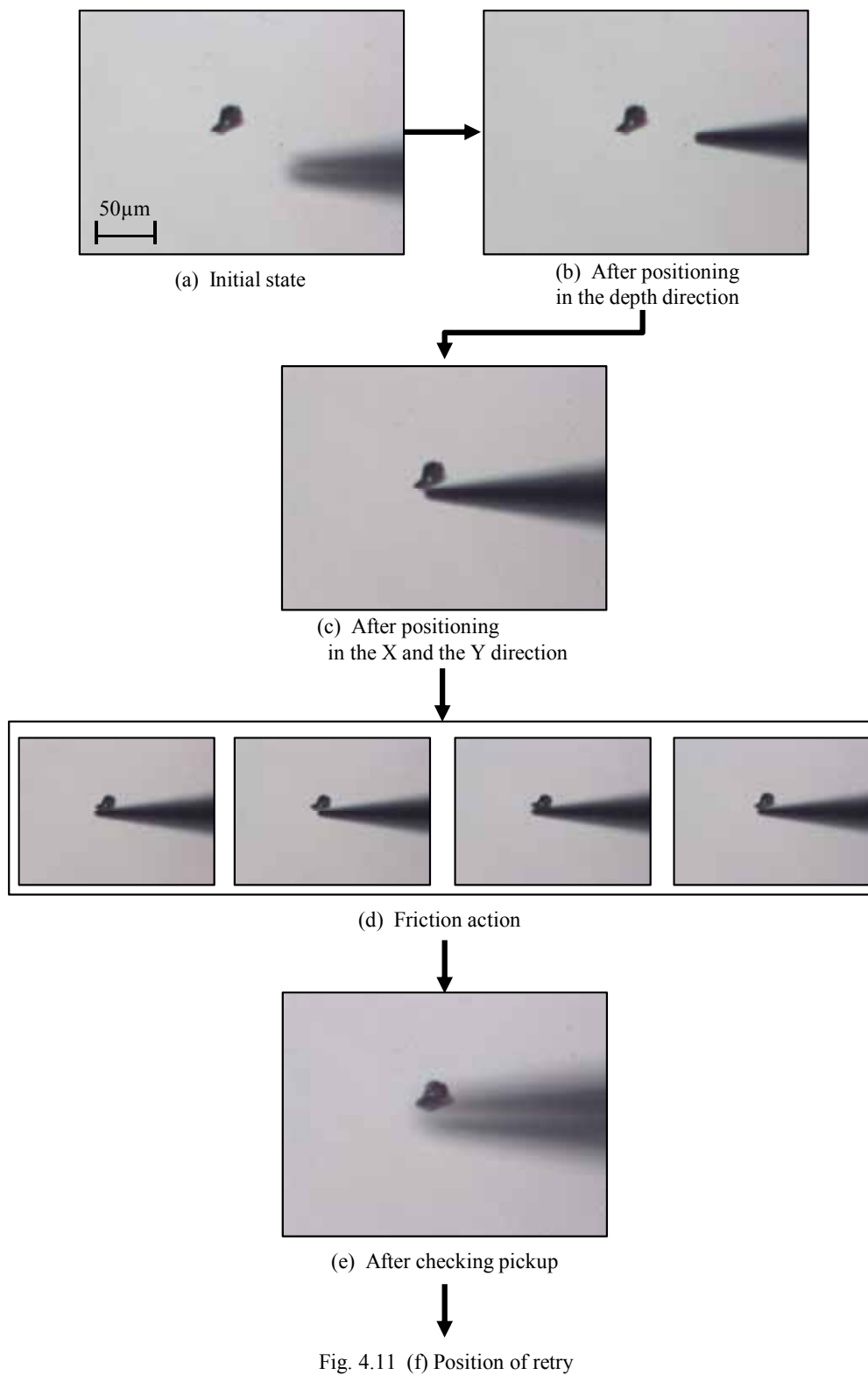


図 4.10 砥粒 1 の自動把持の結果画像(1)

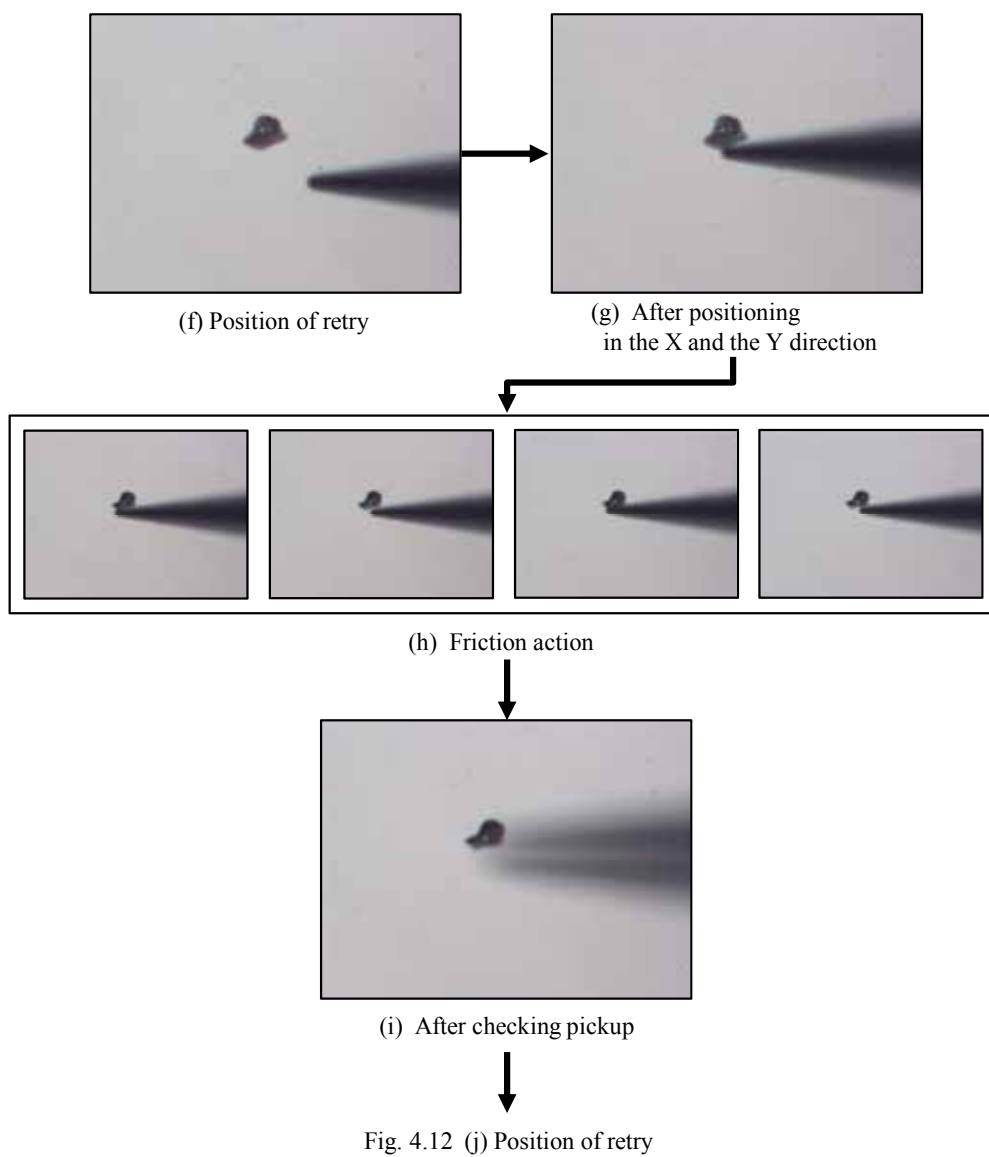


図 4.11 砥粒 1 の自動把持の結果画像(2)



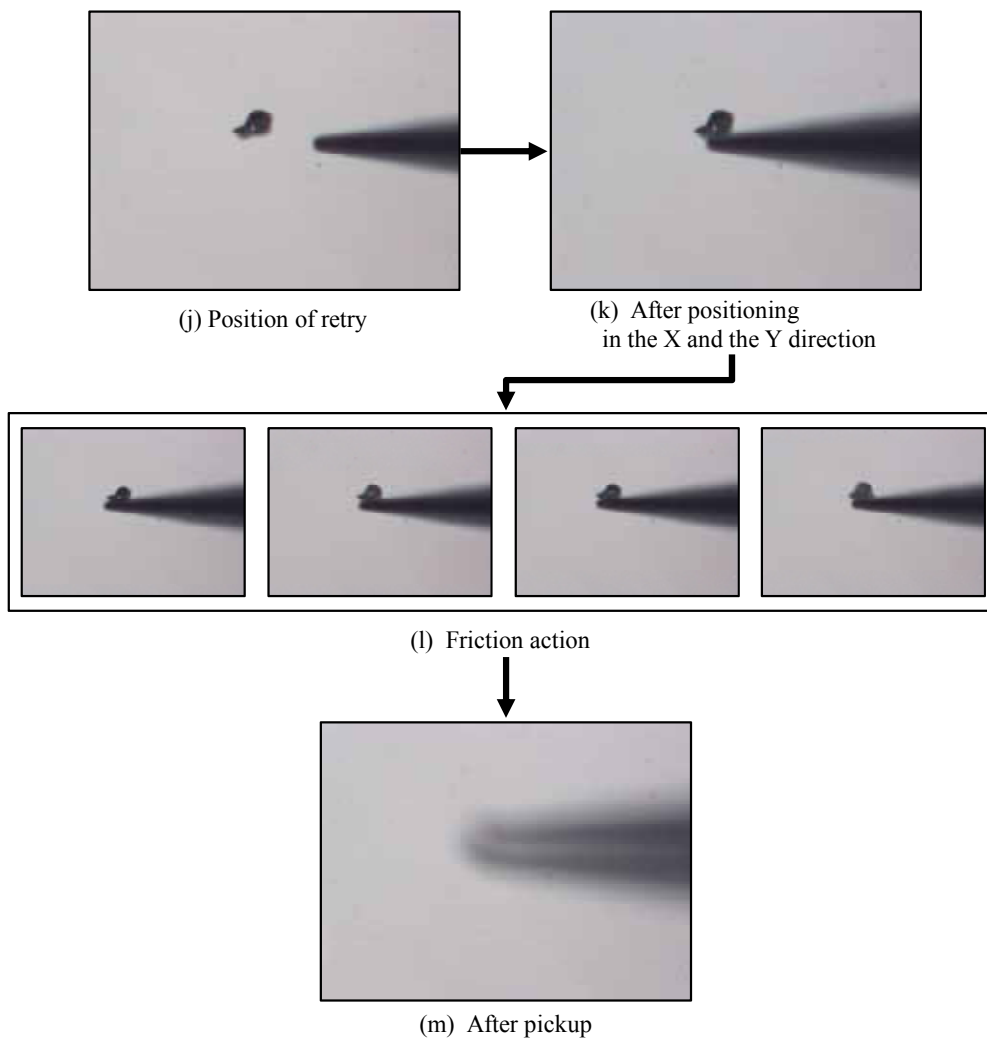


図 4.12 砥粒 1 の自動把持の結果画像(3)

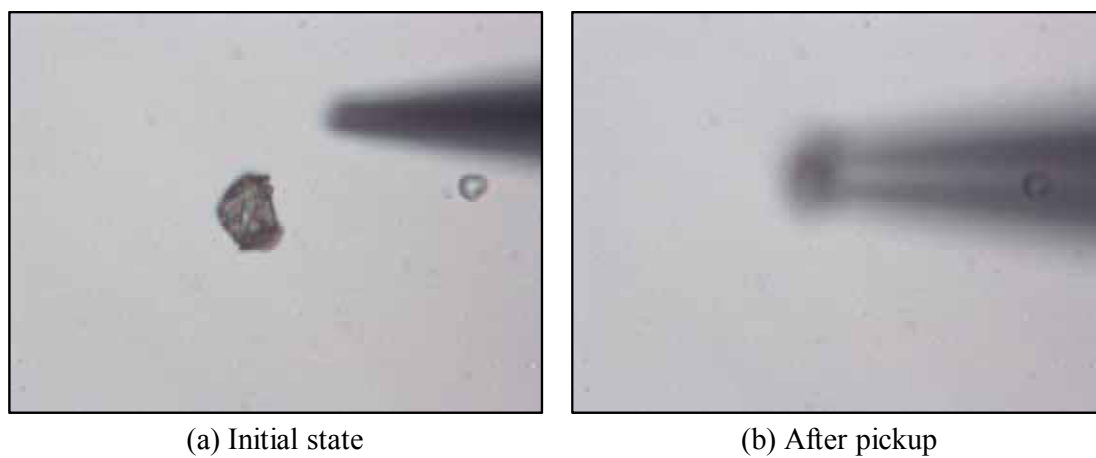


図 4.13 砥粒 2 の自動把持の結果画像

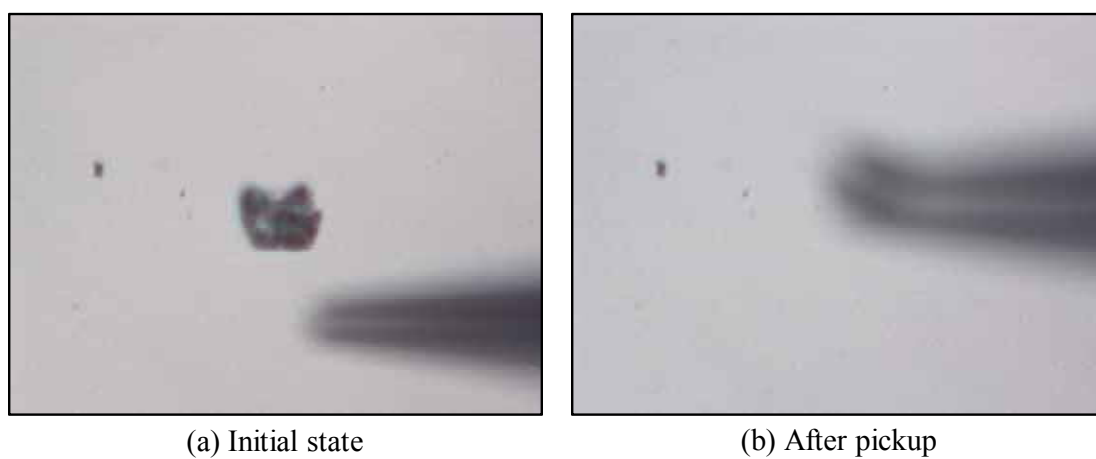


図 4.14 砥粒 3 の自動把持の結果画像

#### 4.3.5 考察

奥行き方向の推定式は、実測値と推定式による値との差の平均で  $1.49\mu\text{m}$ 、標準偏差は 1.4 であり、第 2 章、第 3 章の実験結果とほぼ同様であり、平均粒径  $30\mu\text{m}$  の砥粒に対しても精度が良いことが示せた。

自動把持に関しては、三個の砥粒に対して、全て成功していることから、第 3.2 節で述べた方法が良く機能したといえる。本章の把持方法は、把持できるまで、位置合わせと摩擦動作を繰り返す方法であり、三個の砥粒に対して、それぞれ繰り返した回数は、一個目が 3 回、二個目が 1 回、三個目が 6 回であった。このことから、接触確認と把持確認の機能が適切に動作していることがわかる。

しかしながら、把持するまでに時間を要する場合があります。これが問題である。砥粒を把持し、エンドエフェクタを回転させ、評価を行うことを考慮すると、さらに時間を要する。このため、生産性は低く、一般用途には向かない。しかし、研究用途として大きさや形状が揃っている砥粒が必要とされる可能性はあると考える。

エンドエフェクタと砥粒の奥行き方向の距離を精度良く推定でき、位置合わせが行えたことから、マイクロマニピュレータを使用した砥粒の評価にも本奥行き方向の距離推定方法が適用できることを示した。

## 4.4 本章のまとめ

本章では、微粉と呼ばれる大きさの砥粒を、先端が回転するマイクロマニピュレータを用いて評価する方法を述べた。そして、これを自動化するために、まず砥粒の把持を自動で行うこととした。自動把持を本奥行き方向の距離推定方法を適用し、一台のマイクロマニピュレータを用いて実現させた。以下に本章をまとめる。

1. 光学顕微鏡を用いた微小砥粒の評価は、二次元での評価であり、砥粒の一部のみの評価である。より正しく評価を行うためには、全体の評価、つまり三次元での評価が必要である。そこで、本研究は先端が回転するマイクロマニピュレータを用い、三次元での評価を行うことを提案した。
2. 評価を自動で行うために、まず、最初に行う動作である把持を自動で行うことを考えた。本把持は、一台のマイクロマニピュレータを用いて、摩擦動作により凝着力を増加させ、エンドエフェクタに微粒子を付着させる方法である。
3. 実験により、一台のマイクロマニピュレータによる自動把持実験により、以下のことを確認した。
  - 一台のマイクロマニピュレータにより自動把持が実現できることを確認した。
  - 本奥行き方向の距離推定方法が砥粒にも適用できることを確認した。

## 第 5 章

# 画像計測による微小傷の検出

本章では、マイクロマニピュレータのような装置を用いない微細作業として、工業製品の微小傷検査を挙げ、この作業を自動化するための傷検出方法を提案する。対象物として、円筒形状製品を挙げ、大きさが数十  $\mu\text{m}$  以上の微小傷を、画像を利用することにより、検出する方法について述べる。そして、実際の運用環境における実験を行い、その結果を示し、考察を行い、本微小傷の検出方法の有用性を示す[58]。

### 5.1 円筒形状製品における傷検査の要求仕様

自動車や工作機械などの大型工業製品では、小さな部品の欠陥が人命に関わる重大な事故を引き起こすこともあり、製品の全数検査が必須になってきている。本研究では、このような部品を重要保全部品と呼ぶ。従来、製品の傷検査は、目視により実施されてきた。しかし、目視による検査は、作業の正確性を持続させることが困難、作業員への負担が大きい、という問題点がある。特に小型の重要保全部品の微小傷検査は、光学顕微鏡やズームレンズを装着したカメラからの画像を目視し続けるため、この問題が顕著である。そこで本研究では、小型の重要保全部品の 1 つである円筒形状製品を対象とした。このような製品の微小傷の検出方法は、実用性を求められるため、具体的な対象物とその傷検査における要求仕様から、提案・開発が行われる。そこで、まず、第 5.1.1 節において、検査対象である円筒形状製品の具体例を述べ、そして、第 5.1.2 節において、傷検査における要求仕様を述べる。なお、本研究は光工業株式会社との共同研究であり、対象とする円筒形状製品は光工業株式会社の生産品である。共同研究の目標は、検傷装置の開発である。

### 5.1.1 検査対象物の具体例

検査対象物である円筒形状部品の具体例として、図 5.1 のようなカップ状の部品を挙げる。この部品は、内側のストレート部と底部が検査対象であり、ストレート部は鏡面加工されている。以降、この部品を鏡面カップと呼ぶ。円中軸を基準として軸対象な形状をしているため、検査用の画像を取得する場合、円中軸を基準に一定角度を回転させる。また、ストレート部と底部の表面性状が異なることと、製品としての問題はないものの、材料のロットにより表面性状が変わり、検査画像に影響を与えるため、傷検出の閾値調整が不可欠となる。

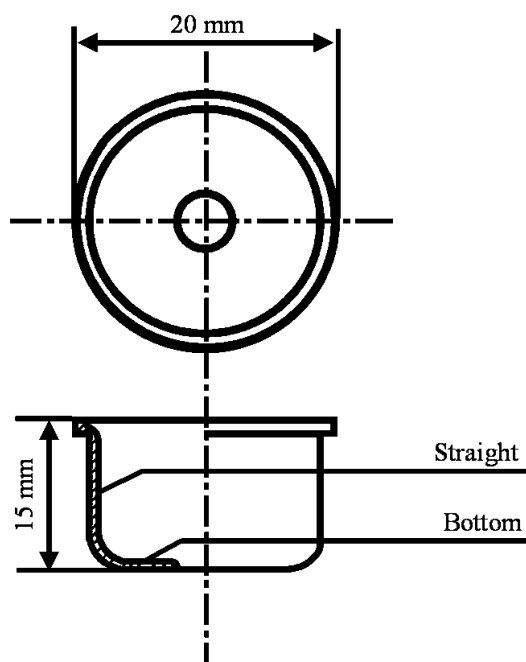


図 5.1 鏡面カップ

### 5.1.2 要求仕様

円筒形状製品に対する傷検査の要求仕様を次に示す。

#### 1. 不良品を良品と判定しないこと：

検査対象は、重要保全部品であることから、1つでも不良品を良品と判定してはならない。

#### 2. メンテナンス性が高い：

検査装置の問題が発生した場合、原因究明、対応を早急に行わなければならない。原因の多くが検査対象の位置ずれや位置ずれによる詰りが挙げられ、検査の様子が作業者に見えるような装置であれば、原因究明、対応は容易に行える。したがって、検査の様子が作業者に見えるような装置であることがメンテナンス上、望ましい。このため、照明の輝度が僅かだが変化することが予測できる。また、対象としている円筒形状部品は、各部位により表面性状が異なっていることが多く、傷検出の閾値を特定な領域毎に設定できる必要がある。さらに、製品によっては、日々の材料のロットの違いにより表面性状が変化し、これが検査結果に影響を及ぼすことがある。このため、日々の傷検出閾値の微調整が不可欠になる。このため、閾値調整のようなメンテナンス作業は、ある程度の知識がある作業者であれば、だれでも行えなければならない。

#### 3. 検査速度が早いこと：

円筒形状部品の表面全てを検査するためには、所定の軸において、一定の角度毎に検査を行わなければならない。1つの製品に対して、複数回の検査を実行することになり、これを数千にもおよぶ製品に対して行うため、検査装置に処理速度は可能な限り早くしなければならない。具体的な目標として、目視検査による検査時間と同等とすることが挙げられる。第5.1.1節で述べた鏡面カップの目視検査による速度は約3秒であることから、提案する傷検査による検査時間は、3秒程度でなければならない。

#### 4. 導入コストが低いこと：

検査装置は、企業において運用されるため、導入コストは可能な限り低くしなければならない。

本研究は、上記の要求仕様を満たす傷検出方法を提案する。

## 5.2 画像処理による傷検査

本節では、まず、第 5.2.1 節において、画像処理による方法以外の傷検査方法について簡単に説明し、画像処理による方法の利点を述べる。次に第 5.2.2 節において、実用化されている画像処理による製品検査方法について述べる。そして、最後にこれらの方法を第 5.1.2 節で述べた要求仕様の観点から比較することにより、提案する傷検査方法の方針を検討する。

### 5.2.1 画像処理による傷検査の利点

傷検査の方法として、画像処理を用いた方法の他に、以下の方法が用いられる[32][33].

- 浸透探傷法： 液体を傷に浸透させることにより、傷を発見しやすくする方法
- 磁粉探傷法： 対象物を磁化させることにより、傷に磁粉が付着することを利用した方法
- 過流探傷法： 対象物に交流磁場を発生させ、その交流磁場による過電流の変化により欠陥検出を行う方法
- レーザー回折光による探傷法： レーザー光を対象物表面に当てたときに、傷がない部分は、直接反射光が発生し、傷がある部分では回折光が発生することから、直接反射光と回折光の変化を調べることで傷の有無を判定する方法

上記の方法は、いずれも検査のための処理や設備が必要であること、検査に要する時間が長くなることから、要求仕様「導入コストが低いこと」、「検査速度が早いこと」の観点において、画像処理による方法の方が優れている。



### 5.2.2 従来方法

実用化されている画像処理による製品検査方法では、製品の「傷」、「割れ」、「しわ」、「ゴミ」、「汚れ」といった不連続部を「異物」としてみなし、画像中の異物を認識・分析する「物体認識方法」を適用することにより、製品検査を実現している。そこで、本節では、画像処理による物体認識方法を述べ、さらにこれらの方法が製品検査に適用された事例について述べる。

画像処理による傷検査方法として、「背景差分法」、「周波数解析を用いた方法」、「機械学習を用いた方法」が挙げられる。本節では、それぞれの概要および製品検査に適用された事例について述べる。

#### 背景差分法

背景差分法は最も基本的な物体認識方法である。背景画像を事前に撮影し、この背景画像と入力画像の各画素間において輝度値の差分を計算し、輝度変化を観察する。この輝度変化に閾値を設けることで、入力画像上に生じた一定以上の輝度変化を物体の移動によるものとみなし、物体領域として抽出する（図 5.2）[33][59][60]。

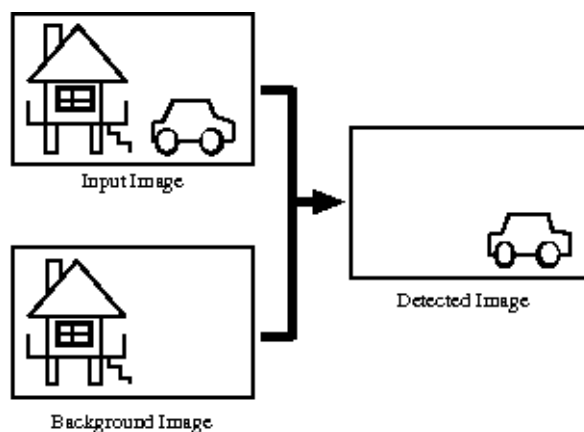


図 5.2 背景差分法のコンセプト

図 5.3 に背景差分法によるプリントパターン上の欠陥検査システムの事例を挙げる。通常、背景差分法では背景画像を更新しないため、撮影機器の位置が変動すると背景画像と現在の入力画像にズレが生じ、前景を正常に抽出できなくなる。これに対応するため、この事例ではテンプレートマッチングを適用し、微小位置ズレを修正する処理を行っている[60]。

また、背景差分法では照明変化などの原因により、画面全体の明るさが著しく変化する場合も正常に検査が行われないが、この事例では検査面を暗室化し、照明環境を一定とすることで対応している。

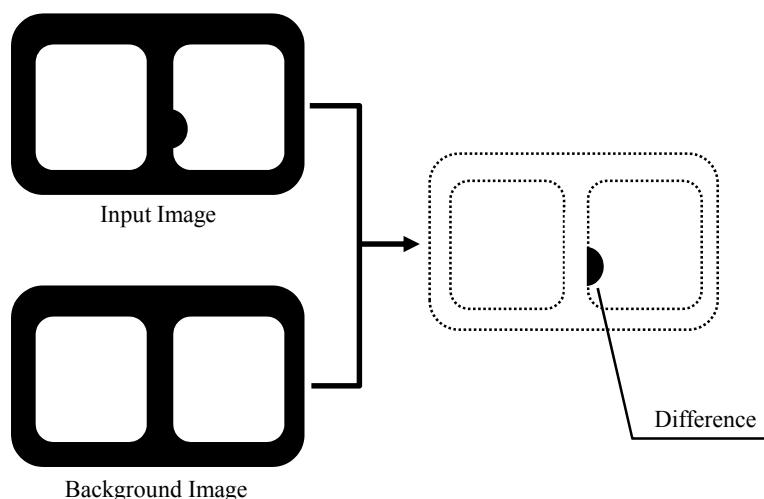


図 5.3 プリントパターン上の欠陥検出

## 周波数解析を用いた方法

図 5.4 に周波数解析の概念図を示す。横軸に時間、縦軸に観測量をとった信号を時間領域の信号と呼ぶ。横軸に周波数、縦軸に観測量をとった信号を周波数領域の信号と呼ぶ。入力信号として時間領域に存在する任意の信号が与えられたとき、この入力信号を周波数の異なる複数の基本信号の合成によるものととらえ、入力信号を各周波数ごとの部分信号に分解してこの強度を分析する手法を一般に周波数解析と呼ぶ。周波数解析を行うためには時間領域のデータである入力信号を分解し、周波数領域に変換する必要がある。この代表的な変換手法としてフーリエ変換やウェーブレット変換が挙げられる。

フーリエ変換とこれを高速化した高速フーリエ変換（FFT）は周波数解析でもっとも広く用いられる変換手法であり、基本信号として正弦波・余弦波を用いる。これに対してウェーブレット変換では基準となる信号にウェーブレットと呼ばれる信号を用いる。フーリエ変換は変換過程において時間的な情報が失われてしまう問題を持っている。このため、時間領域のある時間におけるデータが周波数空間でどの位置に影響を与えているか特定することが難しい。この問題に対する対策として、フーリエ変換を行う範囲を限定した短時間フーリエ変換やウェーブレット変換が用いられる。

また、二次元画像などの離散データに適用される離散フーリエ変換はフーリエ変換とは異なり、分解する周波数帯域が限定されている。このため、極端な高周波成分や低周波成分はうまく検出できない場合がある。

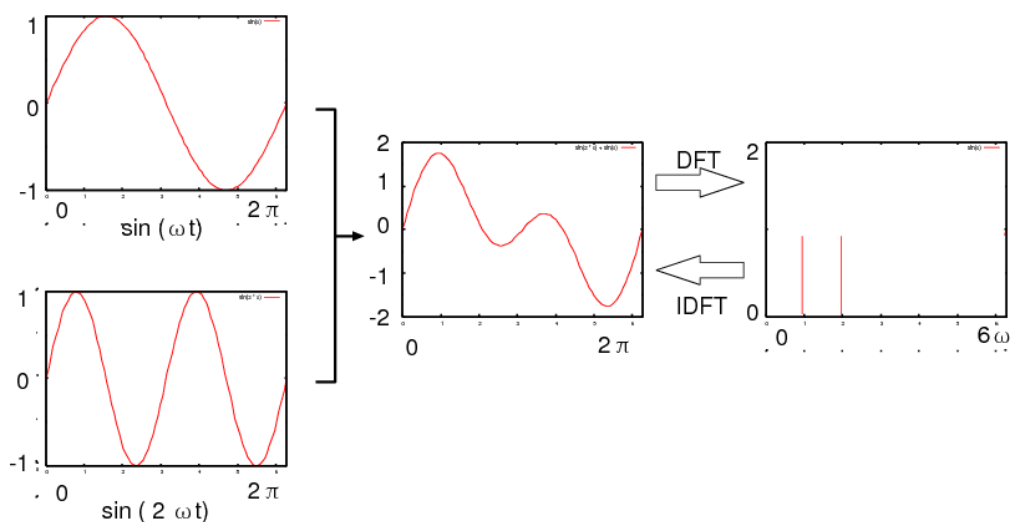


図 5.4 周波数解析のコンセプト

検査面に存在する明度変化を入力信号としてとらえて、フーリエ変換、ウェーブレット変換などの信号解析手法を適用することで、検査面に存在する輝度分布のパターンを分析し、表面傷などの異常パターンを検出する研究が行われている。

具体例として、ヘアライン仕上げ面の欠陥検出に際して、フーリエ変換を用いてヘアライン条痕と欠陥を分離し、欠陥を検出している研究[61]や、カラーディスプレイの欠陥検出に際してガボールウェーブレットを利用したウェーブレット変換を用いてカラーフィルタの膜厚ムラを検出し、ムラを強調表示するシステムの開発[62]が行われている。これらの手法は、入力画像に周期的なパターンが認められる時にとくに有効である。しかし検査面の形状が複雑な場合は、正常パターンの強度に対して傷による信号の強度が弱くなるため、傷による信号が確認できなくなる。また、時間領域の画像と周波数領域の画像には、画像全体では対応関係があるものの、画素単位では対応関係が無い。このため、検査面が面性状の異なる複数の領域から構成されるとき、領域毎に検査感度を調整することが難しい。

## 機械学習を用いた方法

機械学習とは、環境(制御対象)から得られるサンプルデータ集合を分析することで、データの規則を抽出し、環境に適応していく枠組のことである。学習の指針となるサンプルデータの与えかたの違いから以下の様に分類される。

**教師あり学習** ニューラルネット, サポートベクターマシン

**教師なし学習** クラスタ分析, 主成分分析, 自己組織化マップ

**強化学習** TD 学習, Actor-Critic, Q-Learning

教師あり学習では、サンプルデータとして入力データとこれに対応する正しい出力データの組が複数与えられており、入力データと出力データの間には存在する未知の伝達関数を学習により獲得していく。このとき、あらかじめ与えられる理想的な出力値を「教師データ」と呼ぶ。これとは逆に、教師なし学習ではサンプルデータとして入力データのみを与え、教師データは与えない。強化学習では、明示的に教師データが与えられることはないが、教師データのかわりに「報酬」というスカラー量が与えられ、これを手がかりとして学習を進める。強化学習では、試行錯誤のなかで報酬をもっとも多く得られるような行動指針「政策」を獲得することを目的としている。

機械学習を用いた製品検査の事例として、はんだの外観検査[63]が報告されている。これは、はんだの外観検査にニューラルネットを用いることで、不良 179 個を含む 508 個のサンプルについて、不良品認識率 100%, 良品認識率 95.7%という結果を得ている。この手法は、学習の過程がブラックボックス化してしまうため、過学習による汎化性能の低下が問題となる。また、結果に解釈をつけることが難しく、検査結果に対して信頼が得づらい。

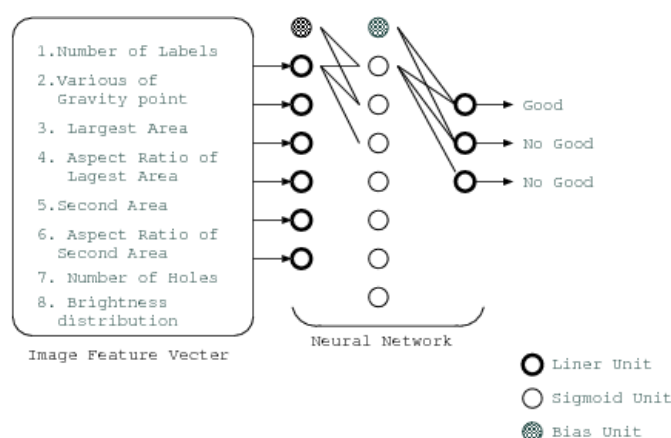


図 5.5 ニューラルネットを用いたはんだの外観検査

### 5.2.3 利用する画像処理方法

本研究で提案する傷検出方法の方針を定めるため、従来方法について第 5.1.2 節で述べた円筒形状製品の傷検査の要求仕様の観点から比較を行う。

機械学習を用いた方法は、良品・不良品を高い判定率で判定できるが、100%ではないため、良品と判定した製品の中に不良品が混入する可能性がある。このため、要求仕様「不良品を良品と判定しないこと」を満たすことはできない。また、学習の過程がブラックボックス化していること、学習過程で影響を及ぼすパラメータが非常に多く判定基準の調整が非常に難しいこと、から問題が発生した際、原因究明や解決が難しい。このため、要求仕様「メンテナンス性が高いこと」を満たすことは難しい。

周波数解析を用いた方法は、検査面上に一定のパターンが存在する場合は適しているが、複雑な形状や不規則なパターンをもつ製品の検査に対してはあまり適さない。傷は、単純なパターンが多いが、複雑なものも存在する。このため、要求仕様「不良品を良品と判定しないこと」の観点で不安が残る。また、検査面の特定の領域に対して傷検出に関する閾値を緩める、といった微調整が原理的に不可能であり、要求仕様「メンテナンス性が高いこと」を満たせない。さらに、周波数解析は計算コストを要するため、要求仕様「検査速度が早いこと」を満たせない可能性が高い。

背景差分法は、検査面を撮影した「入力画像」と良品の検査面を撮影した「背景画像」との差分を検出するものであり、処理が早いこと、要求仕様「検査速度が早いこと」を満たすことが期待できる。また、「入力画像」と「背景画像」との差分が大きい場合、傷と判定するような判定処理により、判定基準が明快になり、傷検出に関する閾値の設定が容易であるといえる。さらに、画像中の特定な領域に対して個別に閾値設定が可能であり、事前に背景画像を用意するだけで検査を実現できる。このため、要求仕様「メンテナンス性が高いこと」を満たすことも期待できる。そして、上記で述べたように判定基準が明快であるため、傷検出に関する閾値を厳しく調整することも可能であり、要求仕様「不良品を良品と判定しないこと」を満たすことも達成できると考える。しかしながら、問題点として、輝度変化に弱いことが挙げられる。提案する傷検査方法を実装する装置は、メンテナンス性を考慮し、検査の様子が作業者に見えるような設計になっているため、天候などの外的要因により緩やかな輝度変化が生じる。このため、単一の背景画像を使用した場合、照明変化により入力画像全体の輝度が増えるため、画像全体が傷として検出されることが考えられる。そこで、ある程度、照明変化を許容できるような方法が必要である。

以上の検討結果から、本研究では、背景差分法に着目し、この方法を基に新たに製品表面の傷を検出する方法を提案する。

### 5.3 画像間の差分を用いた傷検出方法

第 5.2.3 節において、背景差分法に着目し、この方法を基に新たに製品表面の傷を検出する方法を提案する。

本研究において、対象としている円筒形状製品は、軸対象であることから、所定の軸を中心に検査対象物を一定の角度で回転させ、その都度、画像を取得したとき、取得した画像は、傷が存在しなければほぼ同じになる。つまり、取得した画像間において差分をとった場合、傷が存在しなければ、差分は僅かにしか発生せず、傷が存在すれば、差分は大きく発生する。このことから、回転毎に取得する画像間での差分を検出することにより、傷を検出することができる。さらに、入力画像は、ひとつ前の入力画像と比較し、差分を検出するため、天候などの外的要因に対して、ある程度の輝度変化が許容可能であると考えられる。さらに、差分の閾値を画像データ化することにより、閾値調整を容易にすることによりメンテナンス性の向上が期待できる。本研究では、上記から、画像間の差分に基づいた傷検出方法を提案する。

図 5.6 に検査対象の画像を示す。画像の上側がストレート部であり、下側が底部である。検査対象の表面が図 5.6 の(a)のように均一で滑らかであるなら、検査対象が回転しても、入力画像間の輝度変化は緩やかなものになる。これに対して、図 5.6 の(b)のように傷などが存在すると、光は乱反射するため、大きな輝度変化が生じる。本研究では、この大きな輝度変化を検出することで傷検出を行う。

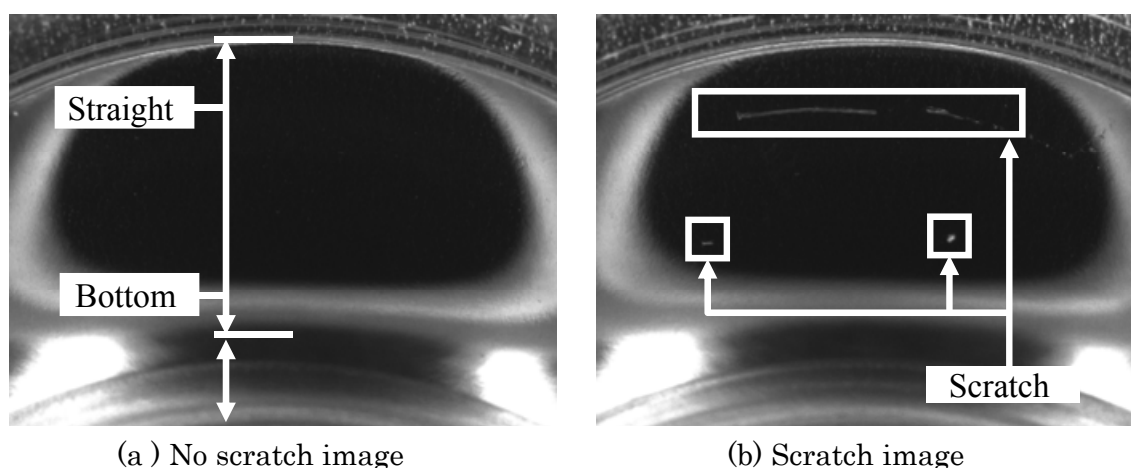


図 5.6 鏡面カップの画像

提案する画像処理による傷検出方法の流れを図 5.7 に示す。本傷検出方法は、閾値の設定、傷検出処理、判定処理から構成される。まず、傷検出用の閾値を設定し、検査品を回転させながら、画像を取得し、傷検出処理を行う。検査品が  $\theta$  deg 回転するまでに  $N$  回の傷検出処理を行い、傷として検出された画素数を算出する。この数を基に、良品・不良品の判定を行う。以降の節において、閾値の設定方法を第 5.3.1 節、傷検出処理を第 5.3.2 節、判定処理を第 5.3.3 節で述べる。

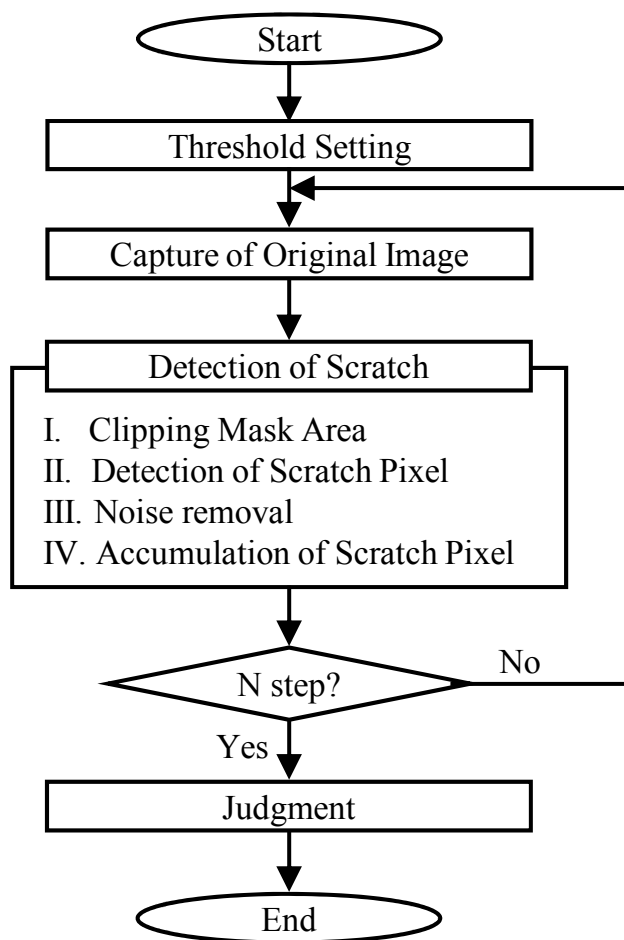


図 5.7 傷検出処理の流れ

### 5.3.1 閾値の設定方法

本研究は、傷検出の閾値を画像データとして扱う方法を提案する。対象としている円筒形状部品は、各部位により表面性状が異なっていることが多い。鏡面カップは、ストレート部を鏡面加工しているため非常に滑らかであるが、底部は、鏡面加工を行っていないためストレート部と比較し粗い。つまり、ストレート部の方が重要であり、厳しく検査を行わなくてはならない。また、同じ部位でも照明が均一でないことから、照明が強くとまっている箇所とそうではない箇所により、傷の見え方が変わる。これらのことから、本研究では、検査領域を複数に分け、閾値を設定できるような方法を提案する。

さらに、閾値を画像データとして表すこととし、多くの領域を容易に、かつ間違いがなく、設定できるようにするため、グレー画像よりも視認性が高いカラー画像を用いることとした。以降、閾値を表した画像データを閾値画像と呼ぶ。

閾値画像は予め作成するものであり、表面性状や照明の当たり具合により、色分けされる。色は三刺激値の R, G, B 値で設定できる。例えば、表面性状が粗い部位は青 (R=0, G=0, B=255)、良い部位は赤 (R=255, G=0, B=0)、処理を行わない部分は黒 (R=0, G=0, B=0) のように設定できる (図 5.8 参照)。そして、検査プログラムが実行されると閾値画像を読み込み、色に応じて閾値が設定される。これにより、どの色がどの程度の閾値なのか記載した対応表があれば、閾値画像を一般の画像処理ソフトウェアで変更することにより、処理プログラムを変更することなく容易に閾値設定が行える。

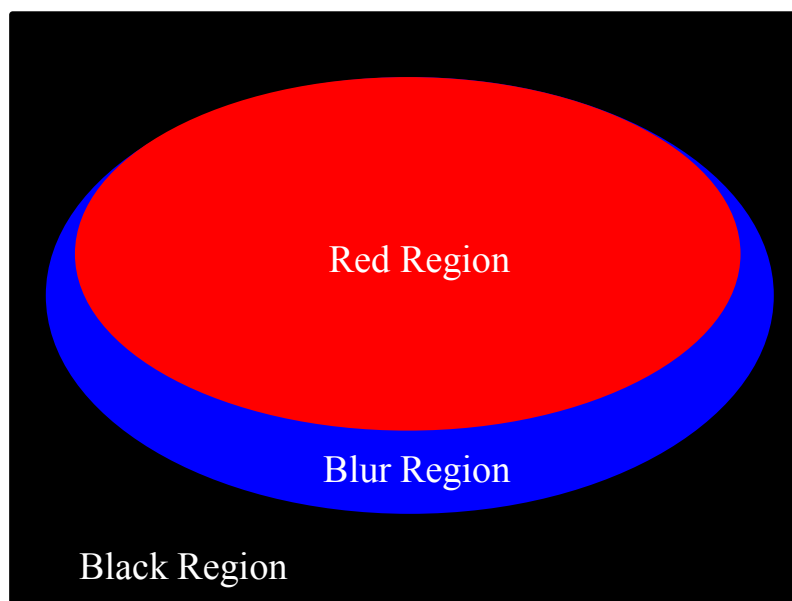


図 5.8 閾値画像の例



## 5.3.2 傷検出処理

傷検出処理は、マスク処理、傷画素検出、ノイズ除去、傷画素の累積処理から構成される。処理の流れを図 5.9 に示す。傷検出処理は、入力画像列中の全画像に対して、それぞれ個別に適用される。このとき、処理対象となる画像を処理画像と呼び、 $G$  で表す。

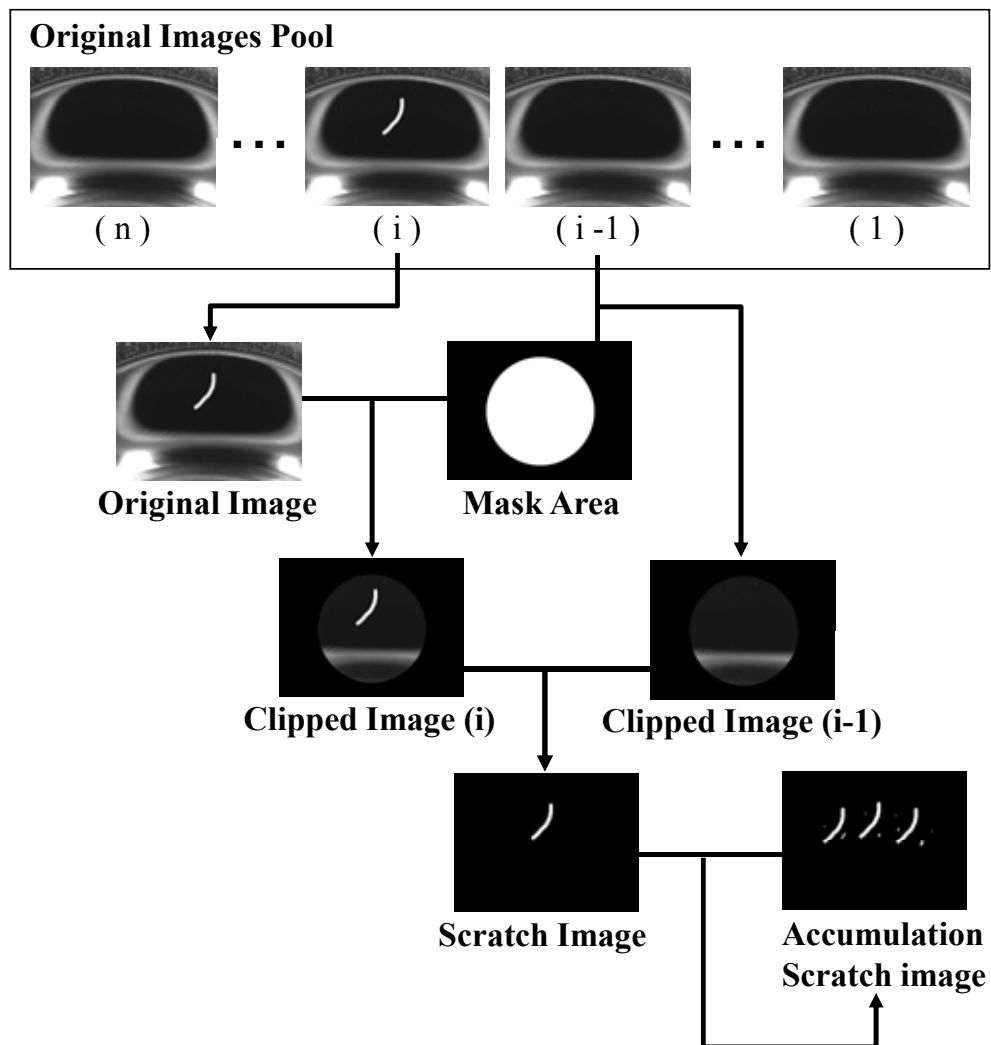


図 5.9 傷検出の流れ

## マスク処理

検査対象は、円筒形状のため画像の端は、歪んで写ってしまう。照明が均一でないなど、検査画像として問題があり、これを処理すると傷検出の精度を悪化させてしまう。また、画像端として写っている部位は次のステップにおいて、画像中央に写るため、画像端は処理を行う必要はない。そこで、「マスク処理」を適用し、処理画像を検査領域と非検査領域に分離し、非検査領域を除外する。これにより、傷検出精度の悪化を防ぐと共に処理する領域を削減することができ、処理速度の向上が行える。

## 傷画素検出

傷画素検出により検出された結果は、画像データとして出力され、このときの画像データを「傷画像」と呼び、 $\mathbf{S}$  で表し、画素値を  $s_{x,y}$  で表すこととする。

総数  $n$  枚の入力画像列中、 $i$  番目の画像が処理画像として選択されているとき、 $i$  番目の処理画像  $\mathbf{G}_i$  とそのひとつ前にあたる  $i-1$  番目の処理画像  $\mathbf{G}_{i-1}$  の各画素間で輝度差  $d_{x,y}$  をとる。 $d_{x,y}$  は座標  $(x, y)$  の輝度値を  $g_{x,y}$  とすると、式 (5.1) で求められる。

$$d_{x,y} = |g_{i,x,y} - g_{i-1,x,y}| \quad (5.1)$$

そして、座標  $(x, y)$  での閾値を  $t_{x,y}$  とすると、傷画素の画素値  $s_{x,y}$  は式 (5.2) において求められる。

$$s_{x,y} = \begin{cases} 1, & d_{x,y} > t_{x,y} \\ 0, & d_{x,y} \leq t_{x,y} \end{cases} \quad (5.2)$$

## ノイズ除去

撮影される入力画像には外乱等の要因により、ノイズが発生する。ノイズの発生した画素の輝度値は、周辺画素の輝度値より著しく大きい。

本研究に用いた画像間差分による傷検出では、時間あたりの輝度変化の大小により傷を検出するため、ノイズのような著しい輝度変化が生じると、傷として検出してしまう。このようなノイズによる検出が起こると、良品・不良品の判定の精度が悪くなってしまふ。そこで、ノイズ除去を行う必要がある。発生するノイズと傷との違いとして、傷はある程度の連結した画素として検出されるが、ノイズは孤立した画素として検出されることが挙げられる。このことから、傷として検出した画素の 8 近傍を観察し、傷画素が存在しない場合、ノイズとして除去することとした。

図 5.10 にノイズ除去の概念を示す．処理画像  $\mathbf{S}$  中の画素値  $s_{x,y}$  において，周辺 8 画素を確認する．そして，周辺に傷画素がなければ， $s_{x,y}=0$  とする．これにより，周辺 8 画素に傷画素のない画素はすべてノイズとして削除され，面積の大きな連結画素のみが残された傷画素  $\mathbf{S}$  が出力される．

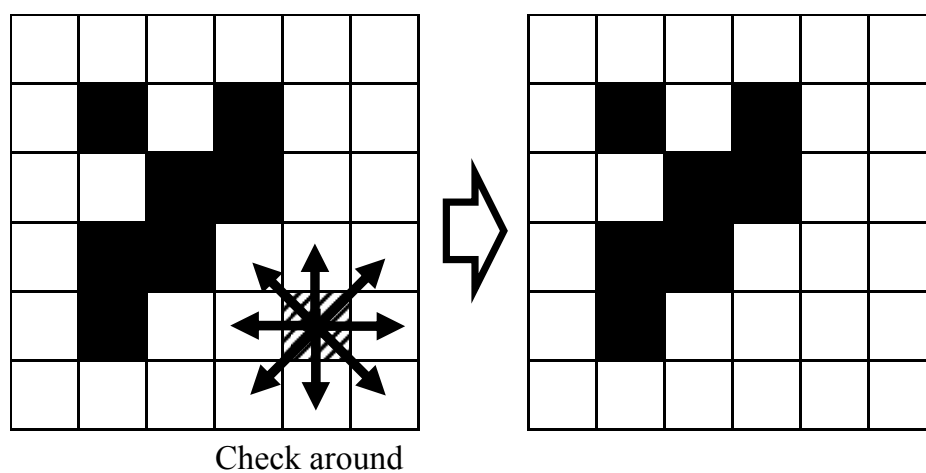


図 5.10 ノイズ除去

### 傷画素の累積処理

検査画像全域において，検出された傷の面積を計算するため，傷画素の各座標  $(x, y)$  において，検出された画素の度数をとる．この度数は累積傷画像  $\mathbf{A}$  として出力される．傷画像  $\mathbf{S}$  において傷の存在する領域では画素値  $s_{x,y}$  は 1 であり，傷の存在しない領域では画素値  $s_{x,y}$  は 0 であることから，累積傷画像  $\mathbf{A}$  および，その画素値  $a_{x,y}$  は，式 (5.3)，(5.4) のような各処理ステップの傷画像  $\mathbf{S}$  の加算処理となる．

$$A = \sum_{i=1}^n S_i \quad (5.3)$$

$$a_{x,y} = \sum_{i=1}^n s_{i,x,y} \quad (5.4)$$

### 5.3.3 判定処理

撮影された全ての入力画像に対して傷検出処理を行った後、累積傷画像 **A** 上に積みあげられた傷の数を集計し、検査対象が良品・不良品のどちらかであるか、最終的に判定する。検出された画素数は、 $P_d$ で表し、式 (5.5) で求められる。 $h$  と  $w$  は画像の横幅、縦幅[pixel]である。

$$P_d = \sum_{y=1}^h \sum_{x=1}^w a_{x,y} \quad (5.5)$$

判定には、入力画像中、検査領域となった画素数  $P_r$  と  $P_d$  の割合である傷占有率  $O_s$  を用いる。式 (5.6) に  $O_s$  を示す。

$$O_s = \frac{P_d}{P_r} \quad (5.6)$$

傷占有率  $O_s$  が良品閾値  $T_g$  よりも小さければ「良品」、傷占有率  $O_s$  が不良品閾値  $T_n$  よりも大きければ「不良品」として判定する。両者のいずれにも該当しない場合は良品・不良品の判定が困難であり、人間による目視検査を実施する必要がある「再検査品」として判定される。

## 5.4 検査装置

### 5.4.1 検査対象物

検査対象物として、第 5.1.1 節で述べた鏡面カップを用いた。詳細は、第 5.1.1 節で述べたため、省略する。

### 5.4.2 検査装置の概要

提案した傷検出方法を実装した検査装置の外観を図 5.11 に示す。検査装置は、図 5.11 のように全行程を周囲に開放してある。これにより、検査の様子を確認することができ、検査品の詰まりなどの対応が容易に行えるようになっており、メンテナンス性を確保した設計となっている。

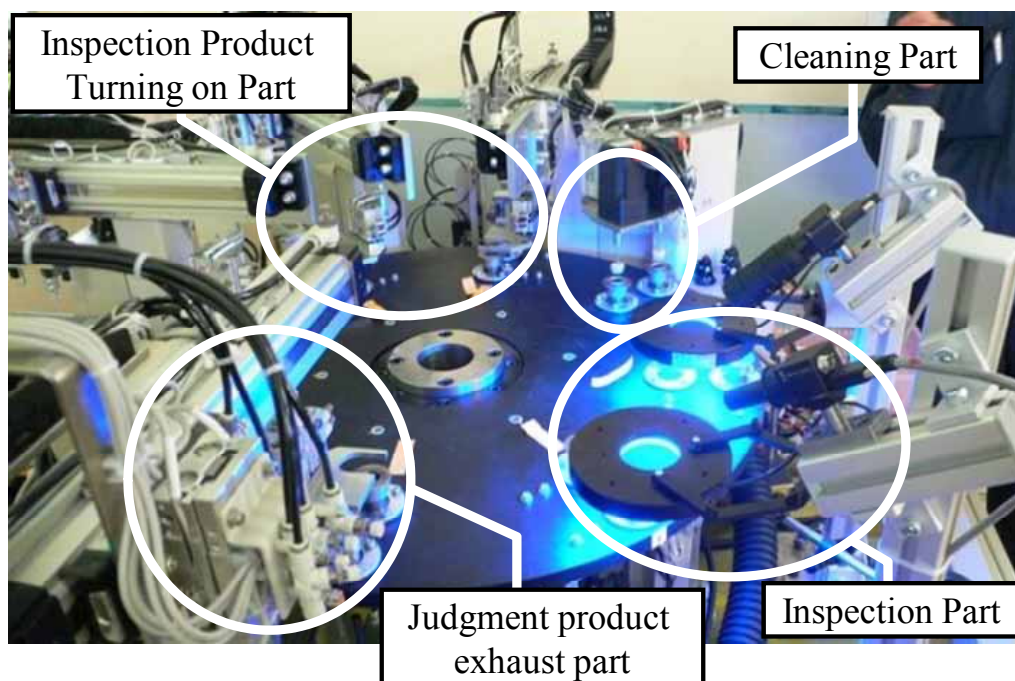


図 5.11 検査装置

検査装置は、検査品投入部、清掃部、検査部、判定品排出部から構成されている。検査部は検査装置の最も重要な部分であるため、詳細を次節において述べる。検査は、テーブルが回転することにより、検査対象物が上記順に各部を通過していくことにより行われる。検査品は、検査品投入部からテーブル上に設置されている治具に置かれる。そ

して、清掃部において、検査表面を清掃し、ゴミが混入するのを防ぐ。これにより、画像処理による傷検査において、ゴミの影響を考慮する必要がなくなる。検査部において、治具が回転することにより、本傷検出処理を行い、良品、不良品、再検査品を判定する。そして、判定結果に基づき判定品排出部から検査品を排出する。なお、検査中は、パネルに良品、不良品、再検査品の数が表示され、検査状況を確認することができる。

検査装置におけるハードウェアの開発は、共同研究企業である光工業株式会社、および栃木エンジニアリング株式会社により行われた。

### 5.4.3 検査部

検査部は、図 5.12 のように CCD カメラと LED 照明から構成されており、2 組設置している。これにより、2 つの検査品を同時に検査することが可能である。CCD カメラは、S/N 比が高くノイズが少ないことから IEEE1394 カメラを使用した。そして、レンズは工業用のマクロレンズを使用し、倍率が 1 倍のとき視野は 3.6 (縦) × 4.8 (横) mm である。画像は色を扱う必要がないことと処理の高速化を考慮し、256 階調の 8bit グレーで取得し、フレームレートを 15fps とした。画像の解像度は、1024×768 であり、このときの 1 画素のサイズは 4.7 $\mu$ m であるため、検出できる最小の傷のサイズは 5 $\mu$ m 程度である。また、照明には、安定した輝度を長時間維持することが可能である LED を使用することとした。

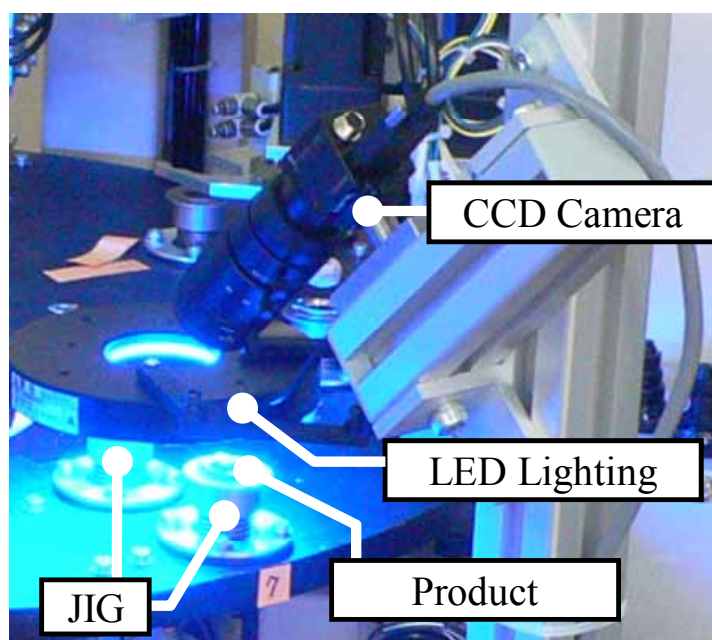


図 5.12 検査部

## 5.5 予備実験

### 5.5.1 実験目的

以下の点について確認することを本実験の目的とした。

- 良品と不良品を用い、傷画素数を求め傷占有率で良品・不良品の判定が行えることを確認する。
- 時間が経過しても同様の結果が得られることを確認する。  
使用する傷検査装置は、全工程を周囲に開放してあるため、時間とともに僅かだが輝度変化を生じる。このため、同一の製品を用いて、複数回の検査を行うことで時間の経過に伴う輝度変化の影響を確認する。

### 5.5.2 実験方法

#### 実験条件

以下に実験条件を示す。

- 検査対象の内壁全面を検査する
- 検査対象として、予め熟練した検査員が判定した良品 2 個 (OK-1, OK-2), 不良品 2 個 (NG-1, NG-2) を用いる
- 検査面は周囲に開放し、実際に装置を運用する状態と同じ環境で検査を行う

#### 実験手順

以下に実験手順を示す。

1. 検査面を 30 分割し、 $12^\circ$  毎に画像を取得する。
2. 本傷検出方法を適用し、検査面を評価する。
3. 良否・不良品、計 4 個の製品にそれぞれ 30 回検査を適用する。

## 5.5.3 実験結果

良品と不良品の傷検出画像の1つを図 5.13 と図 5.14 に示す. 図 5.13 は良品の画像であるため, 傷画素はほとんど検出されていない. 図 5.14 は傷がある不良品の画像であり, 傷の部分が検出されていることがわかる.

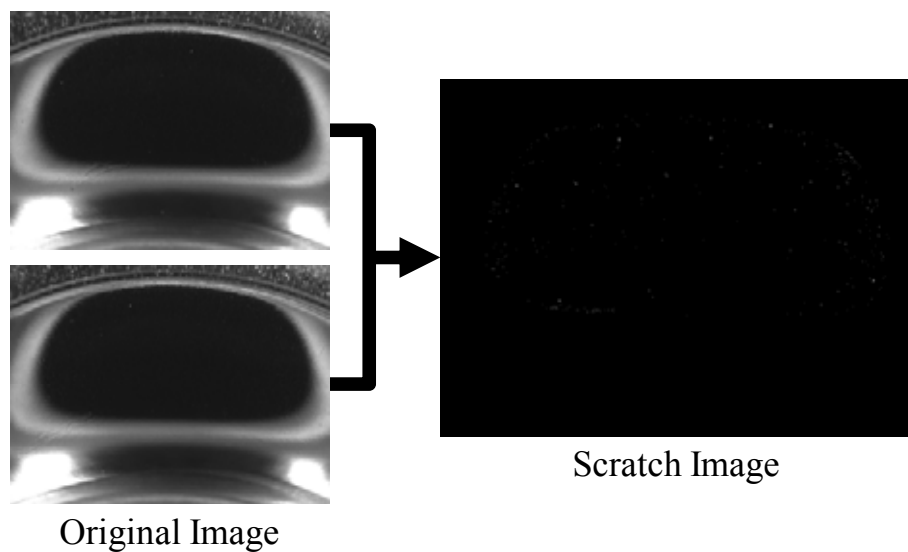


図 5.13 OK-1 の画像

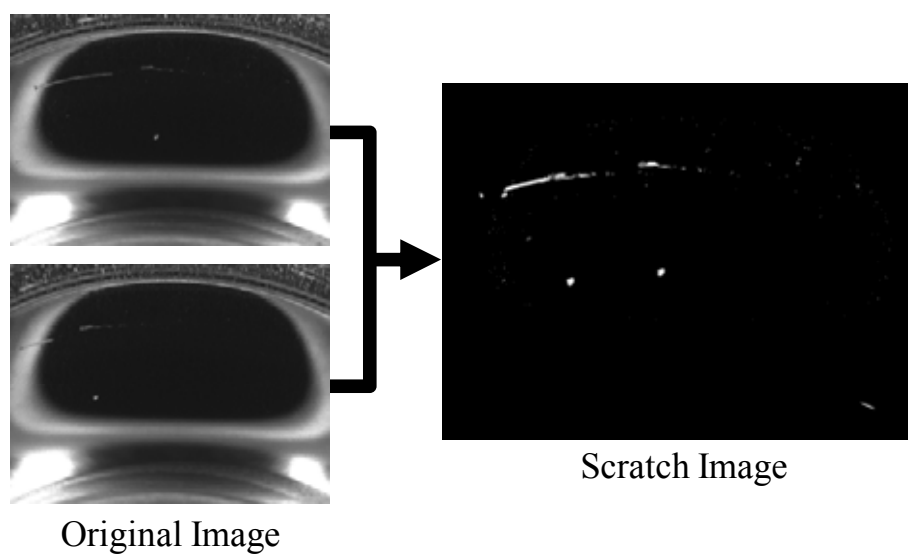


図 5.14 NG-1 の画像



良品・不良品 2 個ずつに対して、30 回、傷画素数を検出した結果を図 5.15 と図 5.16 に示す。図 5.15 は、OK-1 と NG-1 の結果であり、図 5.16 は、OK-2 と NG-2 の結果である。それぞれの図の横軸は傷画素数、縦軸は度数である。図中の  $m$  は平均値、 $\sigma$  は標準偏差である。

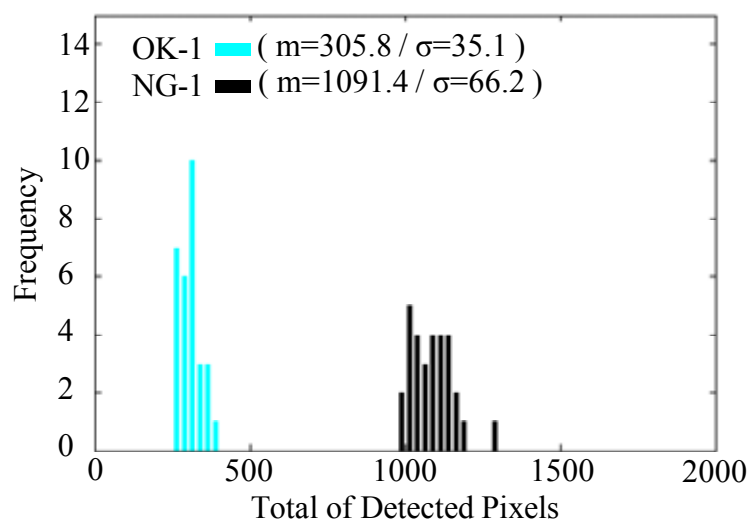


図 5.15 OK-1 と NG-1 の検出画素数の度数分布

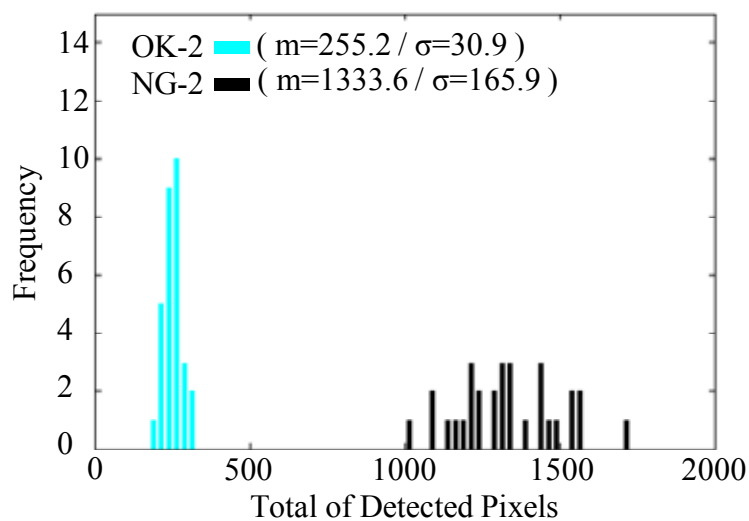


図 5.16 OK-2 と NG-2 の検出画素数の度数分布

### 5.5.4 考察

良品 (OK-1, OK-2) は不良品 (NG-1, NG-2) と比べ、傷画素の標準偏差が小さく、毎ステップ安定した結果が得られており、微小時間での輝度変化に対して、提案した傷検出アルゴリズムはほぼ影響がないことがわかった。このことから、良品の判定には良い精度が期待できる。これに対して、不良品は、傷で光が乱反射するため、検出画素数に大きいばらつきが生じているが、図 5.15 と図 5.16 の平均値に示されているように良品と不良品の傷画素数は明確に異なっており、不良品を良品と判定する可能性は非常に低い。さらに、1 ステップあたりの良品・不良品の傷画像数にあまり差がない場合でも、傷検出ルーチン数を増やすことにより、傷画像を加算していくことで、良品・不良品は、より差別化でき、確実な良品判定が可能である。

以上のことから、提案した傷検出アルゴリズムは有効であり、良品判定は、傷占有率  $O_s$  によって、要求仕様を満たすに十分な判定結果が期待できる。

## 5.6 検査実験

### 5.6.1 実験目的

以下に実験目的を示す.

- 実際に運用される環境において、本傷検出方法を実装した検査装置による良品判定の検査結果と、熟練した検査員による目視検査の結果を比較し、判定結果を確認する
- 判定結果から、考察を行い、本傷検出方法の有用性を確認する

### 5.6.2 実験方法

#### 実験条件

以下に実験条件を示す.

- 検査対象の内壁全面を検査する
- 検査対象数は、700 個とした
- 検査面は周囲に開放し、実際に装置を運用する状態と同じ環境で検査を行う
- 検査面の画像取得時は回転を止めずに行い、回転角度は  $360^\circ$  とする
- 閾値画像は図 5.17 に示されるものを用いた  
閾値画像において、黒領域の閾値は 255 (傷検出処理を行わない)、以下、赤領域は 20, 緑領域は 50, 青領域は 128 とした. 表面性状と照明の当たり具体により、予備実験を行い、さらに検査員が微調整を行い設定した. 赤領域、青領域が鏡面カップのストレート部であり、緑領域が底部となっている
- 良品判定閾値  $T_g$  は、 $T_g=0.0015$  を使用する  
鏡面カップの検査では、まず、良品判定を確実にを行うことを目的としているため、本稿では、不良品閾値  $T_n$  は設定せず、良品閾値  $T_g$  による良品判定のみを行い、良品と判定された製品以外は、再検査品とした.

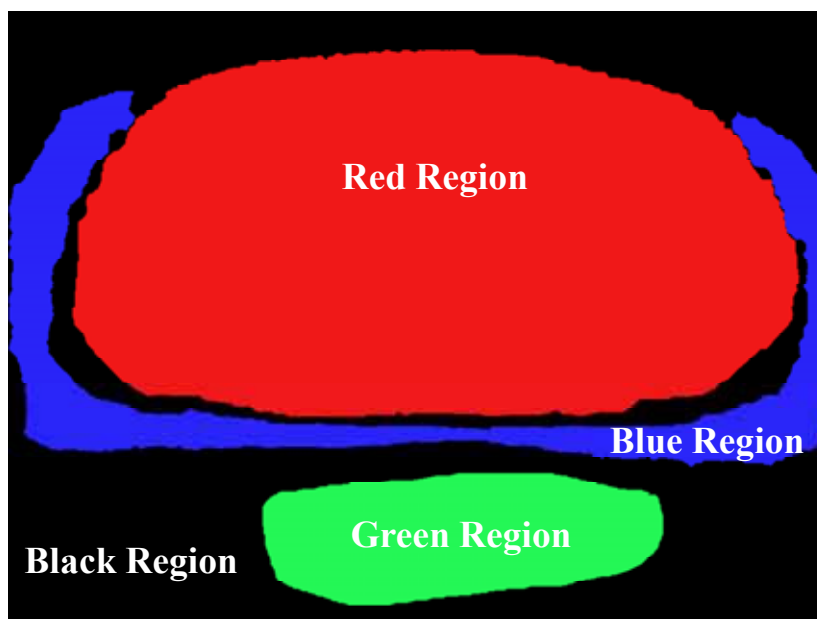


図 5.17 閾値画像

### 実験手順

実験は、以下の手順で検査を行い、装置による判定結果と判定の正確性を保障できる熟練の検査員による判定結果を記録した。

1. 装置による自動検査を実行する
2. 装置による判定結果（良品/再検査品）を記録する
3. 判定結果ごとに別々の容器に保管する
4. それぞれの容器ごとに検査員による目視検査を適用する
5. 検査員による判定結果（良品/不良品）を記録する

### 5.6.3 実験結果

実験結果を表 5.1 にまとめる。

表 5.1 実験結果

		Good Product	Re-Inspection
Judgment of Inspection system		287	413
Judgment of inspection worker	Good Product	287	355
	No Good Product	0	58
Judgment Rate (%)		100	-

本実験において検査対象とした 700 個の製品について、検査判定により、良品とされた製品は 287 個(41%)、再検査品とされた製品は 413 個(59%)であった。なお、検査に要した時間は 1 製品あたり 2.6 秒であった。さらに、これら 700 個の製品について熟練の検査員による判定を適用した結果、良品とされた製品は 642 個 (約 92%)、不良品とされた製品は 58 個(約 8%)であった。

検査装置によって良品と判定された 287 個の検査対象において、同検査員によって不良品と判定された検査対象は無く、良品判定の判定率は 100%であった。なお、検査装置によって再検査品と判定された検査対象 413 個のうち、検査員によって良品とされた検査対象は 355 個であり、不良品と判定された検査対象は 58 個であり、良品が約 86%、不良品が約 14%であった。

### 5.6.4 考察

良品判定の判定率は 100%であることから、要求仕様の中で、最も重要なことである「1. 不良品を良品と判定しないこと」は満たすことができた。また、検査速度は、1 個当たり 2.6 秒であり、目視検査による速度が約 3 秒であることから、要求仕様「3. 検査速度が速いこと」の具体的目標である「目視による検査時間と同等とすること」は達成することができた。そして、閾値画像により傷検出閾値の調整は、検査員が行ったことから、要求仕様「2. メンテナンス性が高いこと」を満たすことができた。なお、要求仕様「4. 導入コストが低いこと」は画像処理を用いることにより達成されている。

そして、本検査装置を運用した場合、検査員による目視検査工数は、約 41%の削減が期待できる。従来、鏡面カップは 1 日で数千点が生産され、これらを全て検査員によって検査している。このため、41%の目視検査の削減は非常に効果が大きく、検査員の負担軽減が達成される。以上から、提案した傷検査方法の有用性は示せた。

## 5.7 本章のまとめ

本章では、大きさが数十  $\mu\text{m}$  以上の微小傷を、画像を利用することにより検出する方法について述べ、目視検査に変わり自動で検査を行う装置について述べた。実際に運用される環境において、実験を行い、提案した傷検出方法の有用性を示した。以下に本章の内容についてまとめる。

1. 対象を円筒形状製品とし、検査の要求仕様を述べた。要求仕様は以下の通りである。
  - 不良品を良品と判定しないこと
  - メンテナンス性が高いこと
  - 検査速度が早いこと
  - 導入コストが低いこと
2. 要求仕様「導入コストが低いこと」から、画像処理を用いることとし、従来の画像処理による傷検出方法を要求仕様の観点から比較した結果、背景差分法に基づいた方法を提案することとした。
3. 円筒形状製品は、軸対象であることから、所定の軸に対して一定角度毎に画像を取得し、取得画像とひとつ前の取得画像を比較することで、傷を検出できると考え、画像間の差分を利用した傷検出方法を提案した。
4. 要求仕様「メンテナンス性が高いこと」を考慮し、閾値を画像データ化することにより、容易に調整を行える閾値設定法を提案した。
5. 実用化に向けて検査装置を開発し、より実際の運用環境に近い条件で検査装置の検査実験を行った。結果からわかったことを以下にまとめる。
  - 実験結果から、要求仕様「不良品を良品と判定しないこと」を達成した。
  - 検査速度は、1個当たり 2.6 秒であり、目視検査による速度が約 3 秒であることから、要求仕様「検査速度が速いこと」の具体的目標である「目視による検査時間と同等とすること」は達成できた。

## 第 6 章

# 結論

### 6.1 本研究の結論

本研究は、マイクロ視野における画像計測による微細作業の自動化を目的とした研究である。マイクロマニピュレータを使用し微細作業を行う場合、まず、微小物体に位置合わせを行う。本研究では、位置合わせのときに必要となる奥行き方向の距離推定方法を提案した。そして、提案方法の応用として、二台のマイクロマニピュレータによる微粒子の自動把持への適用、一台のマイクロマニピュレータを使用した砥粒の評価の自動化のための自動把持への適用を行った。さらに、マイクロマニピュレータを使用しない微細作業の一つである微小傷検査の自動化のため、円筒形状製品を対象とした画像による微小傷検出方法を提案し、実際の運用環境での実験を行った。各実験結果から、本奥行き方向の距離推定方法および微小傷検出方法の有用性を示した。以下、各章で述べたこと、および明らかにしたことをまとめ、本論文の結論とする。

第 2 章では、提案する奥行き方向の距離推定方法の方針を明確にするため、微細作業とそのシステムの現状、および従来の方法について述べた。微細作業とそのシステムの現状から、自動化の研究は、空気中かつ膨大な数が存在する微小物体を対象としたものがないことから、本研究では、これを対象とすることとした。膨大な数の微小物体を対象とする場合、各動作の短時間化が必要である。そこで、位置合わせが一度のエンドエフェクタ移動で完了するような精度の奥行き推定方法が必要であることを述べた。また、従来の奥行き方向の距離推定方法および位置合わせに関する研究は、一度のエンドエフェクタ移動で位置合わせを行うことができないことを述べ、新しい奥行き方向の距離推定方法が必要であることを明確にした。さらに従来の方法は、レンズパラメータが誤差の要因の一つになっていると考えた。そして、人間が微細作業を行うとき、ボケから距離を感覚的、経験的にとらえていることから、これを参考とした。上記から、提案する奥行き方向の距離推定方法の方針を「一度のエンドエフェクタ移動で位置合わせが行えること」、「距離算出において、レンズパラメータを用いないこと」、「被写界深度に基づき、ボケから距離を求めること」とした。

そして、方針に従い、新しい奥行き方向の距離推定方法を提案し、推定式導出実験を

行い、提案した方法の有用性を確認した。まず、方針「被写界深度に基づき、ボケから距離を求めること」から、被写界深度に基づき、ボケと奥行き方向の距離の関係を述べた。そして、この関係から、微小物体とエンドエフェクタの距離をボケ幅の差から算出するモデルを導出した。さらに、そのモデルを曲線の近似式に変換することにより、方針「距離算出において、レンズパラメータを用いないこと」を満たした。そして、推定式導出の手順について述べ、最後に推定式導出実験を行った。実験結果から、高い精度を有していることを示した。次に提案した方法を用い、エンドエフェクタと微小物体との距離を推定し、位置合わせする実験を行った。実験結果から、導出した推定式は、高い精度の距離推定が行えることを確認した。また、5個の大きさが異なる胡桃の花粉に対して、一度の奥行き方向の距離推定によるエンドエフェクタ移動により位置合わせが行えたことを確認した。以上の結果から、方針「一度のエンドエフェクタ移動で位置合わせが行えること」を満たすことを確認し、本奥行き方向の距離推定方法が有用であることを示した。

第3章では、第2章で提案した方法を用い、エンドエフェクタと微粒子との距離を推定し、自動で把持と解放を実現した。本研究では、対象作業環境を空気中としており、さらに対象物として、空気中に膨大に存在し、生きている微粒子であることから、花粉を挙げた。花粉は、生きている微粒子であることから損傷を防ぐため、二台のマイクロマニピュレータを使用し、すくい上げる動作で把持を行った。また、解放は、100Hz以上の振動を用いることにより高い成功率による解放が行えるという報告があることから、これを採用した。解放時にプレパラートから十分な距離をとることにより、花粉への損傷を防ぐことができる。20個の花粉に対して、自動把持と解放を行った結果、高い成功率が得られた。奥行き方向の距離推定が精度よく行えなければ、高い成功率は得られない。このことから、本提案方法の有用性を示すことができた。

第4章では、マイクロマニピュレータを用いた微小砥粒の評価の自動化のため、本奥行き方向の距離推定方法を適用し、微小砥粒の自動把持を実現した。光学顕微鏡を用いた微小砥粒の評価は、二次元での評価であり、砥粒の一部のみの評価である。より正しく評価を行うためには、全体の評価、つまり三次元での評価が必要である。そこで、本研究はマイクロマニピュレータを用い、三次元での評価を行うことを提案してきた。さらに、評価を自動で行うためには、まず、把持を自動で行えなければならない。本把持は、砥粒を評価するため、一台のマイクロマニピュレータで砥粒を把持できなければならない。そこで、本把持は、奥行き方向の距離推定方法を用い、位置合わせを行い、対象物にエンドエフェクタをすり合わせる摩擦動作により凝着力を増加させ、エンドエフェクタに砥粒を付着させた。実験により、一台のマイクロマニピュレータで砥粒を自動で把持できることを示し、本奥行き方向の距離推定方法が砥粒にも適用できることを示



した。

第5章では、マイクロマニピュレータを使用しない微細作業の自動化の1つとして、製品の微小傷検査を挙げ、小型の円筒形状製品を具体的な対象物とし、検査の自動化のための微小傷の検出方法を提案した。まず、検査の要求仕様として「1. 不良品を良品と判定しないこと」、「2. メンテナンス性が高いこと」、「3. 検査速度が早いこと」、「4. 導入コストが低いこと」が挙げられた。画像処理を用いた方法は、他の方法と比較し、要求仕様3と4の観点から優れていることを述べた。そして、画像処理による従来の傷検出方法について要求仕様の観点から検討した結果、背景差分法に基づき新しい傷検出方法を提案することとした。円筒形状製品は、軸対象であることから、所定の軸に対して一定角度毎に画像を取得し、取得画像とひとつ前の取得画像を比較することで、傷を検出することができると考え、画像間の差分を利用した傷検出方法を提案した。さらに、要求仕様2を考慮し、閾値を画像データ化することにより、容易に調整を行える閾値設定法を提案した。最後に、実用化に向けて検査装置を開発し、より実際の運用環境に近い条件で検査実験を行った結果、要求仕様1および3を満たす結果が得られた。この結果から、本傷検出方法の有用性を示した。

## 6.2 展望

本研究の今後の展望について述べる。本提案方法であるマイクロ視野における奥行き方向の距離推定方法、および本提案方法に基づく微粒子の自動把持と解放の実現により、「微粒子の自動選別装置」の開発が今後の展望として挙げられる。そして、具体的な微粒子として、花粉や砥粒が考えられる。

### 花粉の自動選別

植物は、人間にとって食糧のみならず、建材、薬などとして有益であり、植物を人間の要望に合わせ、改良する品種改良は非常に重要な技術である。品種改良は、通常、近い種類の植物を掛け合わせるにより行われるが、多くの掛け合わせを繰り返し行わなければならないため非常に長い時間を要する。これは、掛け合わせた植物の花粉の多くが不稔性であり遺伝的に不安定なため、安定な種ができるまで掛け合わせを繰り返さなければならないためである。この問題の解決のため、花粉の段階で稔性、不稔性を判別することを目的とし、形状や色、模様などのような外観的特徴から、稔性、不稔性の判別を行い、植物育種を効率的に行う試みがなされてきた。しかしながら、判別は人間が花粉を観察し、行うため、第 1.1 節で述べた「作業の正確性を持続させることが困難」、「作業員への負担が大きい」という問題が発生する。このため、画像計測により稔性、不稔性の判別を行う研究が行われてきた[64][65]。これをさらに発展させ、判別した結果に基づき、自動で花粉を選別する装置の開発が期待されている。本研究の成果である「奥行き方向の距離推定方法、および本提案方法に基づく微粒子の自動把持と解放」を導入することにより、選別対象の花粉を自動で把持し、解放することが可能となり、装置の開発へ大きい貢献が行える。そして、装置の開発、および運用により、植物の品種改良がより効率的に行えることから、人間に多大な利益をもたらすことが期待できる。

### 砥粒の自動選別

砥粒は、同じ粒度のものでも大きさ、形状はある程度の分布を持つ。そこで、画像により大きさや形状を評価し、マイクロマニピュレータを使用し選別することができれば、粒度分布を小さくすることだけではなく、形状も揃えることが可能となる。本研究の成果である自動把持は、この選別作業の自動化のため、非常に重要な機能となる。ただし、マイクロマニピュレータを用い、一個一個選別するため、生産性が低い。このため使用範囲は、一般用途ではなく研究向けのみとなることが予測できるが、砥粒を用いた研究に対して、多大な貢献が期待できる。

## 参考文献

- [1] 新井建生, 谷川民生 : マイクロマニピュレーション, バイオメカニズム学会誌, Vol.22, No.4, pp146~151, 1998.
- [2] 新井建生 : マイクロ・ナノマニピュレーション : 今後の進展, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.2, pp18~20, 2002.
- [3] 新井史人 : マイクロ・ナノマニピュレーション技術の将来展望, 精密工学会誌, Vol.68, No.11, pp1389~1392, 2002.
- [4] 大石勝昭, 工藤謙一 : 細胞マニピュレーション, 精密工学会誌, Vol.68, No.11, pp1419~1423, 2002.
- [5] X. Li, G. Zong, and S. Bi, "Development of Global Vision System for Biological Automatic Micro-Manipulation System," in *2001 Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.127–132.
- [6] S. Yu, and B. J. Nelson, "Microrobotic Cell Injection," in *2001 Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.620–625.
- [7] X. Y. Liu, and Y. Sun, "Automated Mouse Embryo Injection Moves Toward Practical Use," in *2009 Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 526–531.
- [8] Z. Lu, X. Zhang, C. Leung, N. Esfandiari, R. F. Casper, and Y. Sun, "Automated Cell Manipulation: Robotic ICSI", in *2011 Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp2540~2545, 2011.
- [9] 新井健生, 谷川民生, 新井史人, 佐藤理, 麻生博, 高橋清也, "マイクロロボティクスを適用した胚操作の自動化", 第 24 回日本ロボット学会学術講演会, 3L-11, 2006.
- [10] 藤本香織, 国松禎明, 前秦志, 田窪朋仁, 新井健生, 井上健司, 山田真人, "微小流路を移動する細胞の検出機構実装法", 日本ロボット学会, Vol.26, No.5, pp.462~467, 2008.

- [11] Y. Yamanishi, S. Sakuma, T. Iyanagi, F. Arai, T. Arai, A. Hasegawa, T. Tanikawa, A. Ichikawa, O. Satoh, A. Nakayama, H. Aso, "Design and Fabrication of All-in-One Unified Microfluidic Chip for Automation of Embryonic Cell Manipulation," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.22, no.3, pp.371-379, 2010.
- [12] S. Saito, H. T. Miyazaki, and T. Sato, "Micro-object Pick and Place Operation under SEM based on Micro-physics", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.14, No.3, pp.227-237, 2002.
- [13] 斎藤滋樹, 宮崎英樹, 佐藤知正, 高橋邦夫, "表面凝着力を考慮した力学に基づく電子顕微鏡下における微小物体操作法分析", *日本ロボット学会誌*, Vol.20, No.3, pp.324-334, 2002.
- [14] 川本広行, 矢代健二, 安藤大樹, "静電力を利用した粒子のマニピュレータ", *日本機械学会論文集(C編)*, Vol.19, No.5, pp.577-584, 2007.
- [15] 尾畑賢一, 斎藤滋樹, 高橋邦夫, 恩澤忠男, "液体体積制御による微小物体操作法", *溶接学会全国大会講演概要*, 第72集, pp.192-193, 2003.
- [16] 勝田治, 恩澤忠男, 斎藤滋樹, "相変態を利用した微小物体操作法", *溶接学会全国大会講演概要*, 第75集, pp.156-157, 2004.
- [17] 中尾政之, 石井和久, 佐藤知正, 畑村洋太郎, "離脱機構を有する非把持形マイクロ・ハンドリング工具の試み", *日本機械学会論文集(C編)*, Vol.61, No.583, pp.285-290, 1995.
- [18] 佐藤知正, 古谷野宏一, 畑村洋太郎, 中尾政之, "集動マニピュレーションシステムの構築と微細作業実験による評価", *日本機械学会論文集(C編)*, Vol.62, No.598, pp.228-234, 1996.
- [19] 並木精密宝石株式会社, 東京大学, "マイクロマニピュレータ", 公開特許公報 2008-132574.
- [20] 井上健司, "回転2本指による微小物体の操作法", 第26回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2008AC1G2-01, 2008.
- [21] 松崎由紀, 李秀雄, 井上健司, "回転2本指マイクロハンドを用いた微小物体の回転操作実験", 第27回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2009AC1B3-08, 2009.

- [22] 谷川民生, 新井健生, "二本指マイクロハンドの設計と微細作業", 日本ロボット学会, Vol.15, No.2, pp.284~289, 1997.
- [23] 谷川民生, 新井健生, "二本指マイクロハンド用操作デバイスの開発とその制御", 日本ロボット学会, Vol.16, No.4, pp.533~539, 1998.
- [24] T. Tanikawa, T. Arai, "Development of a Micro-Manipulation System Having a Two-Fingered Micro-Hand," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol.15, no.1, pp.152-162, 1999.
- [25] 谷川民生, 新井健生, "並進3自由度を有するマイクロフィンガーモジュール", 日本ロボット学会, Vol.20, No.2, pp.196~205, 2002.
- [26] K. Inoue, T. Tanikawa, T. Arai, "Micro-manipulation system with a two-fingered micro-hand and its potential application in bioscience", *Journal of Biotechnology*, Vol.133, pp.219-224, 2008.
- [27] 新井史人, 小川昌伸, 福田敏男, "バイラテラル制御による非接触マニピュレーション", 日本ロボット学会, Vol.20, No.4, pp.417~424, 2002.
- [28] 小塚晃透, "超音波マイクロマニピュレーション", 日本音響学会誌, Vol.61, No.3, pp.154~159, 2005.
- [29] 戸田恭輔, 神谷大揮, 堀江三善男, "形状記憶樹脂製マイクロマニピュレーションのための超音波加熱に関する研究", 日本機械学会学術講演会論文集, 2007.
- [30] M. Washizu, "Manipulation of biological objects in micromachined structures", *Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, pp.196-201, 1992.
- [31] 鷺津正夫, "マイクロマシンのバイオ技術への応用", 日本ロボット学会, Vol.12, No.4, pp.554~559, 1994.
- [32] 新田雅康, "金属表面検査における画像処理技術動向", 電気鉄鋼, Vol.79, No.4, pp.299~303, 2008.
- [33] 山田龍三, "画像検査技術を用いた鉄鋼製品検査の動向", 電気鉄鋼, Vol.79, No.4, pp.313~318, 2008.

- [34] F. Arai, A. Kawaji, P. Luangjarmekorn, T. Fukuda, and K. Itoigawa, "Three-Dimensional Bio-Micromanipulation under the Microscope", *in 2001 Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.604~609, 2001.
- [35] 佐野哲也, 長畑秀和, 遠藤浩, 住本哲広, 山本秀樹, "ビジュアルサーボによる実体顕微鏡下におけるマイクロマニピュレーション自動化システムの開発", 電子情報通信学会, 電子情報通信学会技術研究報告 MBE, ME とバイオサイバネティックス, Vol.98, No.58, pp.115-120, 1998.
- [36] T. Sano, H. Nagahata, H. Endo, T. Sumimoto, T. Kunishi and H. Yamamoto, "A Visual Feedback System for Micromanipulation with Stereoscopic Microscope" *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp.1127-1132, 1998.
- [37] 佐野哲也, 重本浩行, 山本秀樹, "実体顕微鏡を用いた視覚フィードバックシステムの開発", 電子情報通信学会, 電子情報通信学会技術研究報告 MBE, ME とバイオサイバネティックス, Vol.99, No.177, pp.93-98, 1999.
- [38] T. Sano, H. Nagahata, H. Yamamoto, "Automatic Micromanipulation System using Stereoscopic Microscope" *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, vol.1, pp.327-331, 1999.
- [39] オリンパス株式会社, "マイクロマニピュレーションシステム", 公開特許公報, 2005-258413.
- [40] 加藤陽介, 新井健生, 前秦志, 井上健司, 谷川民生, "マイクロ・ナノ作業のための視覚とハンドの協調", 日本機械学会 2001 年度年次大会講演論文集(IV), pp.189-190, 2001.
- [41] Y. Katoh, T. Arai, K. Inoue, Y. Mae, T. Tanikawa, "Vision System for Micro Manipulation," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.14, no.2, pp.203-209, 2002.
- [42] J. Ens and P. Lawrence, "An investigation of methods for determining depth from focus", *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.15, No.2, pp.97-107, 1993.
- [43] M. Subbaro and G. Surya, "Depth from defocus:A spatial domain approach", *International Journal of Computer Vision*, Vol.13, No.3, pp.271-294, 1994.

- [44] Shree K. Nayar and Yasuo Nakagawa, "Shape from Focus", *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.16, No.8, pp.824–831, 1994.
- [45] K. Ohba and J. C. Pedraza Ortega, "Micro-observation technique for tele-micro-operation", *Advanced Robotics*, Vol.15, No.8, pp779–798, 2000.
- [46] 出口光一郎, "ロボットビジョンの基礎", コロナ社, 2000.
- [47] 石濱貴徳, 大澤茂治, 尾崎功一, "マイクロ視野における奥行き方向位置推定手法の提案", 2010年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, H08, pp.621–622, 2010.
- [48] 大澤茂治, 石濱貴徳, 尾崎功一, "マイクロ視野におけるボケ幅の差を用いた奥行き方向の距離推定", *精密工学会誌*, Vol.77, No.5, pp.483–489, 2011.
- [49] 高橋友刀, "レンズ設計 収差係数から自動設計まで", 東海大学出版会, 1994.
- [50] 大澤茂治, 岡崎敦, 尾崎功一, "マイクロマニピュレータを用いた三次元計測による微小物体の自動把持と解放", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 1A2–B05, 2011.
- [51] S. Osawa, K. Ozaki, "Automatic Pickup and Release of Particle by Depth Estimation Method with Micromanipulators for Particle Sorting System", *in 2011 Proc. of the IEEE/SICE International Symposium on System Intergration*, 2011.
- [52] ジョハリ ビン ジャミル コフリ, 大澤茂治, 岡崎敦, 尾崎功一, "マイクロマニピュレータを用いた砥粒評価方法の提案", 2011年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, L03, pp.871–872, 2011.
- [53] 田中義信, "精密工作法 上 第2版", 共立出版, 1979.
- [54] 矢嶋三郎, "粉碎と紛体物性", 培風館, 1986.
- [55] 神保元二, 向坂保雄, 定方正毅, 小沢英一, 小宮山宏, 吉沢昭宣, "微粒子ハンドブック", 朝倉書店, 1991.
- [56] 大澤茂治, 石濱貴徳, 尾崎功一, "マイクロ視野における三次元位置計測による自動 Pick 動作", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2A2–A04, 2010.

- [57] 宮崎英樹, 笠谷岳士, 古谷野宏一, 佐藤知正, "微小物体に働く付着力", 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.64, No.620, pp.134-141, 1998.
- [58] 大澤茂治, 風間晋吾, 嘉藤俊介, 渡邊信一, 尾崎功一, 石川洋平, 田中稔, 並木俊郎, 諏訪芳久, 廣瀬晃, "画像処理による円筒形状製品の傷検査装置の開発", 精密工学会誌, Vol.76, No.8, pp.955-959, 2010.
- [59] 鷺見和彦, 関真規人波部齊, "物体検出: 背景と検出対象のモデリング(サーベイ1)", 情報処理学会研究報告書, Vol.2005, No.88, pp.79-98, 2005.
- [60] デジタル画像処理委員会監修: デジタル画像処理, CG-ARTS 協会, 2004.
- [61] 樋口静一, 新野将行, 本橋康之, "画像処理によるヘアライン仕上げ面の欠陥検出方法", 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.67, No.657, pp. 1655-1662, 2001.
- [62] 中野宏毅, 山本鎮男, 吉田靖夫, "ウェーブレットによる信号処理と画像処理", 共立出版株式会社, 1999.
- [63] 小路祐吉, 高津直由, 王征成, "ニューラルネットによるはんだ外観検査", 電子情報通信学会論文誌, J78-DII, 4, pp.589-596, 1995.
- [64] 尾崎功一, 稲川怜司, 横田和隆, 山本純雄, 房相佑, 金子幸雄, 松澤康男, "交雑育種法における花粉の画像計測量の提案", 精密工学会誌, Vol.67, No.6, pp.982-986, 2001.
- [65] 尾崎功一, 木下武治, 山本純雄, 貝賀信保, 石川信, 房相佑, 金子幸雄, 松澤康男, "雑種花粉評価のための色指標の提案", 精密工学会誌, Vol.69, No.10, pp.1439-1443, 2003.



# 謝辞

本研究を進めるにあたり、御指導、御鞭撻を賜りました宇都宮大学大学院 尾崎功一教授に心から感謝致します。長い研究生生活の間、先生から頂いた暖かい御助言、および適切な御指導により、本研究を完成することができました。

また、本研究をまとめるにあたり、貴重な御助言を賜りました、宇都宮大学大学院、畑沢鉄三教授、横田和隆教授、大谷幸利教授、佐藤隆之介准教授に深く感謝いたします。

そして、副専門の履修にあたり、砥粒に関して御指導頂きました宇都宮大学大学院、進村武男教授に感謝致します。本論文の第4章 マイクロマニピュレータを用いた微小砥粒の評価への適用には、御指導頂いたことが非常に参考になりました。また、双方向インターンシップにおいては、宇都宮大学大学院 杉山均教授、渡邊信一助授に大変お世話になりました。そして、受け入れ先の企業である合同会社ロモビリティ陽東の出射聡明氏、原紳氏には作業の御指導を頂きました。各氏に深く感謝致します。

さらに、本論文の第5章 画像処理による微小傷の検出を行うにあたり、様々な御協力を頂きました共同研究企業である光工業株式会社の廣瀬晃氏、諏訪芳久氏、並木俊郎氏、田中稔氏、石川洋平氏に深く感謝致します。

さらに、公私にわたり幅広い御助言、御協力を頂きました宇都宮大学、計測・ロボット研究室の卒業生、修了生および、研究室一同に感謝致します。特に、平成19年度博士前期課程修了生 風間晋吾氏、平成20年度博士前期課程修了生 嘉藤俊介氏、平成21年度博士前期課程修了生 石濱貴徳氏、平成22年度博士前期課程修了生 JOHARI BIN JAMIL KOFLI 氏、博士前期課程2年 岡崎敦氏には、本論文の完成に多大な御協力頂きました。各氏に深く感謝致します。

最後に、私の研究生生活を私生活の面で幅広く支えて頂いた友人、ならびに家族、父 大澤英一、母 大澤久子、兄 大澤和也、祖父 故大澤平三、祖母 大澤よう、ならびに親戚の方々に深く感謝の意を表して結びと致します。

## 付録 A

# 奥行き距離の推定式導出時における 評価項目のための実験

第 2 章における奥行き方向の距離の推定式導出時の評価である「誤差」と「各項の符号」についてそれぞれ調査実験を行い、評価観点が適切であることを実験により確認する。「誤差」に対しては、A.1 輝度変化の影響調査実験、「各項の符号」に対しては、A.2 各項の符号と距離の関係の調査実験に詳細を述べる。

### A.1 輝度変化の影響調査実験

本節では、本実験で使用した光学顕微鏡の照明の輝度変化による影響を実験により確認する。

#### A.1.1 実験目的

一個の花粉に対して、同一の条件において奥行き方向の距離推定式を 5 回導出し、さらに背景の輝度値を算出することにより、照明の輝度変化による影響を確認する。

#### A.1.2 実験方法および条件

実験方法および条件について述べる。

- 実験装置は、第 2.4.2 節で述べた装置を使用する
- 対象物は第 2.4.3 節で述べた胡桃の花粉を使用する
- ボケ幅の抽出方法は、第 2.4.5 節で述べた方法を使用する
- エンドエフェクタの初期位置は、花粉から約 50 $\mu\text{m}$  離れた位置とする
- 花粉の初期状態は、ボケが生じた状態とする

- エンドエフェクタの1ステップの移動量は $2\mu\text{m}$ とする
- 1ステップの時間は1秒とする
- 推定式は、第三項までを使用する
- 背景の輝度値は、図 A.1 の赤色の四角で表したような、花粉とエンドエフェクタ先端に近い領域において算出する

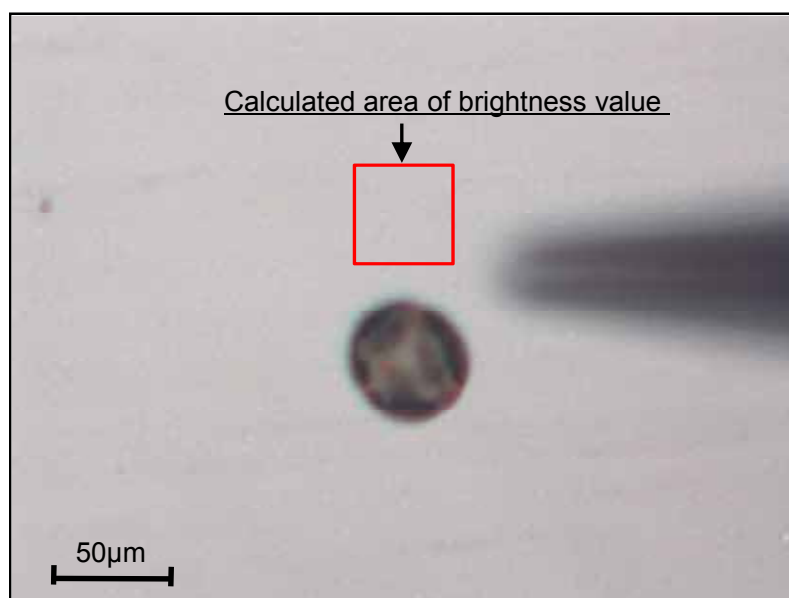


図 A.1 輝度値の算出領域

### A.1.3 実験結果と考察

表 A.1 に 5 回の実験結果を示す。表の「推定式」は、推定式導出時の実測値と推定式による値との差の平均、標準偏差、最大値を記載している。また、「背景の輝度値」は、平均値、標準偏差、最小値、最大値を記載している。実測値と推定式による値との差は、 $0.83\sim 1.42$ であった。そして、背景の輝度値は平均が全て 195 であり、5 回の実験中大きな輝度変化はなかったことがわかる。しかしながら、標準偏差を確認すると、 $1.09\sim 1.35$ であり、僅かではあるが、違いが確認でき、僅かながら輝度値の変化があったことがわかる。

表 A.1 実験結果

	推定式			背景の輝度値			
	平均	標準偏差	最大	平均	標準偏差	最小	最大
1 回目	0.83	0.65	2.91	195	1.16	193	198
2 回目	1.02	0.87	3.37	195	1.18	193	197
3 回目	1.22	0.94	4.31	195	1.09	193	197
4 回目	1.42	0.91	3.41	195	1.3	193	198
5 回目	1.4	1.15	5.37	195	1.35	193	197

各実験における輝度変化を確認するための結果を次に示す。まず、実測値と推定式による値を示したグラフを図 A.2, 図 A.4, 図 A.6, 図 A.8, 図 A.10 に示す。赤線が推定式による値であり、緑十字が実測値である。次に、各ステップでの推定式の変数  $r$  と背景の輝度値を表したグラフを図 A.3, 図 A.5, 図 A.7, 図 A.9, 図 A.11 に示す。緑十字が  $r$  であり、青×字が背景輝度値である。グラフの横軸がステップ数、左側の縦軸の目盛が  $r$  であり、右側の縦軸の目盛が輝度値である。輝度値が各ステップで僅かではあるが、変化していることが確認できる。

さらに、これらの図において、実測値と推定式による値との差が 3 以上となる点を赤丸で印している。この点は、5 回の実験において、計 7 点存在した。「実測値と推定式による値を示したグラフ」と「推定式の変数  $r$  と背景の輝度値を表したグラフ」との対応のため、この点に A~G までラベルを付けている。この 7 点において、輝度値の変化が確認できた点は 3 点であった。

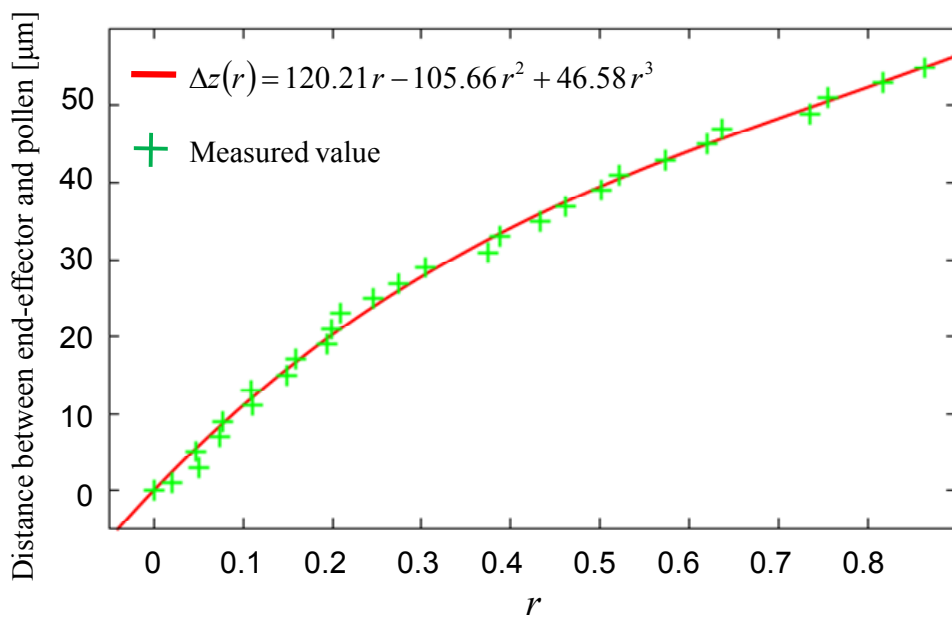


図 A.2 1回目 -実測値と推定式による値-

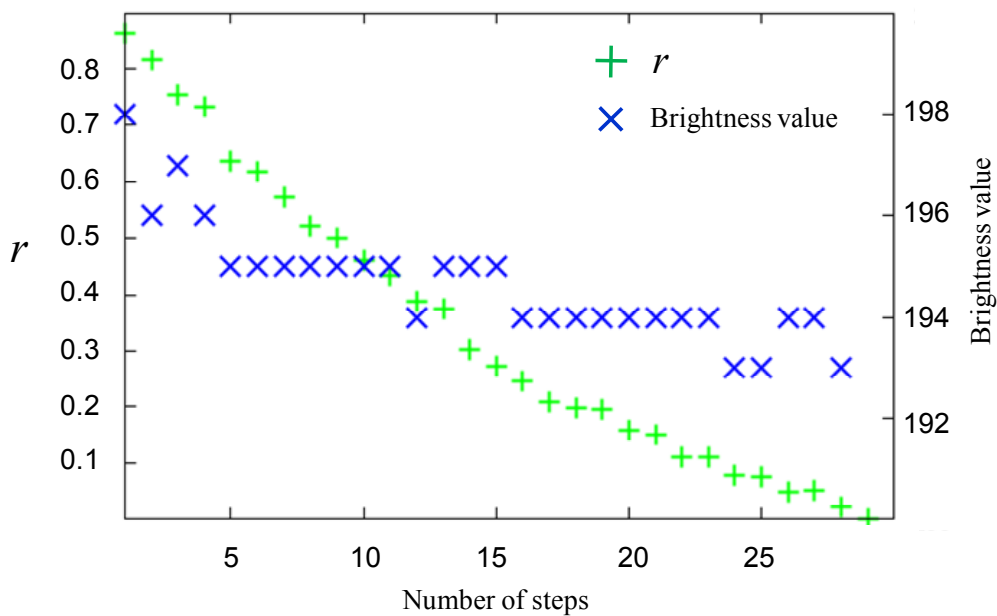


図 A.3 1回目 -推定式の変数  $r$  と背景輝度値-

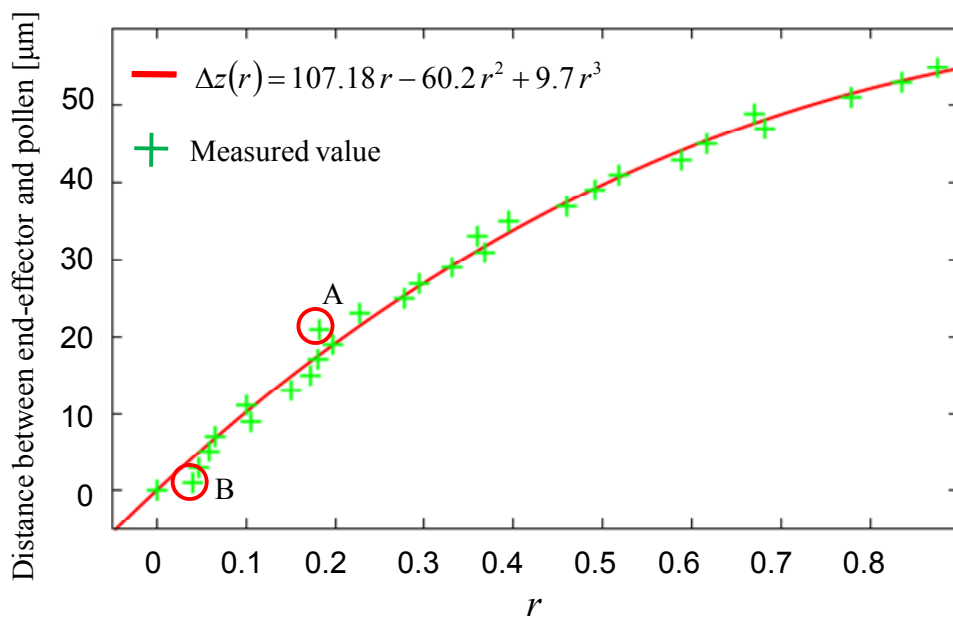


図 A.4 2回目 ー実測値と推定式による値ー

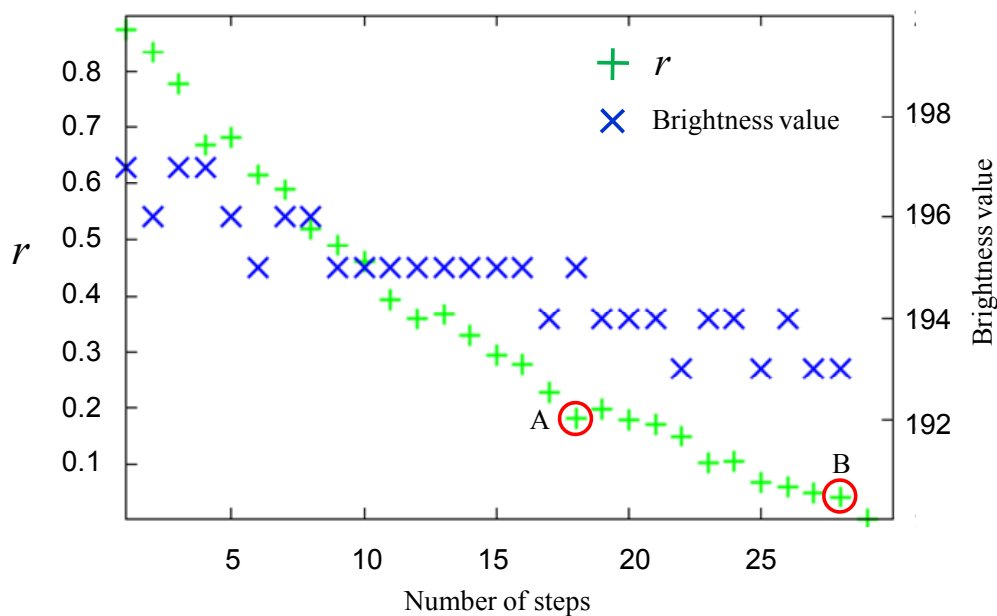


図 A.5 2回目 ー推定式の変数  $r$  と背景輝度値ー

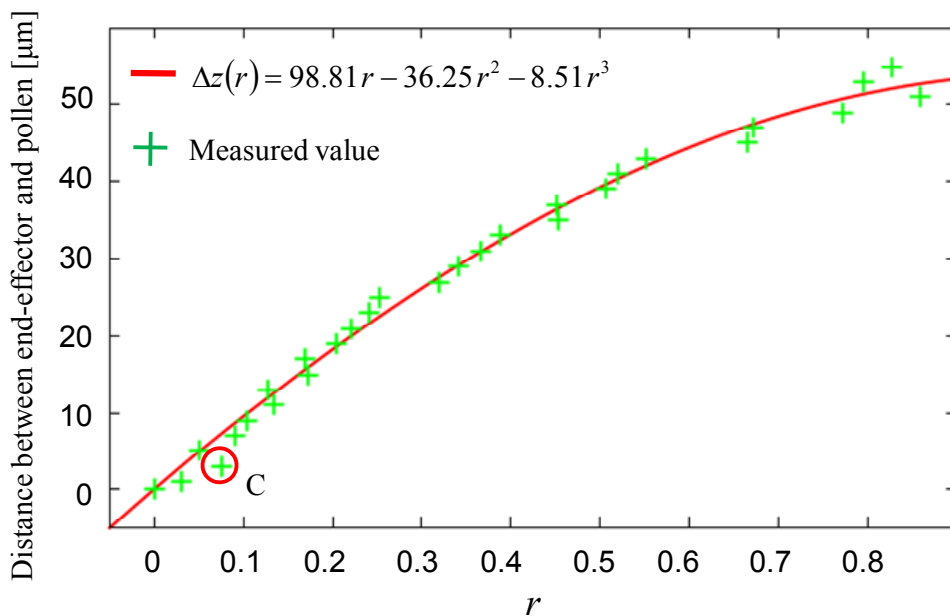


図 A.6 3回目 ー実測値と推定式による値ー

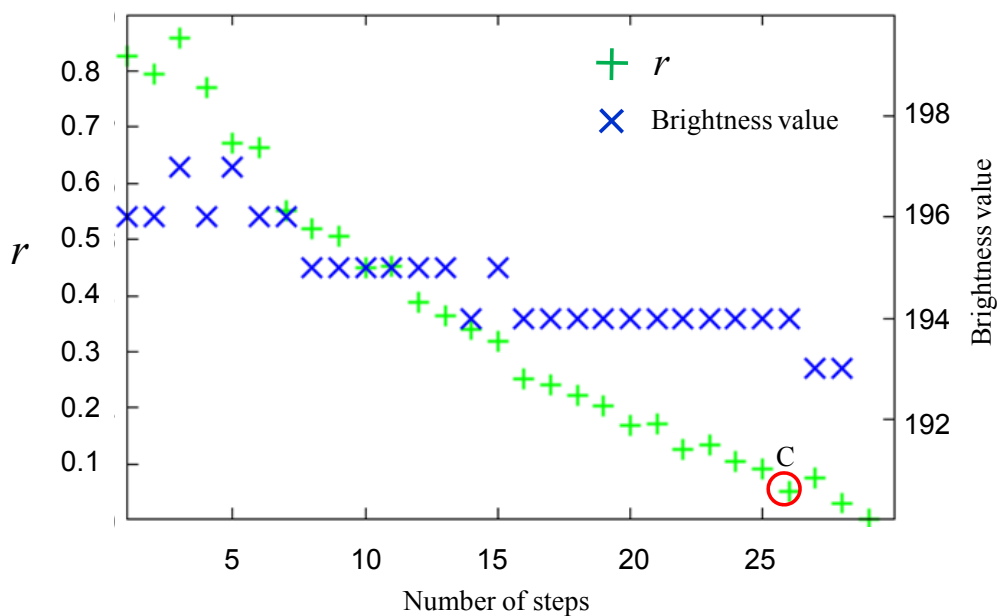


図 A.7 3回目 ー推定式の変数  $r$  と背景輝度値ー

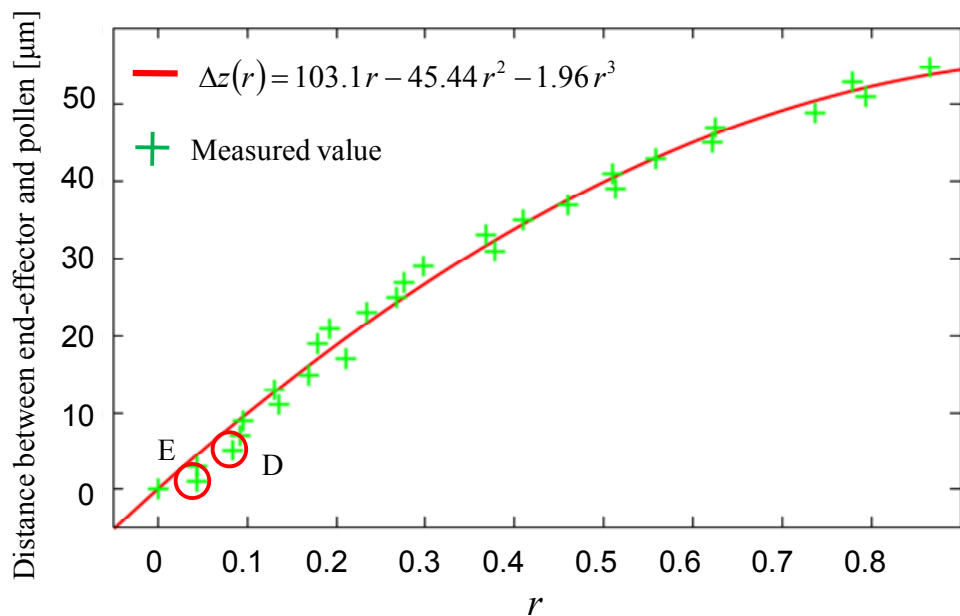


図 A.8 4回目 -実測値と推定式による値-

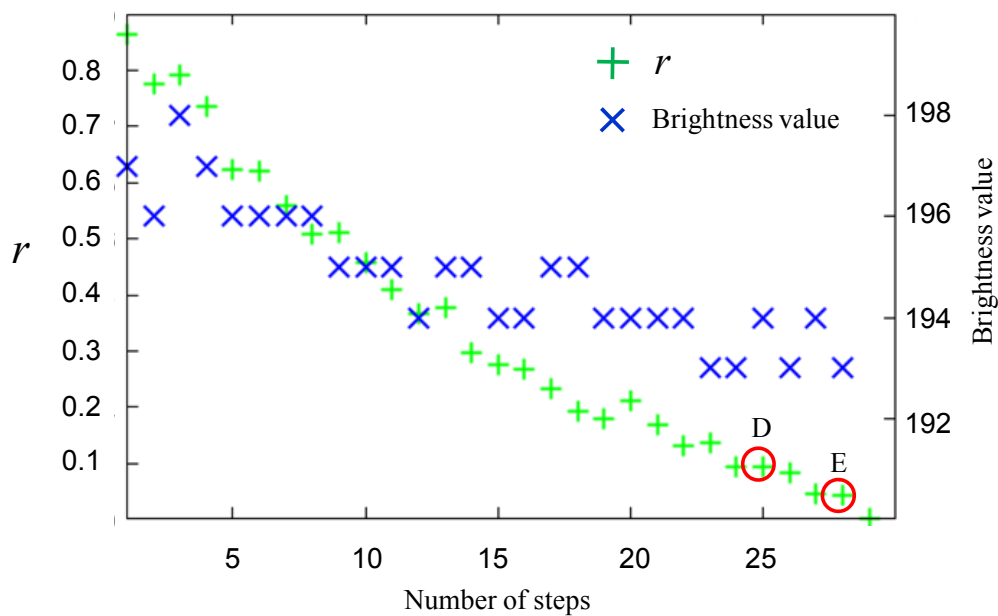


図 A.9 4回目 -推定式の変数  $r$  と背景輝度値-



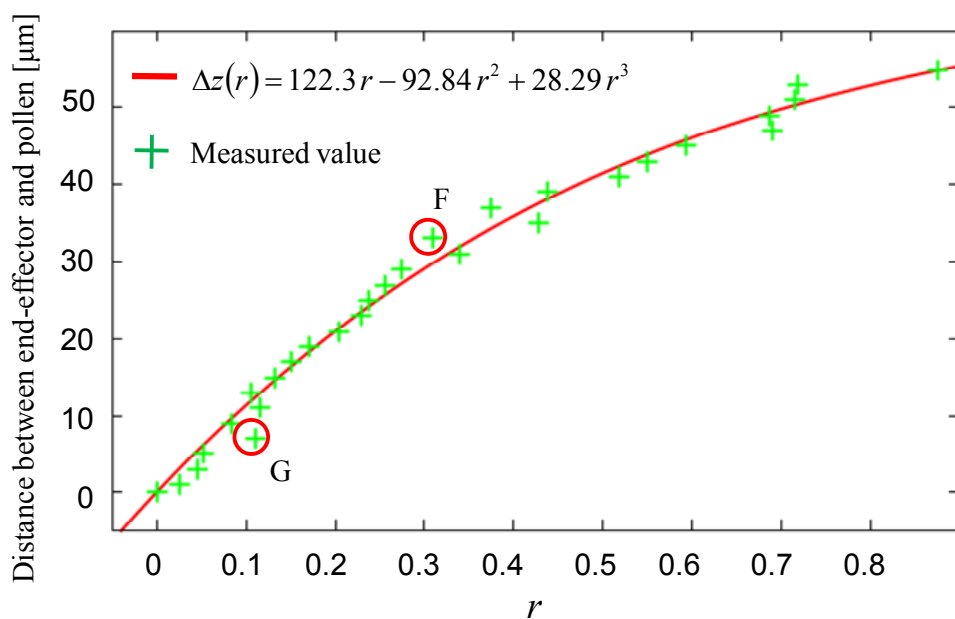


図 A.10 5回目 -実測値と推定式による値-

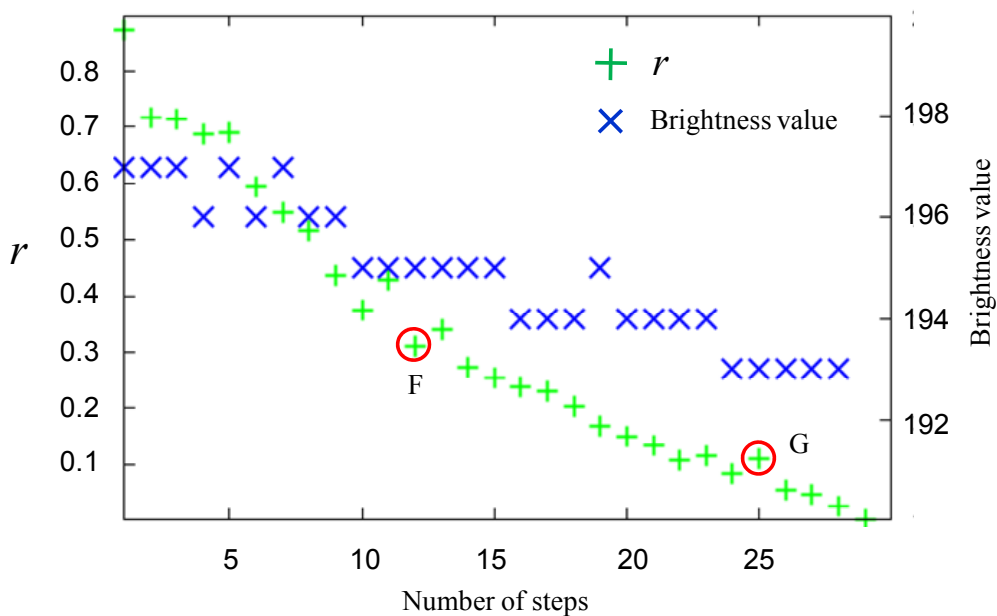


図 A.11 5回目 -推定式の変数  $r$  と背景輝度値-

#### A.1.4 考察

推定式は同一条件で導出しているが、表 A.1 の結果から、平均において、最小が 1 回目の 0.83 であるのに対して、最大が 4 回目の 1.42 であり、その差は  $0.59\mu\text{m}$  であり、影響は非常に小さい。また、5 回の推定式において、平均、標準偏差、最大から考えて、最も精度が良いのは 1 回目であり、最も精度が悪いのは 5 回目である。背景輝度値は、平均は全て 195 で同じであるが、標準偏差を確認すると、わずかだが違いが確認できる。標準偏差は、1 回目が 2 番目に小さく、5 回目は最も大きい。このことから、僅かではあるが「照明の輝度変化」が「誤差」に影響を与えていることがわかる。

また、図 A.2～図 A.11 から、実測値と推定式による値との差が  $3\mu\text{m}$  以上となる点は 7 点存在し、輝度変化が確認できた点は 3 点であった。すべての点において、輝度値の変化は確認できなかったが、半分の点において輝度値の変化が確認できたことから、照明の輝度の変化による影響を非常に僅かだが、受けていることが確認できた。

#### A.1.5 まとめ

- 「照明の輝度変化」による「実測値と推定式による値との差」への影響を実験において確認した結果、僅かだが影響を受けることがわかった。
- 影響がわずかである理由として、次の 2 点が理由として考えられる。
  1. 本システムの照明は輝度変化が小さいこと
  2. 本奥行き推定方法は、2 つの物体のボケ幅の差を利用していることから、照明の輝度変化があったとしても、2 つの物体のボケ幅にほぼ同じように影響が発生する。このため、ボケ幅の差に影響は小さいものとなる。
- 条件が同一にして行った 5 回の推定式導出実験において、「実測値と推定式による値との差」は、最小が 0.83 であり、最大が 1.42 であった。この差が推定式導出時における照明の輝度変化の影響と考えられるが、その差は  $0.59\mu\text{m}$  であり、影響は非常に小さい。本実験装置のマイクロマンピュレータは、分解能が  $1\mu\text{m}$  であるためこの影響はないといえる。
- 上記から、本実験装置と同等の装置を用いる場合、照明の輝度変化に対する評価は不要だといえる。しかしながら、本装置よりも輝度変化が激しい装置を用いた場合、評価が必要である。

## A.2 各項の符号と距離との関係の調査実験

本章では、「微小物体とエンドエフェクタの距離」による「各項の定数の符号」への影響を実験において、確認する。

推定式元となる式 (2.9) は曲線であるため、推定式である式 (2.10) の定数を導出する時、微小物体とエンドエフェクタの距離が小さい場合、適切な符号が算出されないことが予測できる。そこで、微小物体とエンドエフェクタの距離を変えて、推定式を導出したとき、適切な符号が算出される距離を調査する。

### A.2.1 実験目的

エンドエフェクタの初期位置を変えることにより、エンドエフェクタと微小物体との距離を変え、各距離において、推定式を導出する。このとき、各項の符号が正しく算出されているかを確認する。

### A.2.2 実験方法および条件

実験方法および条件について述べる。

- 実験装置は、第 2.4.2 節で述べた装置を使用する
- 対象物は第 2.4.3 節で述べた胡桃の花粉を使用する
- ボケ幅の抽出方法は、第 2.4.5 節で述べた方法を使用する
- エンドエフェクタの初期位置は、花粉から約  $20\mu\text{m}$ ,  $30\mu\text{m}$ ,  $40\mu\text{m}$ ,  $50\mu\text{m}$ ,  $60\mu\text{m}$ ,  $70\mu\text{m}$  離れた位置とし、それぞれ推定式を導出する
- 花粉の初期状態は、ボケが生じた状態とする
- エンドエフェクタの 1 ステップの移動量は  $2\mu\text{m}$  とする
- 推定式は、第三項までを使用する
- 3 個の花粉に対して実験を行う

## A.2.3 実験結果

実験結果として、正しい符号が算出されたか否かと、各項の値 ( $c_1, c_2, c_3$ ), 実測値と推定式による値との差の平均, 標準偏差, 最大値を表 A.2, 表 A.3, 表 A.4 に示す。花粉 1 に対する結果が表 A.2, 花粉 2 に対する結果が表 A.3, 花粉 3 に対する結果が表 A.4 である。表の「符号」は、正しい符号が算出された場合「○」であり、正しくない場合「×」で記載した。

表 A.2, 表 A.3, 表 A.4 から、エンドエフェクタと微小物体との距離が  $60\mu\text{m}$  程度以上の場合、符号が正しく算出されていることが確認できた。距離が  $40\mu\text{m}$ ,  $50\mu\text{m}$  程度の場合、符号は正しく算出される場合と正しく算出されない場合が存在し、そして、距離が  $20\mu\text{m}$ ,  $30\mu\text{m}$  の場合、符号は正しく算出されないことが確認できた。つまり、距離が小さい場合、符号は正しく算出されない、そして、距離が大きくなれば、符号は正しく算出されることがわかった。

なお、実測値と推定式による値との差の平均, 標準偏差, 最大値は、どの距離でも、ほぼ同様に小さい値となった。

表 A.2 花粉 1 に対する結果

距離	符号	$c_1$	$c_2$	$c_3$	平均	標準偏差	最大値
20	×	10.1	63.78	-49.08	1.1	0.99	3.46
30	×	36	47	-54.65	0.98	0.81	2.38
40	×	39.59	53.89	-56.04	0.96	0.67	2.68
50	×	66.33	7.01	-21.92	0.91	0.59	2.28
60	○	119.97	-75.6	20.49	0.97	0.83	2.76
70	○	115.88	-65.24	17.22	1.57	1.15	3.87

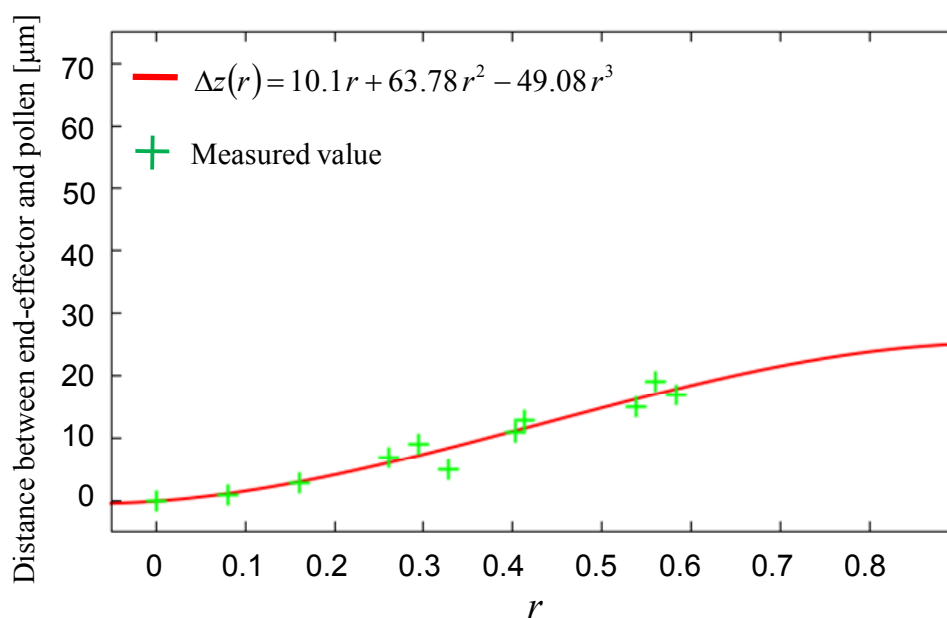
表 A.3 花粉 2 に対する結果

距離	符号	$c_1$	$c_2$	$c_3$	平均	標準偏差	最大値
20	×	21.95	27.18	-15.17	0.69	0.52	1.54
30	×	17.82	68.21	-66.17	0.99	0.61	2.15
40	○	64.44	-36.18	25.63	1.7	1.05	4.16
50	○	109.29	-91.31	42.7	1.06	0.72	3.35
60	○	113.3	-62	7.95	1.17	0.88	3.1
70	○	166.58	-159.93	66.27	1.59	1.43	6.24

表 A.4 花粉 3 に対する結果

距離	符号	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	平均	標準偏差	最大値
20	×	-7.33	129.89	-115.44	1.09	1.02	3.6
30	×	24.09	51.67	-35.74	0.56	0.54	2.01
40	×	31.26	81.45	-81.26	1.37	1.05	4.27
50	×	60.4	13.73	-22.27	1.23	0.79	3.02
60	○	90.01	-35.65	7.54	0.99	0.63	2.01
70	○	120.79	-68.29	16.29	1.19	0.87	2.76

また、花粉 1 における実測値と推定式による値を示したグラフを図 A.12～図 A.17 に示す。本実験は、推定式の精度を確認するための実験ではないため、花粉 1 のみ結果を示す。図 A.12 がエンドエフェクタと花粉 1 との距離が約 20 $\mu\text{m}$  のときの結果であり、図 A.13, 図 A.14, 図 A.15, 図 A.16, 図 A.17 がそれぞれ距離, 30 $\mu\text{m}$ , 40 $\mu\text{m}$ , 50 $\mu\text{m}$ , 60 $\mu\text{m}$ , 70 $\mu\text{m}$  のときの結果である。

図 A.12 花粉 1—距離 20 $\mu\text{m}$

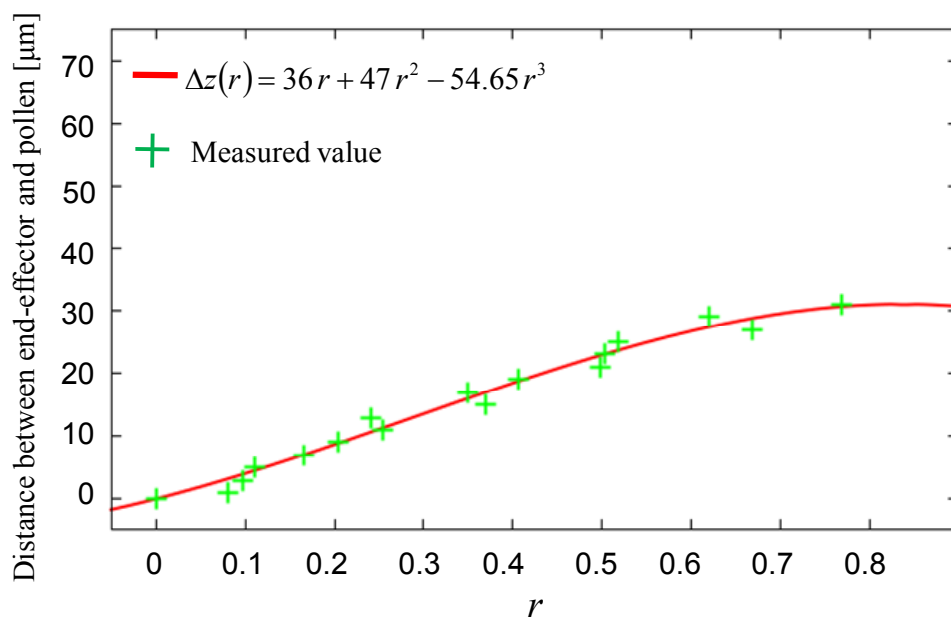


図 A.13 花粉 1—距離  $30\mu\text{m}$

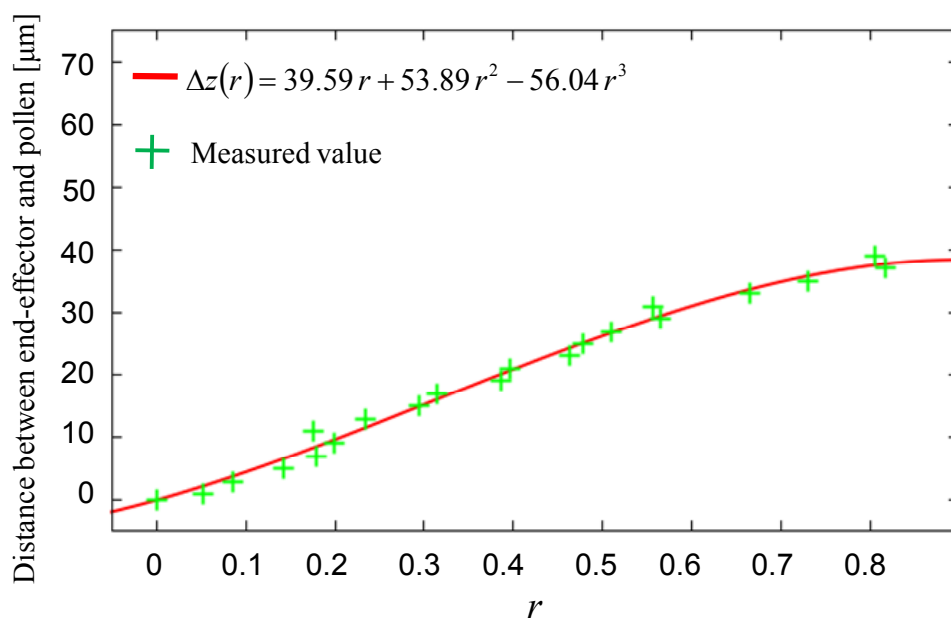
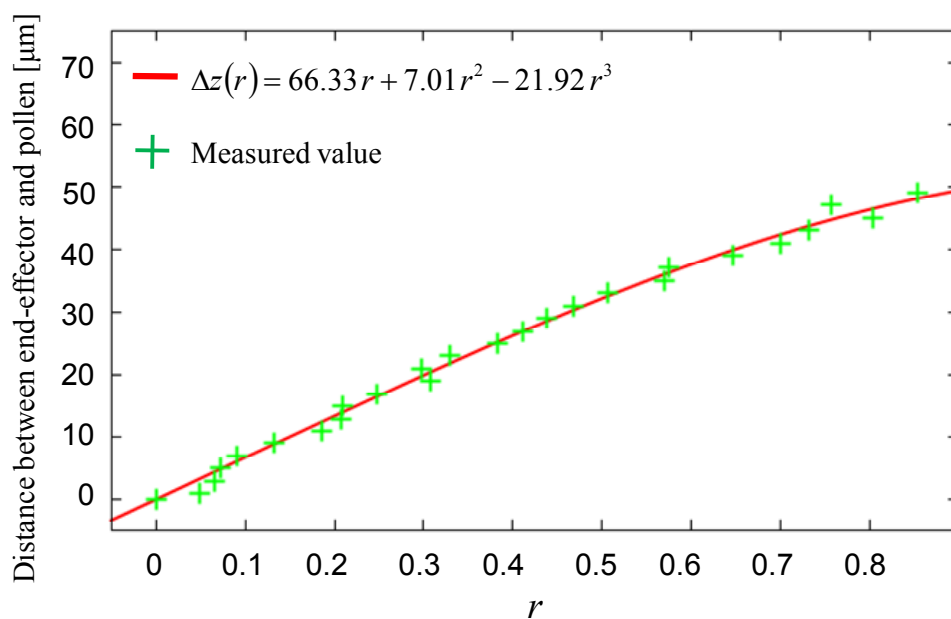
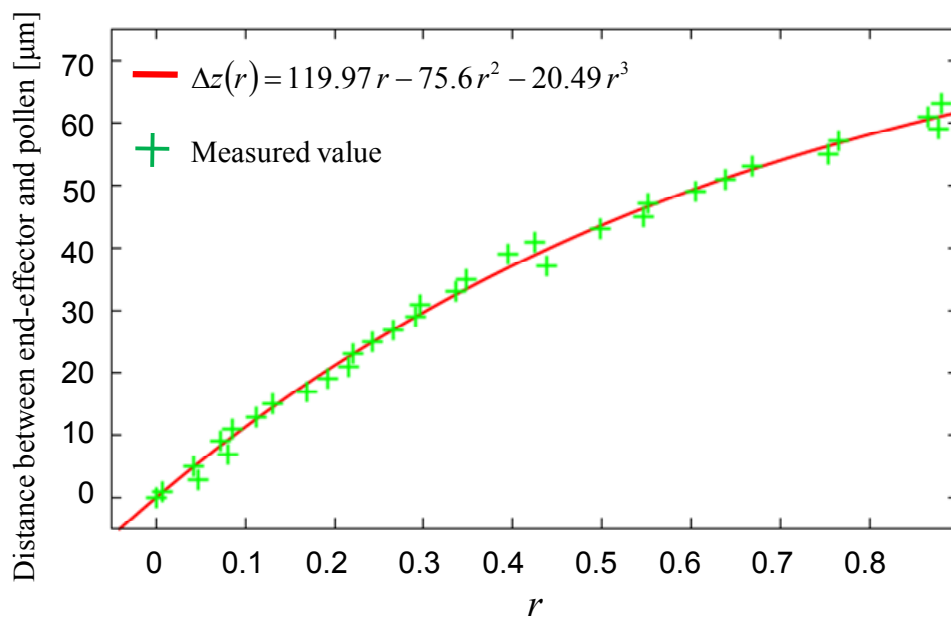


図 A.14 花粉 1—距離  $40\mu\text{m}$

図 A.15 花粉 1—距離  $50\mu\text{m}$ 図 A.16 花粉 1—距離  $60\mu\text{m}$

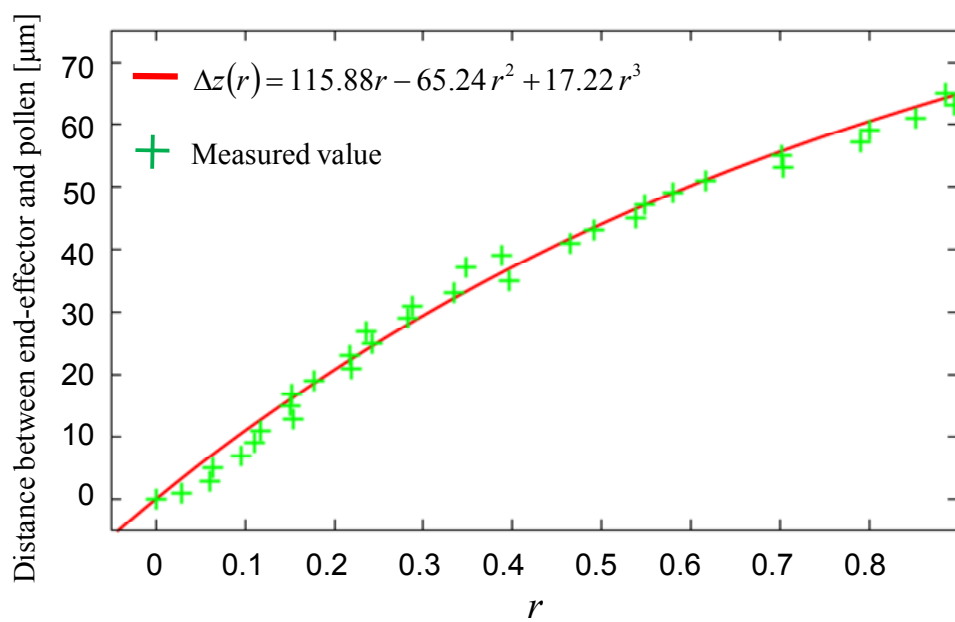


図 A.17 花粉 1—距離  $70\mu\text{m}$



### A.2.4 考察

推定式の各項の符号は、エンドエフェクタと微小物体との距離が小さい場合、符号は正しく算出されない、そして、距離が大きくなれば、符号は正しく算出されることが実験により確認できた。また、距離  $40\mu\text{m}$  と  $50\mu\text{m}$  のときのように、推定式を導出する度に、符号が正しく算出されたり、間違って算出されたりする距離も存在する。したがって、推定式導出時において、各項の符号の評価は必須である。

また、推定式導出時において、距離が大きくなれば正しい符号が算出されることから、符号が正しく算出されなかったとき、再度、エンドエフェクタの初期位置を微小物体から遠ざけるように変えることにより、最終的に正しい符号が算出されるようになる。

### A.2.5 まとめ

- 「微小物体とエンドエフェクタの距離」による「各項の定数の符号」への影響を実験において、確認した結果、エンドエフェクタと微小物体との距離が小さい場合、符号は正しく算出されない、そして、距離が大きくなれば、符号は正しく算出されることがわかった。
- 上記から、推定式導出時には各項の符号の評価が必須である。
- 推定式導出時において、符号が正しく算出されなかったとき、再度、エンドエフェクタの初期位置を微小物体から遠ざけるように変えることにより、最終的に正しい符号が算出されるようになる。

# 本研究に関する発表論文

## 学会誌論文

1. 大澤茂治, 風間晋吾, 嘉藤俊介, 渡邊信一, 尾崎功一, 石川洋平, 田中稔, 並木俊郎, 諏訪芳久, 廣瀬晃, "画像処理による円筒形状製品の傷検査装置の開発", 精密工学会誌, Vol.76, No.8, pp.955–959, 2010.
2. 大澤茂治, 石濱貴徳, 尾崎功一, "マイクロ視野におけるボケ幅の差を用いた奥行き方向の距離推定", 精密工学会誌, Vol.77, No.5, pp.483–489, 2011.

## 国際会議論文

1. S. Osawa, K. Ozaki, "Automatic Pickup and Release of Particle by Depth Estimation Method with Micromanipulators for Particle Sorting System", *in 2011 Proc. of the IEEE/SICE International Symposium on System Intergration*, 2011.

## 口頭発表論文

1. 石濱貴徳, 大澤茂治, 尾崎功一, "マイクロ視野における奥行き方向位置推定手法の提案", 2010 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, H08, pp.621–622, 2010.
2. 大澤茂治, 石濱貴徳, 尾崎功一, "マイクロ視野における三次元位置計測による自動 Pick 動作", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2A2–A04, 2010.
3. ジョハリ ビン ジャミル コフリ, 大澤茂治, 岡崎敦, 尾崎功一, "マイクロマニピュレータを用いた砥粒評価方法の提案", 2011 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, L03, pp.871–872, 2011.
4. 大澤茂治, 岡崎敦, 尾崎功一, "マイクロマニピュレータを用いた三次元計測による微小物体の自動把持と解放", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 1A2–B05, 2011.