

令和2年度
修士学位論文

単結晶シリコン製造装置における
運動モデルを用いた晶癖線の検出

Detection of habit lines in silicon manufacturing
equipment using motion model

1235055 上田 史織

指導教員 栗原 徹

2021年3月1日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻
情報学コース

要 旨

単結晶シリコン製造装置における 運動モデルを用いた晶癖線の検出

上田 史織

コンピュータや家電製品に使用されている半導体の製造に最も多く使用されている材料は単結晶シリコンである。単結晶シリコン製造で重要な点はシリコンが無転位状態な点でこの時に晶癖線と呼ばれる細い線が出現する。転位回避のために、シリコンを細くし晶癖線出現までその状態を保つ工程を導入した方法が提案された。したがって、この工程で晶癖線を安定して発見することが製造において重要だ。現在晶癖線は目視で確認されておりその場合の製造成功率は 66% である。

そこで我々は、この工程の自動化のために Difference of Gaussian による晶癖線検出を行ってきた。本研究では、従来手法を利用して晶癖線出現時刻発見のために、移動平均と事前知識を導入した粒子フィルタの手法を提案する。移動平均は、各フレームより手前の 1 分間の従来手法での検出の有無を結果に用いる。粒子フィルタの粒子は角度情報を持たせており、そこから座標を算出して従来手法の結果を使用し各粒子の尤度を計算する。その後尤度に応じてリサンプリングし、これを繰り返す。結果には各フレームの最大尤度を使用する。

提案手法を用いた結果、晶癖線が出現時に粒子フィルタの最大尤度値は約 0.35 以上になっていることが確認できた。したがって、閾値を設けて粒子フィルタを使用することで引き上げタイミングの自動化が行える可能性があるといえる。また粒子フィルタは粒子が収束して誤検出と重なっていない場合尤度が大きくなっていないことを確認できた。これより、粒子フィルタは DoG での誤検出にも対応することが可能であることが判明した。

キーワード 晶癖線, 物体検出, Difference of Gaussian, ハフ変換, 粒子フィルタ

Abstract

Detection of habit lines in silicon manufacturing equipment using motion model

Shiori UETA

Single crystal silicon is the most commonly used material for manufacturing semiconductors used in computers and home appliances. An important part of the production of single-crystal silicon is that silicon is dislocation-free, and thin lines called crystal habit lines appear at this time. In order to avoid dislocations, a method was introduced in which silicon was thinned and a process of waiting for the appearance of crystal habit lines was introduced. Therefore, it is important to find stable crystal habit lines in this process, and it is now done manually. Currently, the crystal habit line is visually confirmed, and the manufacturing success rate in that case is 66%.

In order to automate this process, we have been using the Difference of Gaussian to detect the crystal habit lines. In this study, we propose a moving average method and a particle filter method using prior knowledge in order to determine the appearance time of crystal habit lines using the conventional method. For the moving average method, the presence or absence of detection by the conventional method is measured for 1 minute before the frame. The particles of the particle filter method have angle, and the coordinates are calculated from them, and the likelihood of each particle is calculated using the results of the conventional method. After that, resampling is performed according to the likelihood, and this is repeated. The maximum likelihood of each frame is used for the result.

As a result of using the proposed method, it was confirmed that the maximum likelihood value of the particle filter was about 0.35 or more when the crystal habit line appeared. Therefore, it can be said that there is a possibility that the pull-up timing can be automated by setting a threshold value and using a particle filter. Furthermore, it was confirmed that the likelihood does not increase when the particles do not converge and the false detection does not overlap with the particles. From this, it became clear that the particle filter can handle false positives of DoG.

key words Crystal habit lines, Object detect, Difference of Gaussian, Hough transform, Particle Filter Method

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	研究背景と目的	1
1.2	論文の構成	3
第 2 章	シリコン製造に関する予備知識	4
2.1	チョクラルスキー (CZ) 法	4
2.2	晶癖線検出の難しさ	5
第 3 章	関連技術	8
3.1	ガウシアンフィルタ	8
3.2	Difference of Gaussian(DoG) 画像	9
3.3	フーリエ変換	11
3.4	ハフ変換	11
3.5	粒子フィルタ	12
第 4 章	提案手法	14
4.1	前提条件	14
4.2	Difference of Gaussian(DoG) による晶癖線の検出	14
4.2.1	DoG 画像の作成	14
4.2.2	画像から晶癖線の検出	15
4.3	検出結果を利用した移動平均	17
4.4	運動モデルを導入した粒子フィルタ	17
4.4.1	粒子フィルタを用いた晶癖線の位置推定	18
4.4.2	粒子フィルタに必要な円情報の取得	19

目次

第 5 章	実験	21
5.1	検証	21
5.2	結果	22
第 6 章	まとめ	33
	謝辞	34
	参考文献	35

目次

1.1	チョコラルスキー法の炉の構造図	2
1.2	シリコン表面に出現した晶癖線	3
2.1	CZ 法による製造の流れ	5
2.2	炉に取り付けられたカメラの画像. (a) 元画像, (b) 64×64 ピクセルに切り 取った画像 (晶癖線なし) (c) 64×64 ピクセルに切り取った画像 (晶癖線あり)	6
2.3	メニスカスの中心座標の時間的变化	7
3.1	入力画像	9
3.2	$\sigma = 3$ のガウシアンフィルタ適用後の画像	9
3.3	$\sigma = 6$ のガウシアンフィルタ適用後の画像	9
3.4	ガウス分布型バンドパスフィルタ	10
3.5	DoG 画像	10
3.6	粒子フィルタの流れ	13
4.1	入力画像	16
4.2	DoG 画像	16
4.3	DoG 画像の二値画像	16
4.4	膨張処理後の画像	16
4.5	二値画像	20
4.6	メニスカスより上の画素を白にした画像	20
4.7	ハフ変換で求めた円	20
5.1	あるフレームの各角度の尤度の合計値	22
5.2	DoG 画像による検出結果 (1)	23

図目次

5.3 DoG 画像による移動平均の結果 (1)	23
5.4 晶癖線最大尤度の平均値の結果 (1)	24
5.5 DoG 画像による検出結果 (2)	25
5.6 DoG 画像による移動平均の結果 (2)	25
5.7 晶癖線最大尤度の平均値の結果 (2)	25
5.8 DoG 画像による検出結果 (3)	26
5.9 DoG 画像による移動平均の結果 (3)	26
5.10 晶癖線最大尤度の平均値の結果 (3)	27
5.11 人工的データに対する DoG による検出結果	28
5.12 人工的データに対する晶癖線最大尤度の平均値の結果	28
5.13 最大尤度が上昇しなかった誤検出データ	30
5.14 最大尤度が上昇した誤検出データ	32

表目次

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景と目的

半導体はコンピュータや家電製品、太陽電池など多くの製品で用いられている。半導体の製造に最も多く使用されている材料は単結晶シリコンである。単結晶シリコンの製造方法はいくつもある。チョクラルスキー法 (CZ 法) とフローティングゾーン法は製造方法の一つであり、特にチョクラルスキー法はシリコンを大量に生産することが可能なため、最も一般的に用いられてる製造方法である [1]。チョクラルスキー法によるシリコンを成長させる技術は Teal と Buehler によって開発された [2]。またチョクラルスキー法で造られているシリコンは VLSI 製品だけではなく、太陽電池製品にも使用されている [3]。図 1.1 はチョクラルスキー法の炉の構造図を表している。

チョクラルスキー法は 70 年前に開発されているが現在もコストを削減し、生産性を向上させるために改良が進められている。C.W.Lan らは太陽電池の需要が急騰しているのに合わせて生産コストを削減しなければならないという課題に対して、ホットゾーンの設計を改良することと複数回引き上げ法を用いた結晶の成長法について提案した [3]。ホットゾーンを改良することで電力消費の低下や結晶の高速成長の可能性を示した。しかし、ホットゾーンの改良には限界があるため今後は複数回引き上げ法の必要性についても述べていた。高梨らはシリコン引き上げ速度を保ちつつ製造を安定させるために結晶の断面形状をオンラインで測定するための技術を開発した [4]。さらに、炉内の構造に依存しない測定を実現するためにシリコン製造時にカメラに映るフュージョンリングを用いた結晶の断面形状測定方法を開発した [5]。

1.1 研究背景と目的

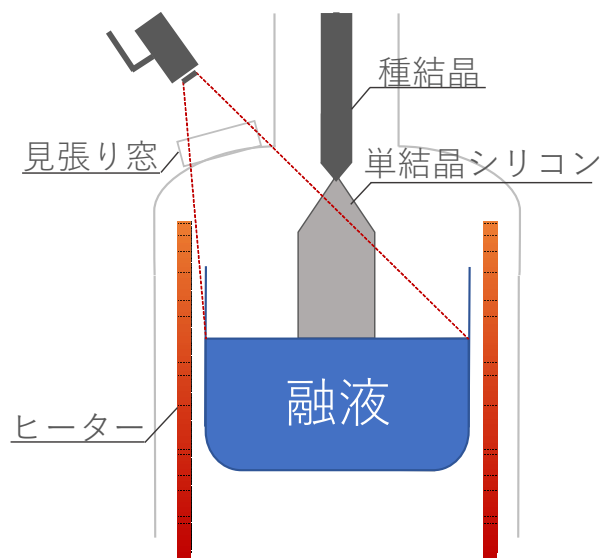


図 1.1 チョクラスキー法の炉の構造図

単結晶シリコンを製造する上で重要な点はシリコンが無転位であることだ。シリコンが無転位の時，図 1.2 のように晶癖線と呼ばれる細い線が等間隔で出現する。晶癖線の出現は，シリコン内部のシリコン原子が規則的に並んでいることを表す。しかし，転位は種結晶を融液に浸した時に起こる熱衝撃などの環境に敏感である。もし製造中に晶癖線が消えてしまった場合，単結晶シリコンの製造現場ではそのシリコンの製造を中止している。

転位を回避するために，W.C.Dash らによってチョコラルスキー法の製造工程にネックプロセスを導入した方法が提案された [6]。これはシリコンを細くして成長させることで転位を回避する。成長させたシリコンに晶癖線が出現した後，その状態を維持しつつシリコンの直径を必要な大きさまで拡大する。したがって，ネックプロセスで晶癖線を安定して発見することが重要である。

製造現場では図 1.1 に取り付けられたカメラの映像，もしくは見張り窓から晶癖線を確認している。しかし，晶癖線の出現は不規則的であるため，現場では定期的に晶癖線の確認が行われている。人が監視した時の単結晶シリコンの製造成功率は約 66% である。したがって，電気代などのコストがかかってしまう。

そこで，我々はこれまでネックプロセスの製造工程を自動化するために必要な晶癖線の検出を異方性を持つガウシアンフィルタを用いた Difference of Gaussian 画像より晶癖線検出

1.2 論文の構成

を行ってきた。本研究は時系列情報から晶癖線が安定して出現しているタイミングを発見するために従来の手法を利用し、1分間における移動平均と事前知識を導入した粒子フィルタの手法を提案し、二つの比較を行う。



図 1.2 シリコン表面に出現した晶癖線

1.2 論文の構成

本論文の構成は第2章で単結晶シリコン製造に関する予備知識について記述し、第3章で本手法で用いた関連技術について説明し、第4章で本手法について述べる。第5章では本手法による検証とその結果について記述し、第6章では本論文のまとめについて述べる。

第 2 章

シリコン製造に関する予備知識

本章ではシリコン製造方法と晶癖線検出の難しさについて記述する。

2.1 チョクラルスキー (CZ) 法

チョコラルスキー法によるシリコンの製造方法について説明する。まず、製造材料の多結晶シリコンを石英ルツボに入れて約 1409 度のヒーターで熱した後、融液に種結晶の先端を浸し、種結晶を回転しつつ引き上げることで一つの種結晶から大量のシリコンを製造している。

ネックプロセスを導入したチョコラルスキー法による単結晶シリコンの製造方法は図 2.1 の通りである。まず、減圧されたアルゴンガスを流しつつ多結晶シリコンを溶融し、気泡を排出するために融液の温度を保つ。次に、種結晶とメニスカスの接触を確立させるまで種結晶を融液に浸す。その後、種結晶を引き上げていきネックと呼ばれる結晶直径が 3mm 程度の細い部分を何度も形成する。転位状態の原因の一つである熱衝撃を最低限に抑えるため、ネックの直径を徐々に減少させていき、シリコンを製造する。シリコンが無転位であることを確認後は、直径を広げていきショルダー部分を製造する。必要な直径まで製造した後、引き上げ速度を保ちつつシリコン本体を製造していく。本体製造後は、徐々に直径を減少させてシリコンの尾部分を製造する。

2.2 晶癖線検出の難しさ

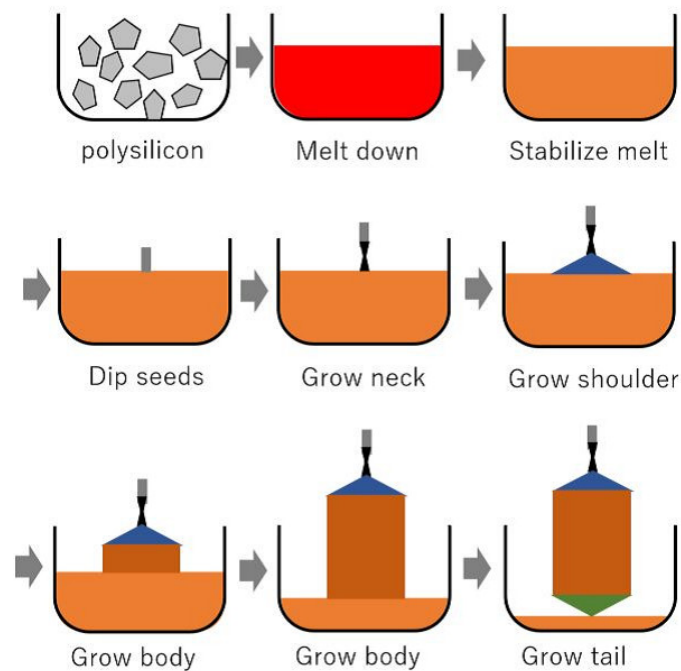


図 2.1 CZ 法による製造の流れ

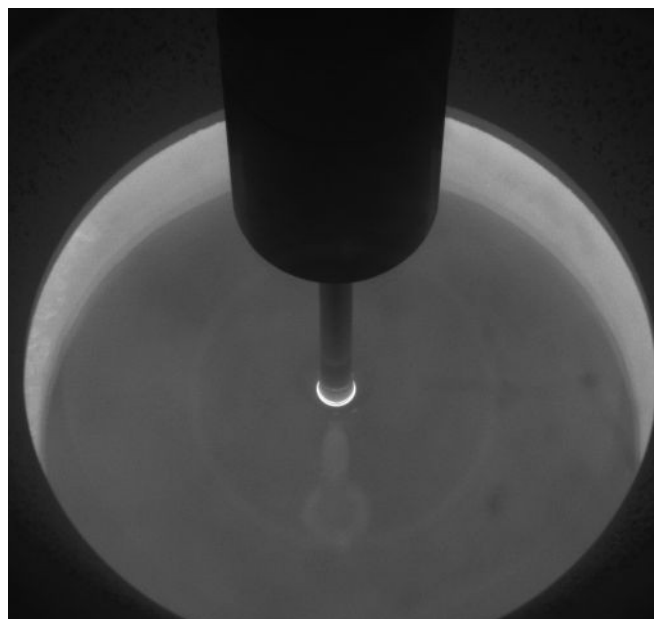
2.2 晶癖線検出の難しさ

晶癖線の検出には大きく分けて二つの難しさが存在する。一つは、画像に映る晶癖線のサイズである。図 2.2(a) は炉に取り付けているカメラから撮影された画像と画像のメニスカス周辺を 64×64 で切り出した画像を表している。図 2.2(a) のように全体を撮影しているのはシリコン本体を製造時に直径を測定するためである。節 2.1 で説明したように、ネックは直径を徐々に減少させてから製造しているため、メニスカスは画像全体に比べて画像領域が狭い。メニスカスの大きさは約 30×30 ピクセルである。図 2.2(c) の突出した白い画素が晶癖線で、画素は約 1 から 2 ピクセルである。図 2.2(b) と比較しても晶癖線が非常に小さいことは明らかである。

もう一つの難しさはシリコンが偏心していることである。回転しているシリコンは長いワイヤーで吊り下げられていて、小さな偏心は避けられない。図 2.3 は 2 分間の撮影画像におけるメニスカスの中心座標の時間的変化を表している。このグラフの縦軸と横軸は画素の位置を表している。グラフよりシリコンが偏心していることは明らかである。したがってフ

2.2 晶癖線検出の難しさ

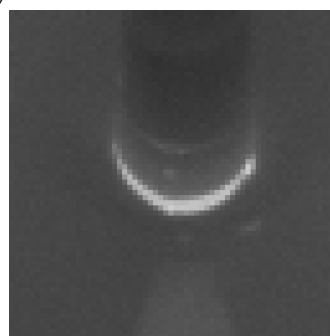
フレーム間差分による晶癖線検出は難しい。



(a)



(b)



(c)

図 2.2 炉に取り付けられたカメラの画像. (a) 元画像, (b) 64×64 ピクセルに切り取った画像 (晶癖線なし) (c) 64×64 ピクセルに切り取った画像 (晶癖線あり)

2.2 晶癖線検出の難しさ

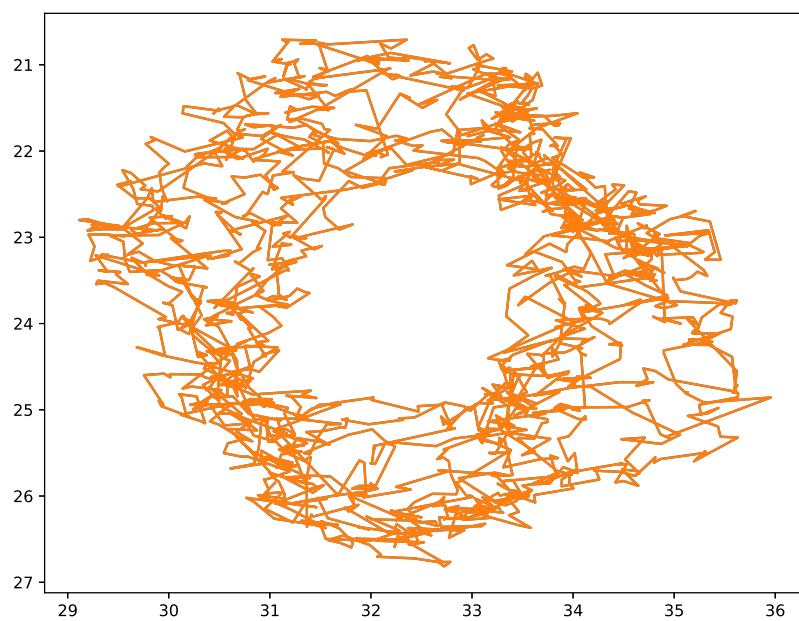


図 2.3 メニスカスの中心座標の時間的变化

第 3 章

関連技術

3.1 ガウシアンフィルタ

画像の濃淡変化を滑らかにする処理を平滑化という。平滑化フィルタには様々な種類がある。その一つがガウシアンフィルタであり、ガウシアンフィルタはガウス分布をフィルタに使用するため、高周波成分に対しても 0 に近い値を積に用いる。そのため、高周波成分の画素値を残すことが可能である。

ガウシアンフィルタの式は式 3.1 で表される。 x と y は画素位置を表しており、ガウス分布の標準偏差 σ の値を変えることでぼかしの強さを変化させることが可能である。標準偏差 σ の値が大きければ、注目画素は周囲の画素の影響を大きく受けて、 σ の値が小さければ、周囲の画素の影響をあまり受けない。

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.1)$$

図 3.1 は入力画像であり、個の画像に対して標準偏差 $\sigma = 3$ のガウシアンフィルタ処理と標準偏差 $\sigma = 6$ のガウシアンフィルタ処理を行う。図 3.2 は入力画像に標準偏差 $\sigma = 3$ のガウシアンフィルタ処理を行った結果で、図 3.3 は入力画像に標準偏差 $\sigma = 6$ のガウシアンフィルタ処理を行った結果である。

図 3.3 は図 3.2 と比較して全体的にぼけた画像になっている。これより、 σ の値を大きくすることは、濃淡変化がより滑らかな画像を得ることになるといえる。

3.2 Difference of Gaussian(DoG) 画像



図 3.1 入力画像

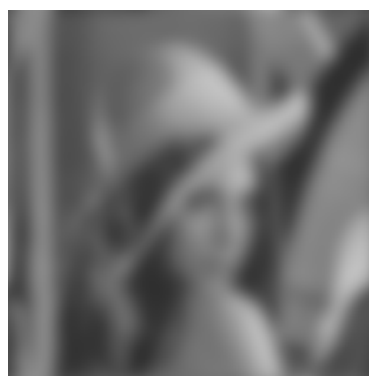
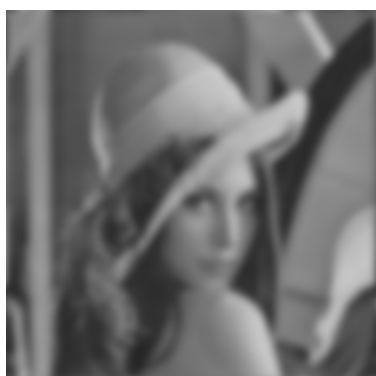


図 3.2 $\sigma = 3$ のガウシアンフィルタ適用後の画像 図 3.3 $\sigma = 6$ のガウシアンフィルタ適用後の画像

3.2 Difference of Gaussian(DoG) 画像

スケールが異なるガウシアンフィルタを使用した画像の差分画像を Difference of Gaussian(DoG) 画像という。スケールと標準偏差 σ の積が小さいガウシアンフィルタを施した画像を用いることで画素の濃淡変化を滑らかにし、その画像に対してスケールと標準偏差 σ の積が大きいガウシアンフィルタ画像との差分を取ることでエッジなどの特徴を抽出するために使用されている。DoG は特定の周波数成分以外を抑え込むため、中間の周波数領域の画素のみ残すバンドパスフィルタと同じ働きをしているため、ガウス分布型のバンドパスフィルタである。図 3.4 は 128 を平均としている標準偏差が 3 のガウス分布と標準偏差が 6 のガウス分布の差分を取ったものである。図 3.4 より、特定の周波数領域でグラフの値が大

3.2 Difference of Gaussian(DoG) 画像

きくなっているため、バンドパスフィルタと同じ働きをしていることが明らかだ。

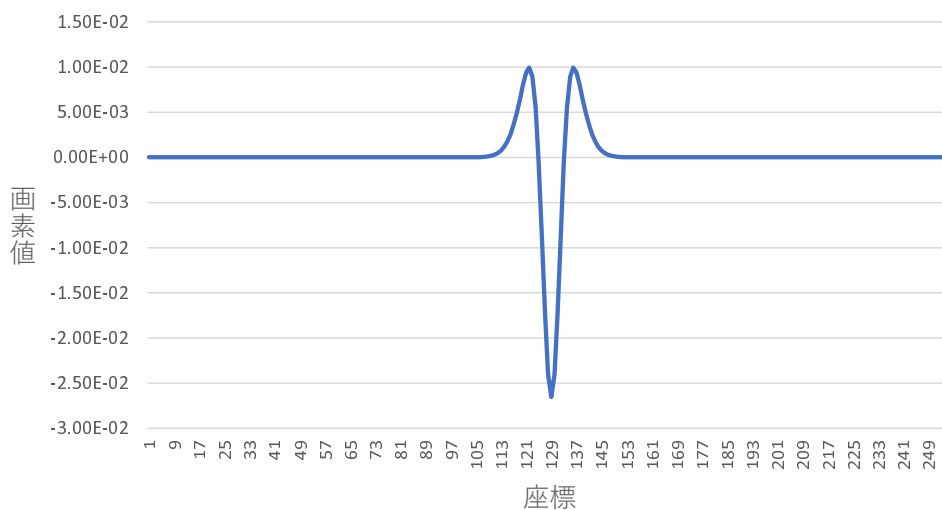


図 3.4 ガウス分布型バンドパスフィルタ

スケールの値を k , ガウス関数を $G(\sigma)$, 平滑化画像を $L(\sigma)$, 入力画像を I とすると, DoG 画像の式は式 (3.2) で表される.

$$D(\sigma) = (G(k\sigma) - G(\sigma)) * I = L(k\sigma) - L(\sigma) \quad (3.2)$$

図 3.5 は, 図 3.2 から図 3.3 を引き, 各画素値に 128 を足した DoG 画像である. DoG の処理を行うことでこのように, 図 3.3 でぼけているエッジ部分が差分として得られる.



図 3.5 DoG 画像

3.3 フーリエ変換

フーリエ変換は、周波数成分の解析や画像のフィルタリング処理など様々な場面で用いられている。

周波数領域でのフィルタリングは空間領域のフィルタリングよりも処理が高速であるため使用されることが多い。空間領域では画像とフィルタの畳み込み積分を行っているが、周波数領域でのフィルタ処理は画像とフィルタに対してフーリエ変換した後、二つの積でフィルタ処理が行える。そのため空間フィルタリングよりも高速である。

今回はこの特徴を利用して周波数領域でのフィルタリングを行うために、画像とフィルタに対してフーリエ変換を行う。フーリエ変換による画像のフィルタリングは以下の流れの通りである。

1. 画像とフィルタをフーリエ変換する
2. フーリエ変換した画像とフィルタの積をとる
3. 得られた結果を逆フーリエ変換する

フーリエ変換の式は式 3.3 で表される。周波数領域内における画素の位置を $F(u, v)$ 、空間領域内における画素の位置を $f(x, y)$ とする。

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp \{-j2\pi(ux + vy)\} dx dy \quad (3.3)$$

逆フーリエ変換の式は式 3.4 で表される。

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) \exp \{j2\pi(ux + vy)\} dx dy \quad (3.4)$$

3.4 ハフ変換

画像に映るエッジは必ずしも連続であるとは限らない。またエッジがきれいに映っているとは限らず、データにノイズが混じっている可能性もある。そのようなデータから任意の図形のエッジを検出するためにハフ変換が用いられている。

3.5 粒子フィルタ

今回手法で用いたハフ変換は円のハフ変換である。円は中心座標 (a, b) と半径 r の 3 つのパラメータを求める必要がある。円の数式は式 (3.5) の通りであり、エッジ部分の画素の x 座標と y 座標の情報をそれぞれ x, y に代入していき 3 つのパラメータを推定する。

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (3.5)$$

円の半径は固定の値が代入されていると仮定して、中心座標 (a, b) をハフ変換で求める場合の手順は以下の通りである。

1. 入力画像から検出したい円のエッジ部分を検出する
2. 求めたいパラメータ数に応じた次元数のパラメータ空間を作成する。今回は a と b の二つなので二次元パラメータ空間を作成する。
3. エッジとして検出された (x, y) と半径 r から数式 (3.5) を解き、パラメータ空間上において該当する a と b の場所に 1 を加算する。これを投票という。
4. 投票の処理を他のエッジとして検出された画素全てに行う。
5. 全ての画素に対して投票が終了した後、投票数が一番多い a, b を探す。この時求めた a, b が画像中の円の中心座標 (a, b) である。

もし円の半径も求める場合は、この処理を円の半径を変更しつつ行い一番投票数が多い場所を探す。また、ハフ変換は次元数の増加に伴い計算時間が多いため、ある程度求めるパラメータの値の範囲を決定して行う必要がある。

3.5 粒子フィルタ

粒子フィルタは状態空間モデルの状態推定アルゴリズムで、モンテカルロ法によって実現される。時刻を t における各粒子の状態とその重みをそれぞれ $\mathbf{x}_t, \mathbf{w}_t$ とし、観測値を \mathbf{y}_t とした時、状態空間モデルは式 (3.6) と式 (3.7) からなる。 F は状態 \mathbf{x}_t の時間変化関数で、 H は状態 \mathbf{x}_t から観測値 \mathbf{y}_t に変換する関数である [7]。ただし、システムノイズ $\boldsymbol{\xi}_t$ と観測

3.5 粒子フィルタ

ノイズ w_t の確率はガウス分布に従っているとは限らない.

$$\mathbf{x}_t = F(\mathbf{x}_{t-1}, \boldsymbol{\xi}_t) \quad (3.6)$$

$$\mathbf{y}_t = H(\mathbf{x}_t, \mathbf{w}_t) \quad (3.7)$$

粒子フィルタの流れについて説明する [8]. 粒子フィルタは大きく分けて以下の 3 つのステップから成り立つ.

1. 状態の更新
2. 観測値から各状態の尤度を計算
3. 計算した尤度を元に粒子をリサンプリング

図 3.6 は粒子フィルタの流れを表している. まず, 時刻 $t-1$ の粒子 \mathbf{x}_{t-1} を数式 (3.6) に基づいて次の状態 \mathbf{x}_t へと更新する. その後, 観測データと \mathbf{y}_t と各粒子の状態 \mathbf{x}_t を用いて数式 (3.7) に基づき粒子の尤度 w_t^i を算出する. 図では各粒子の尤度を大きさで表現した.

時刻 t の増加に伴い, 粒子の尤度 w_t の分散は大きくなってしまう. この問題を避けるためには各粒子のリサンプリングを行う必要がある. 粒子の尤度 w_t^i に基づき, 粒子のリサンプリングを行う. その後, 次の時刻 $t+1$ で同様の処理を行っていく. この流れをフレームごとに繰り返すことで尤もらしい状態を推定していく.

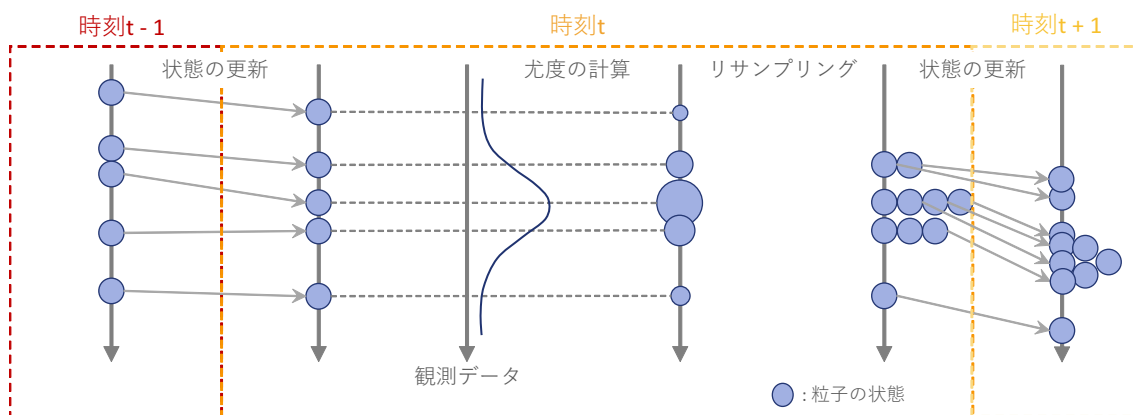


図 3.6 粒子フィルタの流れ

第 4 章

提案手法

本章では従来手法の Difference of Gaussian による晶癖線の検出を説明し，従来手法を利用した提案手法である検出結果の移動平均の手法と運動モデルを導入した粒子フィルタの手法について記述する．

4.1 前提条件

本研究で用いる入力画像は図 2.2(a) の画像である．この画像からメニスカス部分を 64×64 ピクセルに切り取り，得られた画像に本手法を試す．

また，本研究で使用しているデータのフレームレートはデータごとに異なる．フレームレートの情報は事前に知っていることを前提とする．

4.2 Difference of Gaussian(DoG) による晶癖線の検出

4.2.1 DoG 画像の作成

小節 2.2 よりフレーム間差分による晶癖線検出は困難であることが明らかになった．そこで，単一フレーム画像から晶癖線を検出するために画像上の晶癖線とメニスカスの特徴に注目した．図 4.1 より，晶癖線が下に存在する時晶癖線はメニスカスより白い画素の横幅が狭いという特徴がある．この特徴を活用するために，横方向のぼかしの強度を変えた画像の差分画像から晶癖線の検出を試みる．そのため，Difference of Gaussian 画像を作成する．

横方向のぼかしを強くするためには，軸ごとにぼかしの強度を変更する必要がある．した

4.2 Difference of Gaussian(DoG) による晶癖線の検出

がって、縦軸と横軸の標準偏差を独立して用いる必要がある。そこで本手法は、数式 (4.1) を用いてガウシアンフィルタを作成する。これにより、横軸の標準偏差 σ_x と縦軸の標準偏差 σ_y を独立して使用することが可能になった。予備実験より本手法では 1 つ目のガウシアンフィルタには横軸の標準偏差 σ_x は 0.6、縦軸の標準偏差 σ_y に 0.1 を使用し、二つ目のガウシアンフィルタの横軸の標準偏差 σ_x を 1.8、縦軸の標準偏差 σ_y を 0.1 と設定した。

$$f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y^2}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (4.1)$$

処理を高速にするために周波数領域でフィルタ処理を行う。DoG に使用する 2 つのフィルタは各フレームの処理を行うよりも前にあらかじめ準備しておく。なおこの時点でガウシアンフィルタにフーリエ変換を行い周波数領域でフィルタ処理ができるようにする。

二つのフィルタをそれぞれ $H_1(u, v)$, $H_2(u, v)$, フーリエ変換後の元画像を $F(u, v)$, フィルタ処理後の画像を $G(u, v)$ とした時、周波数領域で作成した DoG 画像 $D(u, v)$ は数式 4.2 と数式 4.4 の通りである。どちらの数式でも DoG 画像は作成可能である。しかし数式 (4.4) はまず各フィルタとの積を取った後差分を行っているため数式 (4.2) よりも計算処理が多い。そこで、本手法では数式 (4.2) の手順で DoG 画像を作成した。

$$D(u, v) = H(u, v) * F(u, v) \quad (4.2)$$

$$H(u, v) = H_1(u, v) - H_2(u, v) \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} D(u, v) &= H_1(u, v) * F(u, v) - H_2(u, v) * F(u, v) \\ &= G_1(u, v) - G_2(u, v) \end{aligned} \quad (4.4)$$

4.2.2 画像から晶癖線の検出

図 4.2 は、図 4.1 の DoG 画像である。画像より、晶癖線の画素値が高くなっていることが分かる。この画像から晶癖線を検出するために二値化を行う。図 4.3 は図 4.2 に対して二値化処理を行った結果画像である。この結果より晶癖線と左右のメニスカスが画像に現れていることが確認できる。得られた結果画像にラベリング処理を行う。しかし、画素値の影響

4.2 Difference of Gaussian(DoG) による晶癖線の検出

で左右のメニスカス付近の画素の集合が分離しており，現在の状態でラベリング処理を行うと別の画素の集合として検出されてしまう．この問題を解決するために，膨張処理を行い左右のメニスカス付近の画素の集合をそれぞれ1つの画素の集合として扱う．図4.4は図4.3に膨張処理を行った結果画像である．画像より，左右のメニスカスと晶癖線がそれぞれ1つの画素の集合になっていることが確認できた．

膨張処理後の画像に対してラベリング処理を行い晶癖線とそうではない画素の集合を区別する．図4.4より晶癖線は左右のメニスカスより白画素の総数が少ない．この特徴より，白画素の総数が3番目に多い場所を晶癖線として検出することで晶癖線の検出を実現した．

画像データを使用して晶癖線の検出回数を測定した結果，二値化の閾値が195の時に検出回数が多かったため本手法は二値化の閾値を195に設定した．

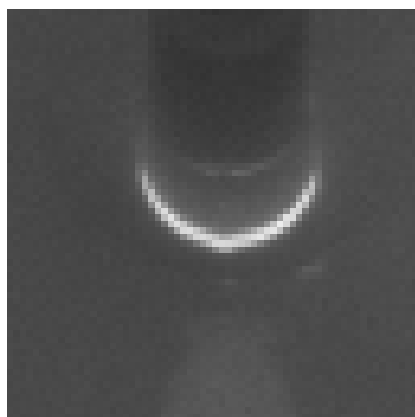


図 4.1 入力画像

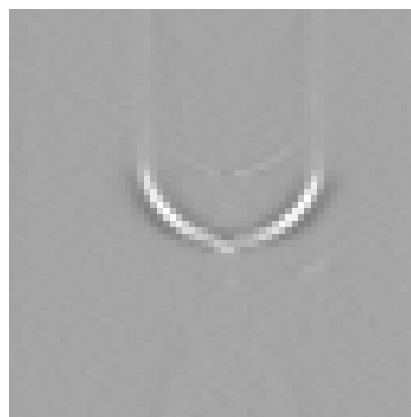


図 4.2 DoG 画像

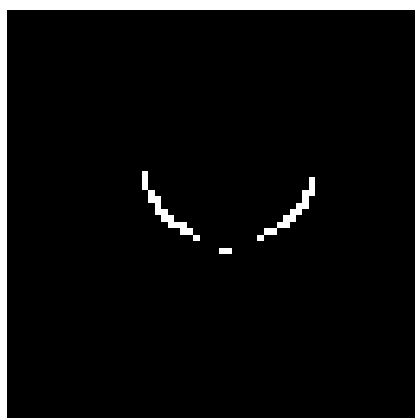


図 4.3 DoG 画像の二値画像

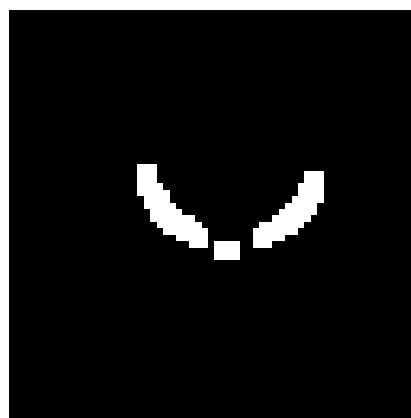


図 4.4 膨張処理後の画像

4.3 検出結果を利用した移動平均

DoG による晶癖線検出の結果を利用して、各フレームより手前の 1 分間における晶癖線検出頻度を算出する。晶癖線の有無を二進数で表し、各フレームに有無を表す二進数を付与する。DoG で晶癖線と思われる場所が検出された場合にはそのフレームに 1 を付与し、何も検出されなかった場合はそのフレームに 0 を付与する。その後、フレームより前の 1 分間における晶癖線の有無の平均値を算出する。

本手法では同じ晶癖線を何度も検出しないようにするために、晶癖線が検出された後一定のフレームでは検出を行わないように設定した。晶癖線の有無の平均値もこれを考慮し、検出を行わないフレームを除いた 1 分間のフレーム全てで検出された場合に平均値が最大になるよう処理を行った。

4.4 運動モデルを導入した粒子フィルタ

DoG による検出では晶癖線以外の場所が検出されてしまう問題がある。私は晶癖線の位置を推定することで晶癖線とそうではない場所を区別することでこの問題を解決できると考えた。

小節 3.5 で説明したように粒子フィルタには 3 つのステップを繰り返していくことで位置の推定を行っている。そこで粒子フィルタの観測値に DoG での検出結果を使用し、状態の更新にシリコン製造時の既知な情報である約 7.5 秒に 1 回転しているということと晶癖線は 90 度ずつ出現するという情報を使用することで粒子フィルタによる晶癖線の位置推定ができるのではないかと考えた。また、粒子フィルタは徐々に晶癖線と思われる場所に収束していくので誤検出があったとしても尤度の計算には影響を与えないのではないかと考えた。以上のことより、本手法は運動モデルを導入した粒子フィルタを使用することにする。

4.4 運動モデルを導入した粒子フィルタ

4.4.1 粒子フィルタを用いた晶癖線の位置推定

粒子フィルタの流れは小節 3.5 で説明したように、まず状態 \mathbf{x}_t の更新を行う。次に状態 \mathbf{x}_{t+1} と観測値 \mathbf{y}_{t+1} から尤度 w_t を算出し、算出した値を元にリサンプリングを行う。これを各フレームに対して繰り返していく。

本手法では、各粒子の状態 \mathbf{x}_t に円の中心から見た各粒子の角度情報を用いる。 θ を円の中心から見た角度とした時、状態 \mathbf{x}_t は数式 (4.5) の通りである。

$$\mathbf{x}_t = \begin{bmatrix} \theta_t \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

今回使用するデータの製造中のシリコン回転速度は 1 周あたり約 7.5 秒だと判明している。したがって、等速円運動による回転速度は定数加算で表すことが出来て、回転速度の変動を雑音として表すことが可能である。1 フレームにおける晶癖線の移動角度を v_r とし、時刻 t における雑音を ξ_t とすると、 i 番目の粒子の状態方程式は数式 (4.6) の通りである。

$$x_{t+1}^i = x_t^i + v_r + \xi_t^i \quad (4.6)$$

また、各データのフレームレートを f とした時、移動角度 v_r は式 (4.7) の通りである。数式 (4.6) と数式 (4.7) を使用し、各粒子の状態を更新する。

$$v_r = \frac{7.5}{360f} \quad (4.7)$$

次に尤度計算について説明する。尤度計算には、小節 4.2.1 で説明した DoG 画像で検出された場所の中心がガウス分布の平均値となるガウス画像を作成する。予備実験より、本手法で尤度画像に使用するガウス分布の標準偏差 σ は 20 とする。まず、各粒子が保持している角度情報 θ_i よりその粒子の画像上における座標を算出する。算出した座標を中心として尤度画像から 20×20 ピクセル切り出し、切り出した画素の合計値を各粒子の重み w_t^i とし、用いる。また事前知識として晶癖線が 90 度ずつ出現することが判明しているため、90 度ずつに同様の処理を行い 4 箇所合計値を算出後、正規化を行った数値を最終的な各粒子の重み w_t^i として使用する。

最後にリサンプリングについて説明する。リサンプリングは尤度の大きい粒子から行う。算出された i 番目の粒子の尤度を w_t^i 、全粒子の個数を N とした時、リサンプリングで生成

4.4 運動モデルを導入した粒子フィルタ

する粒子の個数 n は数式 (4.8) の通りである。また、リサンプリングで生成する各粒子の重みは $\frac{1}{N}$ とする。今回は処理時間のことも考慮し、粒子の個数 N は 540 個と設定した。

$$n = \text{int}(w_t^i \times N + 0.5) \quad (4.8)$$

以上の流れを各フレームに対して行うことで粒子フィルタを用いて晶癖線の位置推定を行う。

4.4.2 粒子フィルタに必要な円情報の取得

小節 4.4.1 で説明したように本手法では状態 \mathbf{x}_t に円の中心から見た角度情報を用いる。しかし、シリコンは偏心しているためメニスカスの位置はデータによって異なる。そのため、本手法は各フレームにおけるメニスカスの位置から円の半径と中心座標を求めることにする。

入力画像の撮影は斜めから行われているため、本来は円ではなく楕円の長軸と短軸、中心座標を求める必要がある。しかし、楕円のハフ変換を使用した場合の 1 フレームにおける処理時間は約 6 秒であった。本手法はリアルタイムでの検出を目標としているため、今回は楕円ではなく円の半径と中心座標を求めることにした。円の半径と中心座標を求めるために、円のハフ変換を行う。

入力画像を二値化する前に画素の濃淡変化を滑らかにするために入力画像にガウシアンフィルタ処理を行う。その後、フィルタ処理を行った画像を二値化する。図 4.5 はフィルタ処理後の画像を二値化した結果である。これにより、メニスカスのみ画像に映すことが可能になった。

晶癖線はメニスカスの外側に出現する。したがって、求めたい円はメニスカスの外側の円である。しかし、得られた二値画像には半円も映っていない。そこで外側の円を確実に検出するために、白い画素より上にある同列の黒い画素を全て白に変更する。図 4.5 に対してこの処理を行った出力結果が図 4.6 である。この画像を入力画像としてハフ変換を行う。図 4.7 は図 4.6 に対してハフ変換を行い得られた円の情報を元に画像に円を描画した結果であ

4.4 運動モデルを導入した粒子フィルタ

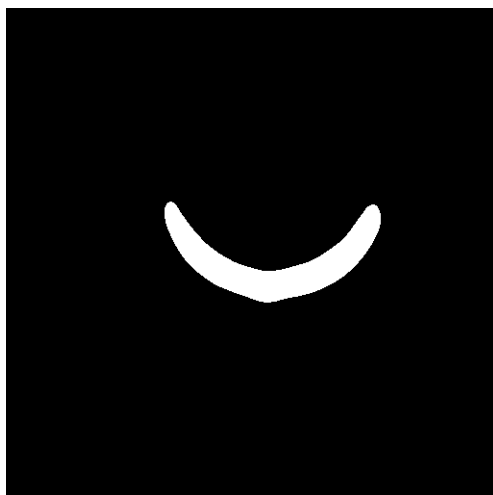


図 4.5 二値画像

る．画像より，メニスカスの外側の円が検出できていることがわかる．



図 4.6 メニスカスより上の画素を白にした画像



図 4.7 ハフ変換で求めた円

第 5 章

実験

5.1 検証

提案した二つの手法の有効性を確認するため、DoG による従来手法と二つの手法の比較を行う。従来手法である DoG による検出では、検出されたフレームに 1 を代入し、されなかったフレームに 0 を代入する。この結果を従来手法の結果として用いる。移動平均による結果は小節 4.3 で説明したように各フレームより手前の 1 分間における検出の有無から頻度を算出し、その値を使用する。粒子フィルタによる手法はまず 360 度の中で晶癖線尤度が最大のものをフレームごとに抽出する。雑音による結果の変動も考慮してその結果を 5 回取得しその平均値を結果として使用する。

また実際のシステムでは同じ晶癖線を検出しないことを考えているため、DoG で検出された後、数フレームは検出を行わないように設定した。1 周あたりの速度が約 7.5 秒であることと 90 度ずつ晶癖線が出現することを考慮し、検出しないフレーム数は各画像データのフレームレートと 1.875 の積を取ることで決定した。

図 5.1 は粒子フィルタを用いてあるフレームの各角度における晶癖線尤度を算出した結果である。この結果より、尤度全体から見たらピークの値は低いがピークが代入されている角度を中心に尤度が収束していることが分かる。この特徴を利用して本手法では尤度を算出する角度間隔を 9 度に設定し、晶癖線最大尤度を求めた。また 360 度で晶癖線最大尤度値を見た時、予備実験からピークは 4 つ出現することが判明した。この原因は晶癖線が 90 度ずつ出現しており、尤度計算にこの情報を活用しているからである。そこで、本手法では 360 度のいずれかの位置で算出された尤度を 90 度にまとめ、その値を晶癖線尤度として扱った。

5.2 結果

また晶癖線最大尤度は前後フレームで値のバラつきがあるため、結果には最大尤度とその尤度を5フレームごとに平均を取ったグラフの二つを重ねて描画する。

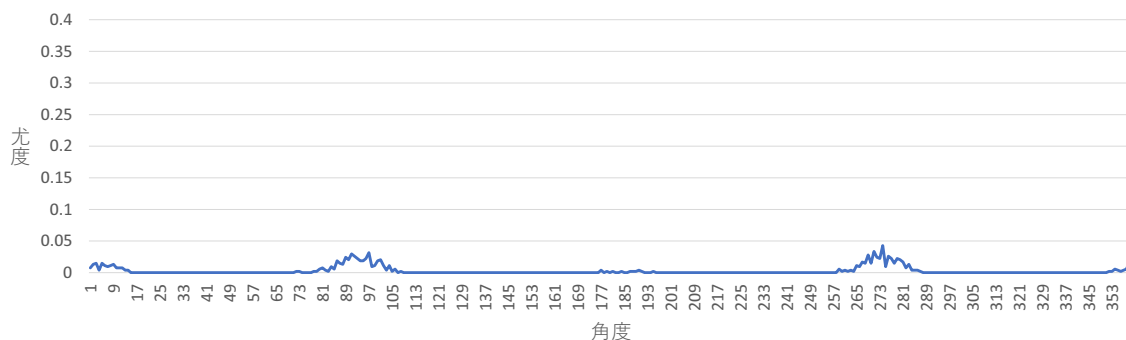


図 5.1 あるフレームの各角度の尤度の合計値

今回は3つの時系列順に並んだ画像データを使用して従来手法と提案手法二つの比較を行った。

また画像データには粒子フィルタと重なっていない誤検出場所がなく、DoGでの誤検出が粒子フィルタの尤度計算に影響を与えていないことが確認できなかった。そこで14フレームに1回晶癖線が出現する時系列データに対して5%の雑音を追加したデータを入力データとして粒子フィルタを用いて尤度計算に影響を与えていないか検証した。

5.2 結果

図 5.2 と図 5.3, 図 5.4 は同じ画像データに対して従来手法による検出結果と提案手法である移動平均を用いた結果、粒子フィルタから最大尤度を算出した結果になっている。このデータは1分が約208フレームであったため、移動平均の算出は208フレームから開始している。

目視で画像データの晶癖線を確認した結果、おおよそ550フレームから920フレームの時と1250から1930フレームの時に晶癖線が安定して出現していることを確認できた。これを踏まえて結果を見た時、移動平均による検出頻度はそれらのフレームにおいて高いところで検出頻度が0.6以上になっていることが判明した。晶癖線最大尤度もそれらのフレーム

5.2 結果

では、おおよそ 0.35 以上の値が続いていることが確認できた。しかし、移動平均による検出頻度は現在のフレームよりも手前の 1 分間における出現の有無から算出されているため、値が上昇し始めるフレームが粒子フィルタに比べて遅い。

このデータはシリコンの引き上げを開始した時刻が判明している。グラフの赤い線は 1954 フレーム目であり、この時にシリコンの引き上げを開始している。どちらの提案手法も引き上げ時刻より前のフレームでは晶癖線が出現していないフレームと比較して値が大きくなっていることが明らかである。

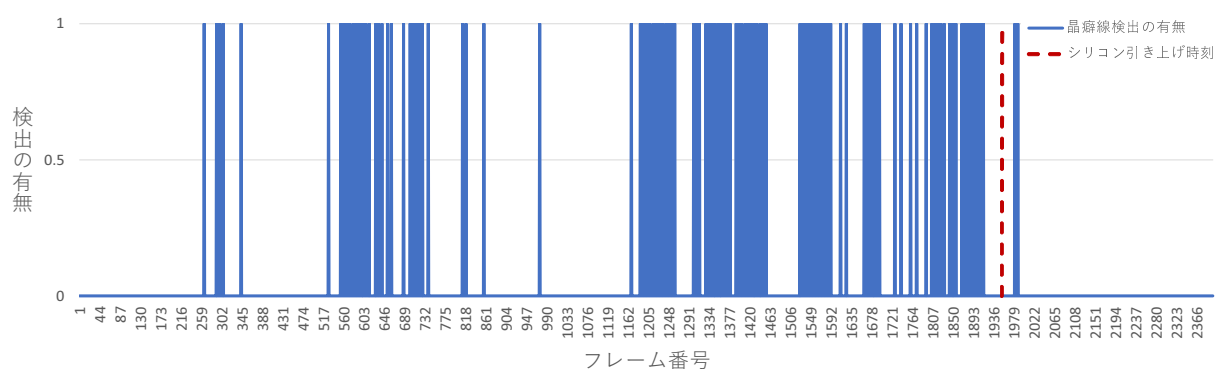


図 5.2 DoG 画像による検出結果 (1)

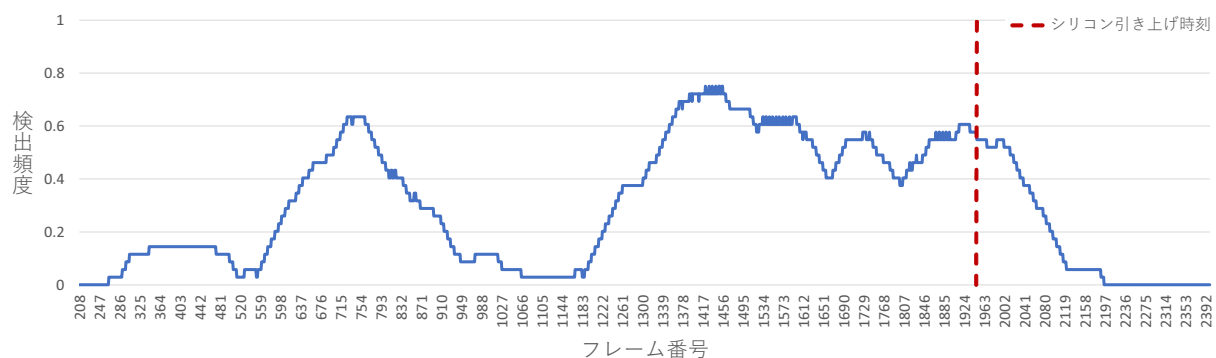


図 5.3 DoG 画像による移動平均の結果 (1)

5.2 結果

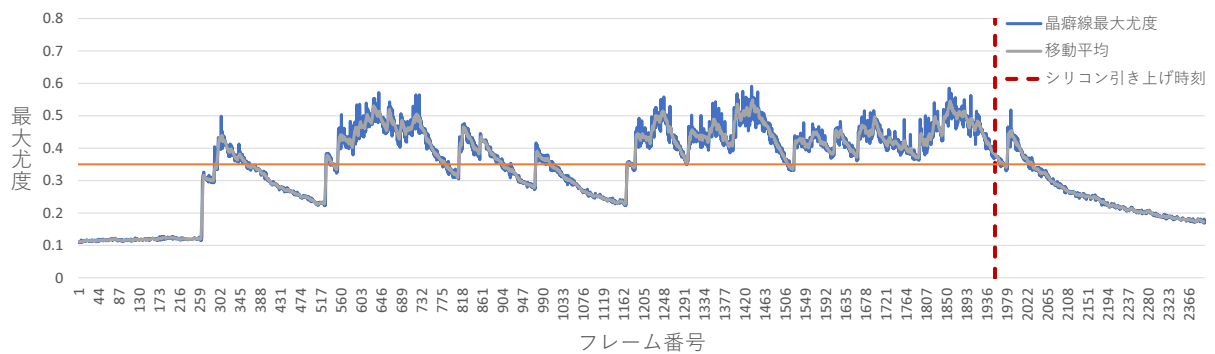


図 5.4 晶癖線最大尤度の平均値の結果 (1)

図 5.5 と図 5.6, 図 5.7 は先ほどとは異なる画像データにおける各手法の結果である。このデータは 1 分が約 149 フレームであったため、移動平均の算出は 149 フレームから開始している。

目視で画像データの晶癖線を確認した結果、おおよそ 100 フレームから 200 フレームの時と 350 フレームから 540 フレームの時、1070 フレーム以降で晶癖線が安定して出現していることを確認できた。粒子フィルタによる結果は 1070 フレーム以降、最後のフレームまで晶癖線最大尤度が 0.4 以上になっていた。移動平均による結果も 1070 フレーム以降徐々に検出頻度が向上しており、図 5.3 と同様に 0.6 付近まで高くなっていることが明らかだ。おおよそ 100 フレームから 200 フレームの時と 350 フレームから 540 フレームの時、移動平均の結果は DoG による検出の頻度が少ないため、値が 0.5 以下である。それに対し、粒子フィルタでは DoG の検出があるフレームでは図 5.4 と同様で最大尤度がおおよそ 0.35 以上になっており、DoG による検出がなかったフレームでは尤度が低下していることが確認できた。

5.2 結果

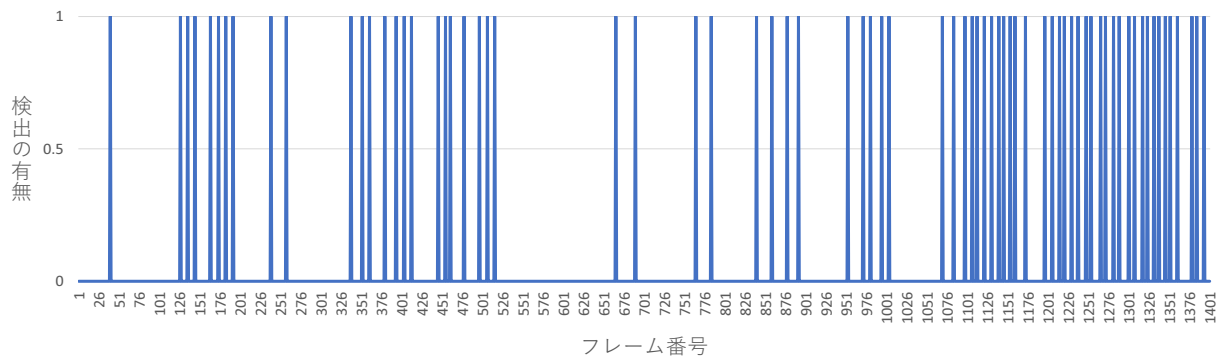


図 5.5 DoG 画像による検出結果 (2)

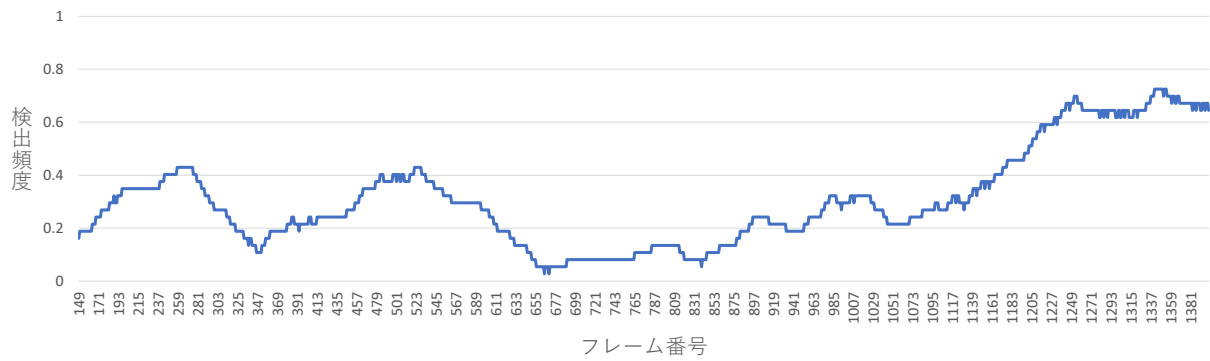


図 5.6 DoG 画像による移動平均の結果 (2)

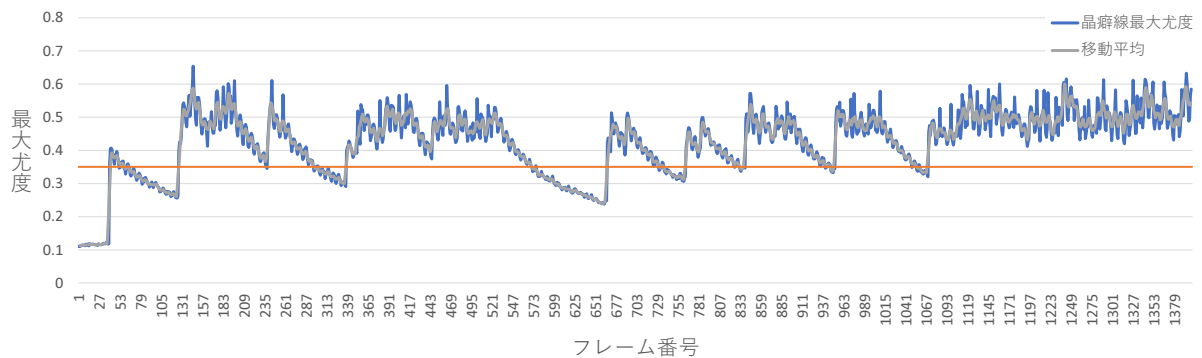


図 5.7 晶癖線最大尤度の平均値の結果 (2)

図 5.8 と図 5.9, 図 5.10 は 2 つのデータとは異なる画像データに対する各手法の結果である。このデータも先ほどのデータと同様に 1 分が約 149 フレームであったため、移動平均の

5.2 結果

算出は 149 フレームから開始している。

目視で画像データを確認した結果、おおよそ 780 フレームから 980 フレームの時と 1100 フレーム以降で晶癖線が出現していることを確認した。移動平均による結果では 780 フレームから 980 フレームの時には、検出頻度がおおよそ 0.6 まで徐々に向上していることが確認できて、1100 フレーム以降でも同様のことが確認できた。どちらの手法も DoG での検出がないフレームでは、値が低下していることが確認できた。

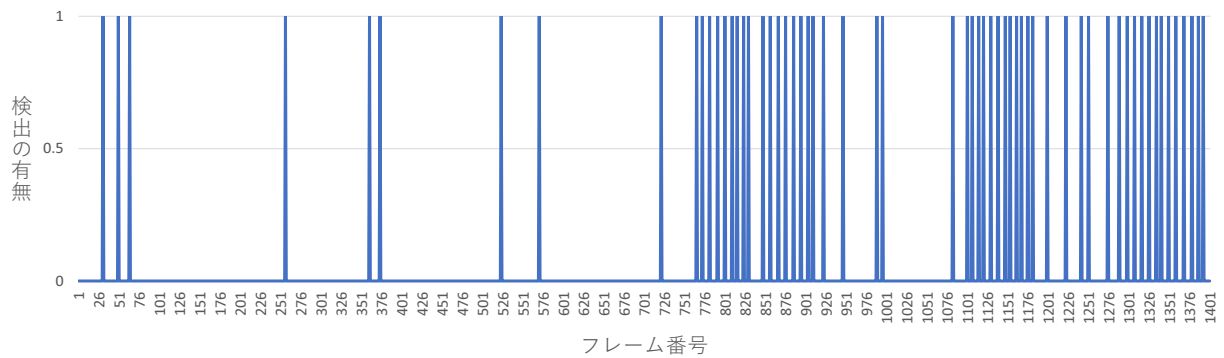


図 5.8 DoG 画像による検出結果 (3)

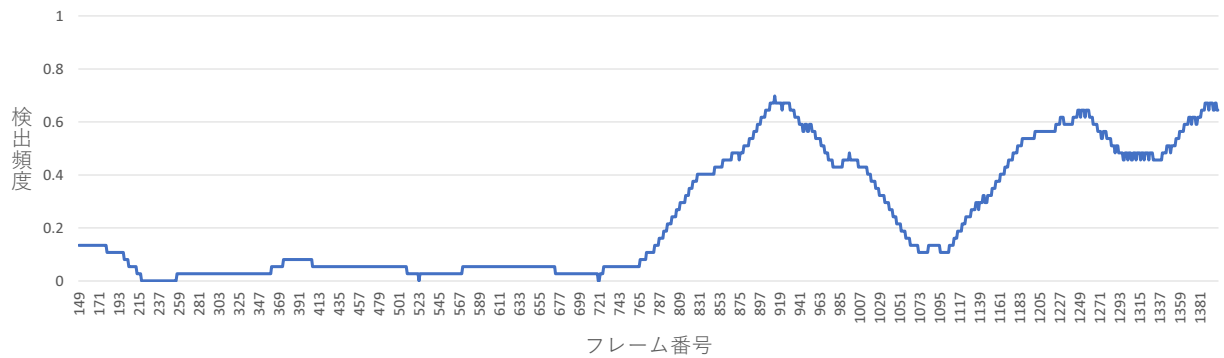


図 5.9 DoG 画像による移動平均の結果 (3)

5.2 結果

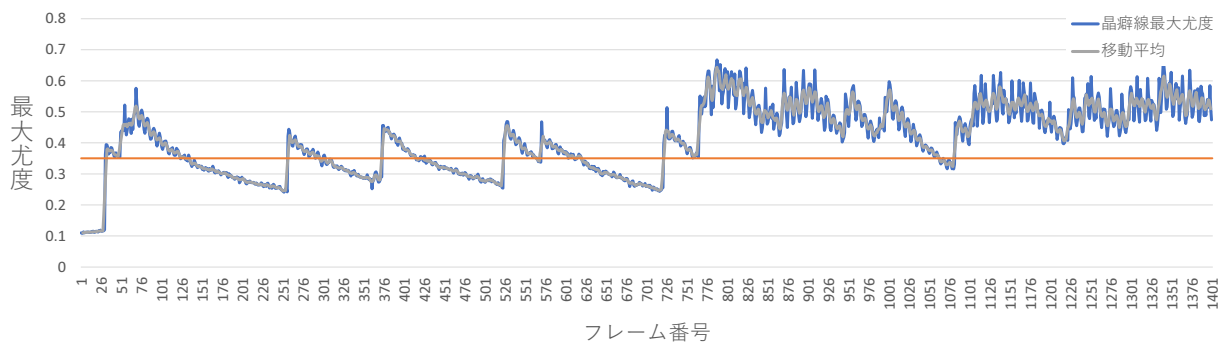


図 5.10 晶癖線最大尤度の平均値の結果 (3)

図 5.4 と図 5.7, 図 5.10 のオレンジの線は尤度値 0.35 を表している。これらの結果より、晶癖線が安定して出現している時刻の尤度はおおよそ 0.35 以上であることが判明した。したがって、閾値を設けて粒子フィルタを用いることでシリコンの引き上げタイミングの自動化が行える可能性があるといえる。

14 フレームに 1 回晶癖線が出現する時系列データに対して 5% の雑音を追加したデータを入力画像にしたときの粒子フィルタによる晶癖線最大尤度は図 5.12 であった。各フレームにおける検出の有無は図 5.11 の通りである。1300 フレームから 1400 フレームの時の検出結果と晶癖線最大尤度に注目した結果、検出がある部分で晶癖線最大尤度が上昇していないことが確認できた。

最大尤度が上昇していない原因を探するために入力画像に粒子を表示した画像とそのフレームにおける各角度の尤度グラフに注目した。図 5.13 は晶癖線が検出されても最大尤度が上昇しなかった時の画像と各角度の尤度のグラフである。このデータは本来 14 フレームに 1 回晶癖線が出現するデータであり、本来図 5.13 のフレームでは晶癖線は検出されない。図 5.13 の画像より、検出箇所と粒子が重なっていないことが明らかだ。このフレーム以降の尤度を見ると低下していることが確認できた。図 5.14 も図 5.13 と同様に誤検出データである。しかし、このデータは図 5.13 とは異なり晶癖線尤度が上昇している。この原因は図 5.14 の 3 枚目の画像の検出場所と粒子が少し重なっているため、尤度計算でこの粒子たちの尤度が上昇したためである。以上の結果より粒子フィルタを用いた場合、従来手法で誤って検出さ

5.2 結果

れた場所があったとしても、粒子と誤検出の位置が重なっていなければ尤度が上昇しないことが明らかになった。

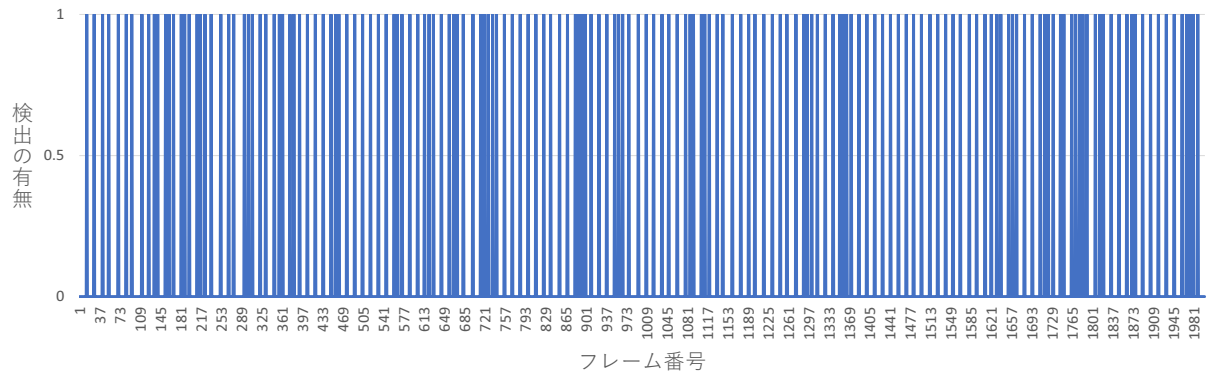


図 5.11 人工的データに対する DoG による検出結果

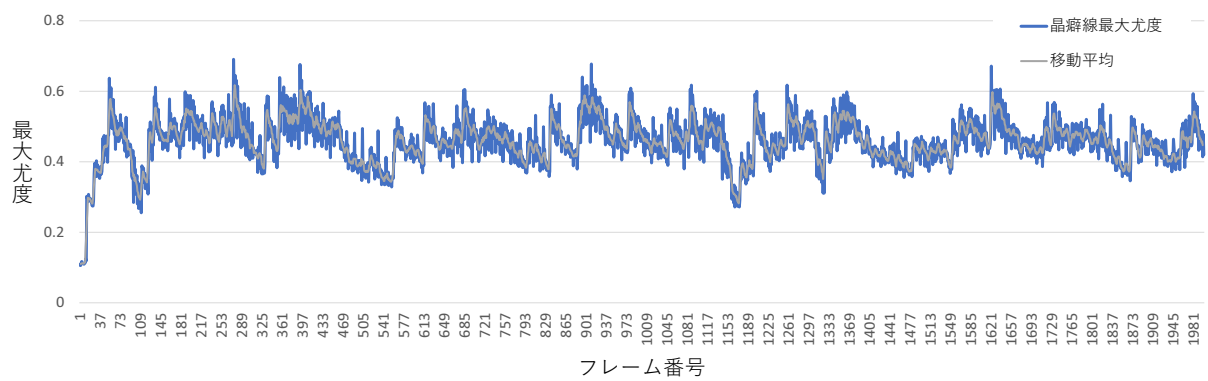
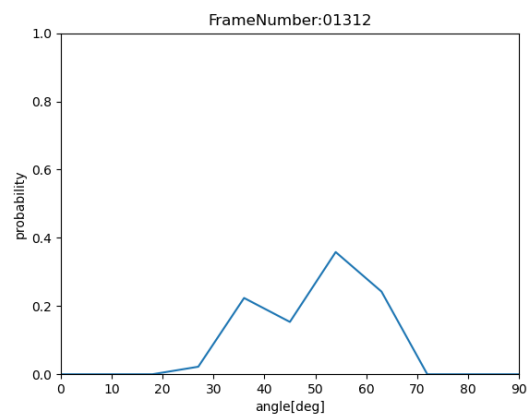
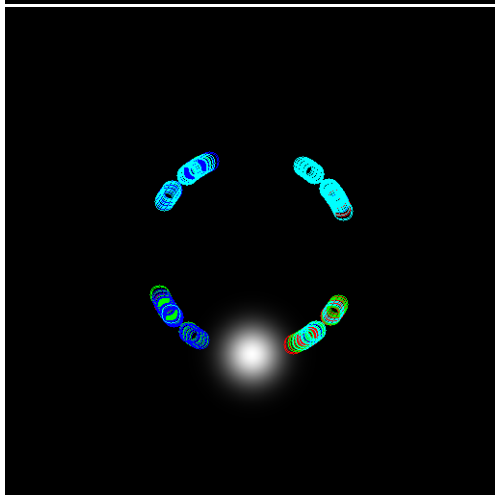
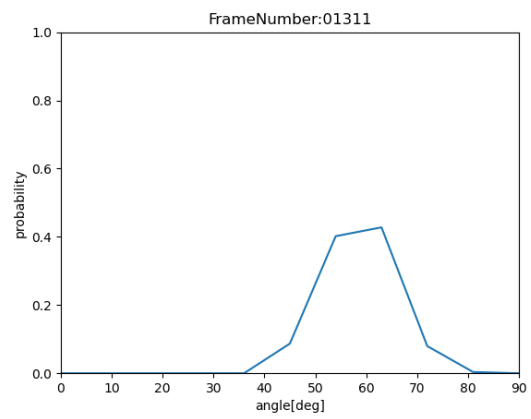
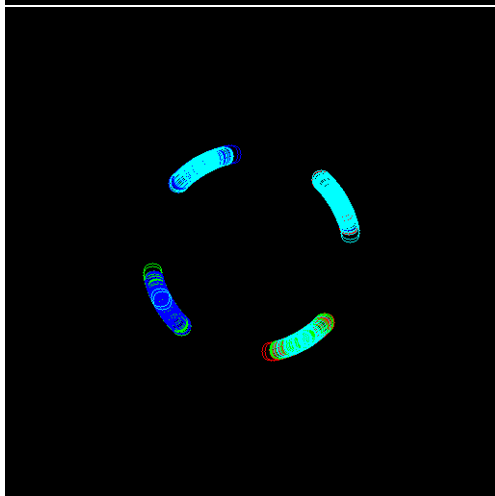
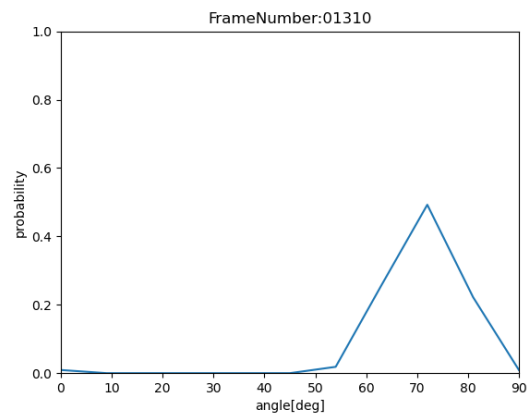
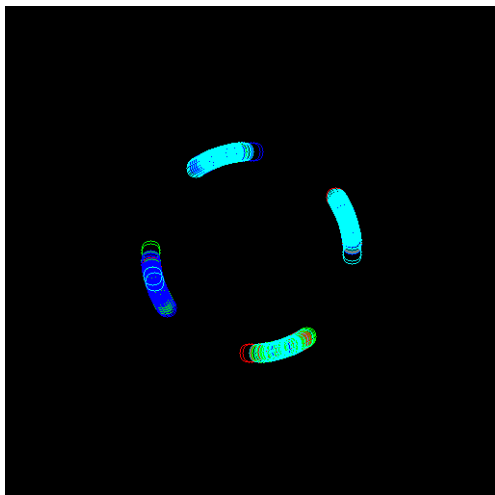


図 5.12 人工的データに対する晶癖線最大尤度の平均値の結果

5.2 結果



5.2 結果

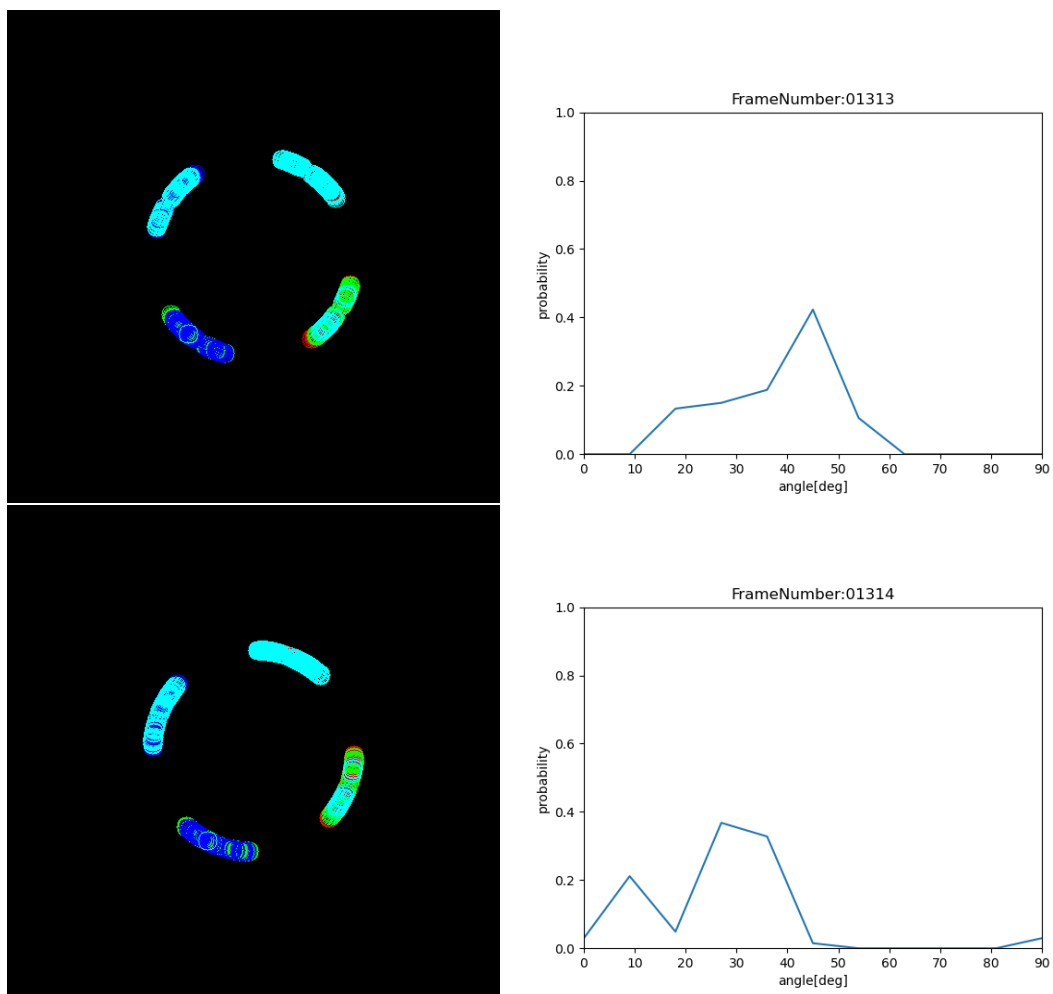
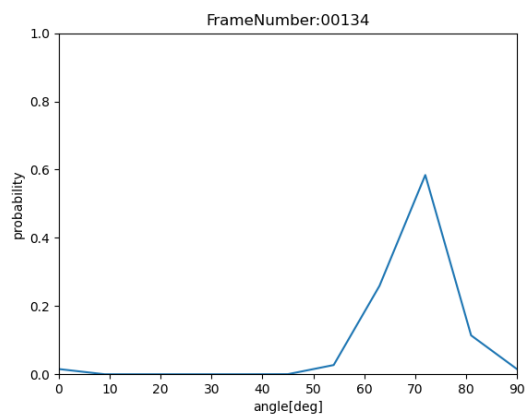
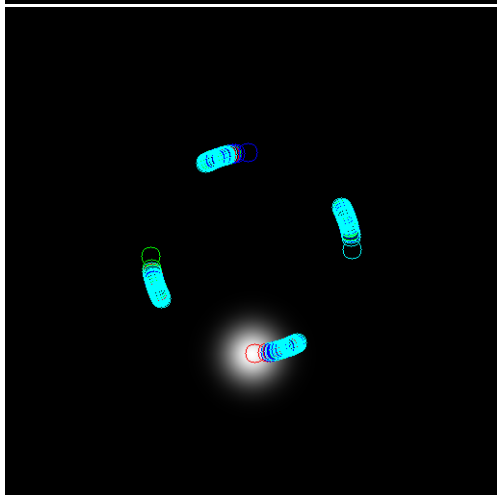
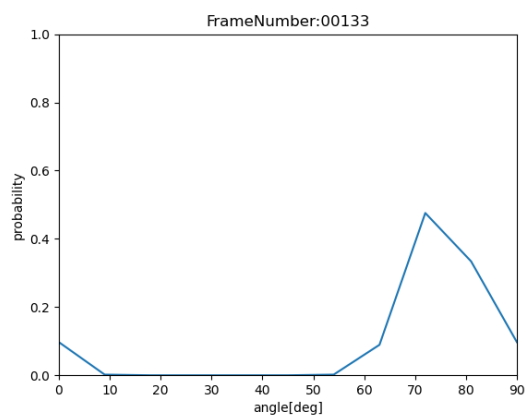
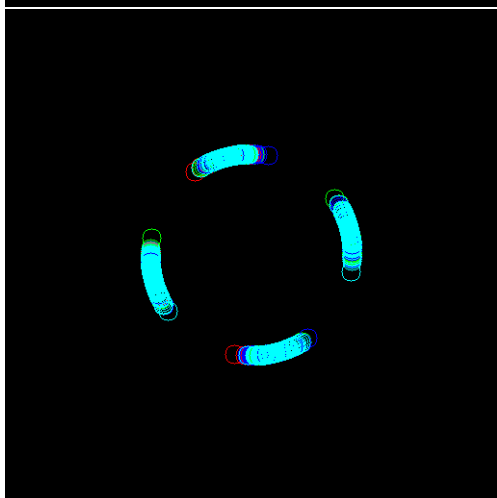
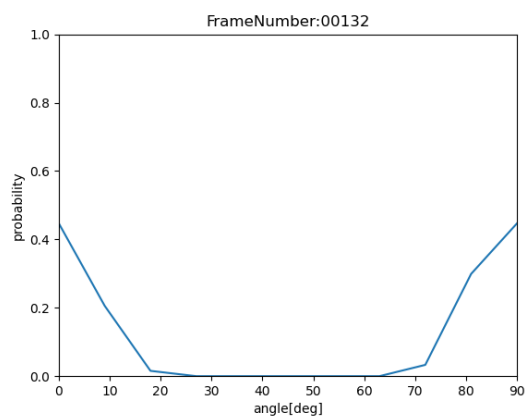
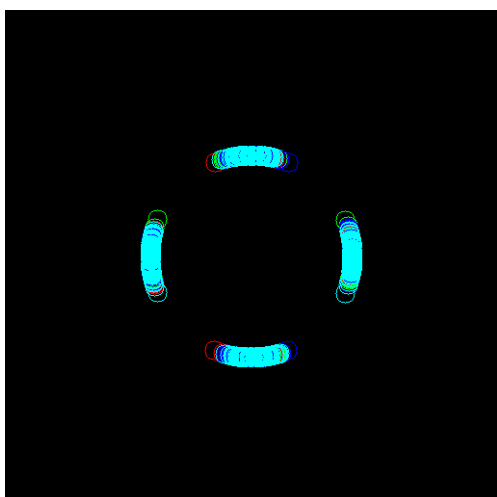


図 5.13 最大尤度が上昇しなかった誤検出データ

5.2 結果



5.2 結果

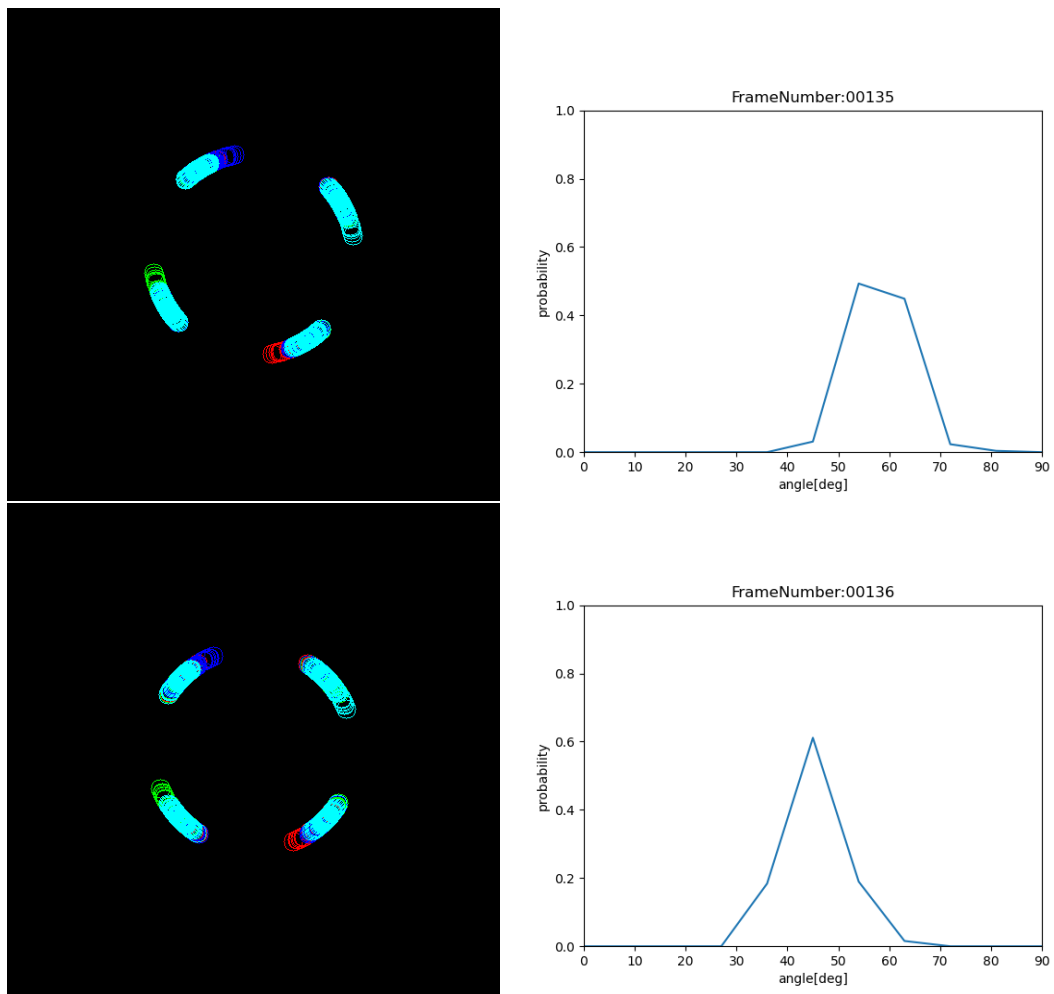


図 5.14 最大尤度が上昇した誤検出データ

第 6 章

まとめ

本研究では、従来の手法である Difference of Gaussian による晶癖線の検出を利用して晶癖線が出現するタイミング発見のために、検出結果の移動平均と単結晶シリコン製造における事前知識を導入した粒子フィルタの手法を提案し、実装した。

実験を行った結果、粒子フィルタの晶癖線最大尤度の値は 3 つの画像データ全てに対して、晶癖線が安定して出現している時刻ではおおよそ 0.35 以上になっていることが明らかになった。この結果より、晶癖線最大尤度の閾値を設定して粒子フィルタを使用することでシリコンの引き上げタイミングを自動で行える可能性があるといえる。

また移動平均は観測したフレームより手前の 1 分間における検出頻度を見ているため、検出頻度が向上するタイミングは遅いという欠点がある。一方で粒子フィルタはリアルタイムで計算されているため、移動平均より早く晶癖線が安定しているタイミングを発見することが出来る。

また DoG で晶癖線以外の場所が誤検出された場合、粒子フィルタの尤度は上昇するか確認を行った。晶癖線が 14 フレームに 1 回出現する時系列データに雑音をのせたデータを作成し粒子フィルタの晶癖線最大尤度を求めた結果、粒子フィルタの晶癖線最大尤度は粒子が収束していた場合、晶癖線最大尤度が上昇しないことが明らかになった。

謝辞

本研究を始めるための契機を与えていただき、かつ本研究の遂行にあたり、多大なるご指導、ご助言を賜りました栗原 徹准教授に心より感謝し、厚く御礼申し上げます。また、本研究の副査をお引き受けくださった福本 昌弘教授ならびに妻鳥 貴彦准教授においては、適切なご指導をいただきましたことを深く御礼申し上げます。また、本研究を進めるにあたり、必要となる入力動画像をご提供いただきましたエム・セテック株式会社に感謝申し上げます。最後に、提案手法を実装するにあたり、ご協力いただくとともに、様々なご助言いただき本研究の遂行を支えていただきました高知工科大学 画像情報工学研究室 関係者各位に心から感謝いたします。

参考文献

- [1] Roberto Fornari, "Single Crystals of Electronic Materials : Growth and Properties, " Woodhead Publishing, 2018.
- [2] G.K. Teal and E. Buehler, "Growth of Silicon Single Crystals and of Single Crystal Silicon P-N Junctions," Phys. Rev., Vol 87, 190 , 1952.
- [3] C. W. Lan, C. K.Hsieh and W. C. Hsu, "Efficient Czochralski Solar-Grade Silicon Growth," 日本結晶成長学会誌, Vol. 32, No. 4, pp.297-305, 2005.
- [4] 高梨 啓一, 末岡 浩治, 福谷 征史郎, " チョクラルスキー法による単結晶 Si 引上炉における単結晶断面形状のオンライン測定技術の開発," 日本機械学会論文集 (C 編), 73 巻, 727 号, pp.649-654, 2007.
- [5] 高梨 啓一, 末岡 浩治, 福谷 征史郎, " チョクラルスキー法を用いた SI 単結晶育成炉におけるフュージョンリングを用いた液面位置測定技術の開発," 日本機械学会論文集 (C 編), 74 巻, 742 号, pp.194-200, 2008.
- [6] William.C.DASH : Growth of Silicon Crystals Free from Dislocations, Journal of Applied Physics, Vol.30, No.4, pp. 459-474, 1959.
- [7] 樋口 知之, "粒子フィルタ", 電子情報通信学会誌, Vol.88, No.12, pp. 989-994, 2005 年 12 月.
- [8] 矢野 浩一, "粒子フィルタの基礎と応用 : フィルタ・平滑化・パラメータ", 日本統計学会誌, 第 44 巻, 第 1 号, pp. 189-216, 2014 年 9 月.