

博士学位論文

位相シフト法を用いた
高精度計測・検査に関する研究

2019年

鷺見 典克

目次

第1章	序論	1
第2章	基礎理論	4
2.1	三次元計測	4
2.2	三角測量法	6
2.2.1	光切断法	6
2.2.2	格子パターン投影法	7
2.3	干渉法	8
2.3.1	光干渉の原理	8
2.3.2	マイケルソン干渉計	9
2.4	位相シフト法	11
2.4.1	4ステップアルゴリズム	12
2.4.2	最小二乗法アルゴリズム	12
2.4.3	フーリエ変換アルゴリズム	14
第3章	航空機用ファスナの自動外観検査	17
3.1	まえがき	17
3.2	検査対象・システムの概要	20
3.2.1	検査対象・検査項目	20
3.2.2	検査装置	21
3.3	提案手法	24
3.3.1	三次元計測	24
3.3.2	ファスナ部・パネル部の検出	25
3.3.3	平面・円推定処理	29
3.3.4	ファスナの傾き・深さ算出	31
3.4	システムの評価	32
3.4.1	ファスナの検出精度	32
3.4.2	システムの検査精度	34
3.4.3	システムの検査時間	36
3.4.4	考察	38
3.5	むすび	39
第4章	位相シフト法における信頼性評価	41
4.1	まえがき	41
4.2	位相シフト法における計測誤差	44
4.3	従来研究	46
4.3.1	位相信頼性評価の従来手法1	46
4.3.2	位相信頼性評価の従来手法2	47
4.3.3	位相信頼性評価の従来手法3	48
4.4	提案手法	49
4.5	評価実験	51
4.5.1	計測装置の構成	51
4.5.2	計測対象	55
4.5.3	計測手法	55
4.5.4	位相シフト法による計測精度評価	58

4.5.5	防振環境における信頼性評価手法の比較実験	63
4.5.6	振動環境下における信頼性評価手法の比較実験	71
4.5.7	計算時間	81
4.5.8	考察	81
4.6	提案手法に基づく振動補正の検討	86
4.6.1	補正方法	86
4.6.2	評価実験	88
4.6.3	計算時間	92
4.6.4	考察	93
4.7	むすび	94
第5章	ランダム位相シフトにおける二波長ロバスト計測	96
5.1	まえがき	96
5.2	従来研究	97
5.2.1	PCA による部分空間法を用いた一波長計測手法	97
5.2.2	超精度最小二乗法を用いた高精度一波長計測手法	99
5.2.3	楕円平面当てはめを用いたロバスト計測手法	101
5.2.4	ICA を用いた二波長計測手法	104
5.3	ICA による二波長計測法の問題点	107
5.4	提案手法	108
5.5	理論検証実験	111
5.6	評価実験	114
5.6.1	実験条件	114
5.6.2	実験結果	117
5.6.3	考察	127
5.7	むすび	128
第6章	結論	130
謝辞		132
参考文献		133
研究業績一覧		141

第1章 序論

近年，三次元計測技術は様々な分野に普及しており，特に製品の外観・形状検査において広く活用されている^{[1]-[3]}．これらの検査では，ミクロンやナノオーダーの計測精度が要求されるため，一般的にレンズ焦点法^{[4][5]}，アクティブステレオ法^{[6][7]}，干渉法^{[8]-[10]}などの三次元計測手法が用いられる．このうちアクティブステレオ法や干渉法は，静止した対象にパターン光や干渉縞として光を投影し，少ない撮影枚数で短時間かつ高精度に広範囲の計測が可能な手法である．

これらの計測手法において，より少ない撮影枚数から深度に関する情報を解析するために，位相シフト法が多く用いられている．この手法は，時間的に走査した投影光の位相を検出する方法であり，最低3枚の撮影画像で解析可能な優れた位相検出手法である．本研究では，この位相シフト法を用いた計測手法に着目し，「実利用に向けた自動外観検査システム」と，「静止物体を前提とすることに起因する計測の不安定性に関する問題」の2点に対して，有用な手法をそれぞれ提案する．

まず1つ目の「実利用に向けた自動外観検査システム」に対して，航空機組立の省力化を目指した外観検査システムを提案する．外観・形状検査は様々な産業でFA化が進んでいるが，航空機産業では自動車などの他産業と比較してFA化があまり進んでいない^{[11][12]}．これは，ロットあたりの年間生産台数が少ないことに起因していたが，近年，国内旅客機就航に向けて製造工程の効率化が進められている^{[13][14]}．そのうちのひとつとして航空機主翼組立におけるファスナ装着状態の検査が注目されている^[15]．ファスナとはボルトやリベットの一種であり，機体を構成するCFRPパネルなどの接合に利用される．一般的にファスナは金属導体であり，CFRPのような非金属体に接合する場合，接触抵抗が大きくなる．そのためファスナヘッド周辺に被雷した場合，接触抵抗の大きい接合部で放電する危険性がある^{[16]-[18]}．加えて，航空機主翼内部には燃料タンクが設置されるため，ファスナの装着状態は機体の安全性に大きく影響する．そのため，手で接触式測定器を用いた全数検査が実施されているが，現状の検査は非効率的である．例としてボーイング787に装着されるファスナは8万本にも及び，1機あたり4千時間の工数を要することが問題に挙げられる．これに対して本研究で

は、プロジェクタとカメラを用いた小型三次元計測器を構築し、ロボットアームに搭載した自動検査システムを提案して、有効性を示す。これにより従来の検査を自動化することで検査時間を短縮するとともに、ファスナ全体の三次元形状を取得できるため、トレーサビリティの保証も実現する。

そして2つ目の「静止物体を前提とすることに起因する計測の不安定性に関する問題」に対して、位相シフト法を用いたナノオーダ計測における計測精度の評価手法を提案する。位相シフト法を用いた計測装置は広く普及しているが、いくつかの問題点も抱えている^{[19]-[21]}。その中でも、計測物体の静止を前提とする点に関しては、一般的な静止環境であり、かつ要求精度がミリやミクロン単位の計測である場合、それほど影響はない。しかし、レーザ干渉計のようなナノ単位の計測では、一般的な静止環境においても、その波長を超える振動が往々にしてあり、計測精度に大きく影響する。この振動という問題に対して、Zygo社がVerifire QPZと呼ぶ振動の影響を補正して計測可能な位相シフト干渉計を実用化している^[22]。この手法では画素毎に解析される位相の信頼性を評価しており、その信頼性評価値を基に、イテレーションにより誤差を最小化することで補正を行う。しかし、このように実用化された計測器においても、150[nm]程度の振動までしか許容していない。依然として光源波長程度の振動環境下では、安定した計測が困難である。これに対して、本研究では位相信頼性の評価に着目し、その評価値を基に計測の安定性を保証する手法を提案する。本手法では、振動の中でも物体に対して垂直方向の振動にのみ着目し、撮影範囲単位で位相の信頼性を評価する。垂直方向の振動は対象全体が同じ距離だけ移動する現象であり、従来の画素単位で独立に評価する手法よりも高精度に推定できると仮説を立てた。本手法では、位相シフト法により求められる振幅画像と物体光の撮影画像との相関値を位相信頼性の評価尺度として用いる。ナノオーダの基準器を用いた実験により、各種関連手法で得られる評価値と計測誤差との相関関係について明らかにし、有効性を示した。これにより、位相シフト法による計測結果に含まれる誤差を求められるため、安定性および計測精度の保証が可能となる。

さらに2つ目の問題に対して、計測精度を評価するだけでなく、実環境においてもロバストに計測可能な二波長位相シフト計測法を提案する。Zygo社を代表として、振動環境においても安定して計測可能な装置が実用化されている。しかし、これらの計測手法の多くは、イテレーションにより誤差を最小化するため、解の収束性が保証されていないこと、パラメータの初期値に依存すること

などが問題として挙げられる．これに対して，近年ではパラメータに依存することなく，安定解を得ることが可能なリサージュ曲線に基づいた計測手法が提案され，さらなる高精度化・高速化が進んでいる^{[23]-[25]}．イテレーションにより誤差を最小化する手法では，カラーフィルタを用いるなどのハードウェアに特別な条件を加える場合を除いて，一波長の計測に限られていた．これに対してリサージュ曲線ベースの手法では，ハードウェア的な条件を加えることなく，二波長の計測をも実現した手法が出てきた^[26]．多波長に拡張することは，位相連結において光源波長の半分である位相差 π ，距離にすると単一波長の可視光では数百ナノメートルの高低差までしか計測が保証されない問題に対して有効である．多波長では，その合成波長まで計測可能な高低差を拡張でき，二波長では数ミクロン程度までの物体も計測可能である．このリサージュ曲線を用いた二波長計測法は，振動には安定して計測できることが示されている．しかしながら，シミュレーションやノイズの少ない単純な形状しか検証されておらず，様々な実物体に対する計測の安定性に関する議論は未だ十分ではない．これに対して，まず本研究では一波長計測で指摘されていた計測精度低下の要因となるノイズについて，二波長の計測に当てはめて計測の安定性を検証する．そして，計測精度低下の要因となるノイズを除外することで，ロバストに計測可能な手法を提案する．実環境で提案手法による計測を行い，ノイズが多い場合においても安定して計測可能であることを示す．

本稿の第2章では，様々な三次元形状計測手法の位置づけと位相シフトを用いた計測法の基礎原理について述べる．第3章で航空機用ファスナに対して位相シフト法による計測と画像処理技術を組み合わせた外観検査の応用例について述べる．第4章では，位相シフト法を用いた計測で問題とされる計測時の振動に着目し，計測の安定性を評価する手法について述べる．さらに第5章では，振動環境における二波長位相シフト計測について，実環境においてもロバストに計測可能な手法を述べる．最後に，第6章では結論を述べる．

第2章 基礎理論

本章では，本稿で使用する三次元形状計測手法の位置づけと，基礎理論について説明する．

2.1 三次元計測

光を用いた三次元計測法は，その高速性・非接触性から特に実用化が進んでおり，様々な原理に基づいた計測法が存在する．大まかな計測原理については，受動的・能動的計測法や，光の直進性・光速を用いる手法などというように，大別する考え方がいくつかある^[27]．本論文では，光の特性に基づいた原理をベースとして，図2.1に示す4つの計測原理に分類して考える^[28]．このように多様な計測手法が存在するが，それ故に決定的な手法がないということを示唆しており，現状では対象に合わせて最適な計測手法を選択する必要がある．本節では，各計測法について概要を述べる．

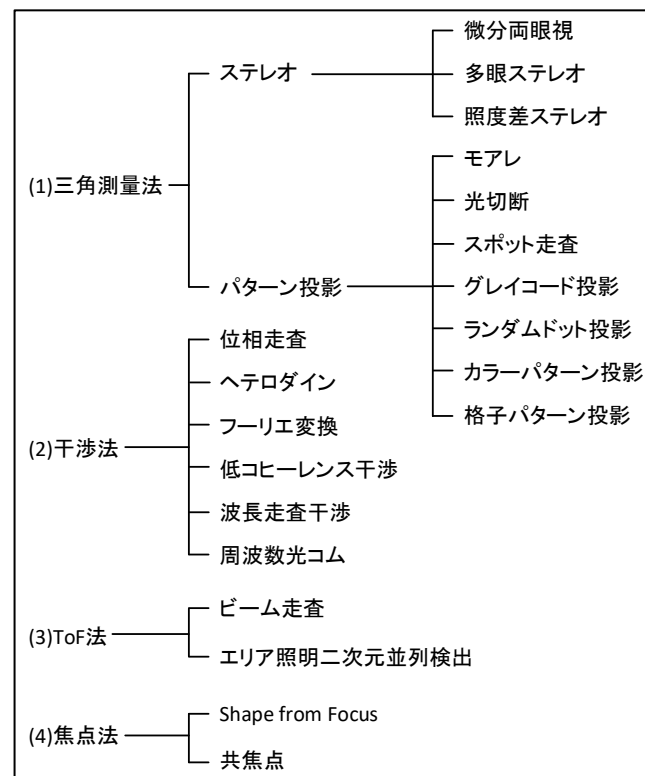


図2.1 三次元計測法

(1) 三角測量法

まず三角測量法とは、光の直進性を用いた幾何学的な計測手法である。異なる視点から観測したときの視差に基づいた手法であり、視差が大きいほど計測精度が高い、一方で計測不能領域（オクルージョン）が発生する。計測には視差の対応する計測点を探索する問題があり、手法としては受動的計測法であるステレオ法、能動的計測法であるパターン投影法に分けられ、アプローチが大きく異なる。これらの手法は、微小物体から巨大な構造物まで広範囲に対して適用可能な計測手法であるため、現在最も実用的に用いられている。

(2) 干渉法

次に干渉法については、光の特性の中でも波動の性質を用いた計測手法である。コヒーレントな光が複数重ね合わさると、その位相のズレに従い、合成振幅が変化する。この光を検出器で捉えると、干渉縞と呼ばれる光強度の変化を観測できる。干渉縞は、被検面と参照面との光路差が位相差を表し、光強度が変化する。干渉法では、この光強度変化から位相差を解析することで、光路差を求める。波長の $1/1,000$ ほどの分解能を得られ、圧倒的に高精度な手法である。

(3) Time of Flight (ToF) 法

ToF法^[29]とは、光速に基づいた手法である。照射光が物体表面を反射して戻るまでの時間を計測することで、光速と時間から物体の距離を求める。複数の光の干渉により発生した振幅から計測する干渉法とは異なり、ToF法では振幅変調されている光を照射する。そのためコヒーレント光源である必要がなく、広い計測範囲に適用でき、計測精度がある程度高いことが特徴である。特に同計測方式のLiDARは、屋外においても動作可能であり、近年ドローンや自動運転事業の社会的な発展により、急速に普及・技術革新が進んでいる。

(4) 焦点法

焦点法とは、光の集光による幾何学的なボケ特性に基づいた手法である。レンズのピントを物体表面に合わせることで、その位置を計測する。特に共焦点法は、物体と波長の組み合わせによっては、物体内部まで計測できるという点で利点大きい。しかし、XYZ方向に光を走査する必要があるため、著しく計測時間が長い。これに対して、走査を高速化する手法^[30]や、走査自体を無くす手法^{[31][32]}が出てきており、近年ではICチップのマイクロバンプ計測などで実利用化されている。

以降では、これらの中から本研究で用いる格子パターン投影法を含む三角測量法と、位相走査法を含む干渉法について、より詳細に原理を述べる。

2.2 三角測量法

本研究では、3章の航空機の外観検査に関する研究内容において、三角測量法を応用した計測手法を用いる。三角測量法は、離れた地点との距離を計測する手法である。図2.2に示すように、ある2点間 AB の正確な距離（基線長） L と、ある測定点 P との角度 θ_A , θ_B が既知である場合、 P との距離 PA , PB を余弦定理により算出することができる。さらに測定点との距離 Z についても、式(2.1)のように求められる。

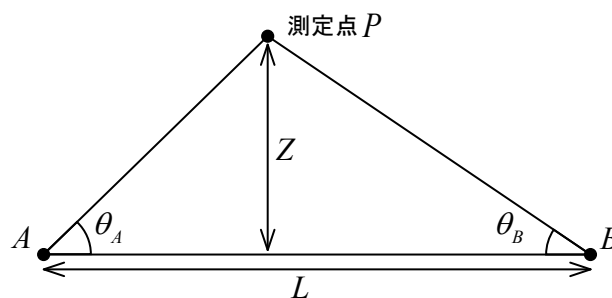


図2.2 三角測量法

$$Z = \frac{L}{(1/\tan \theta_A) + (1/\tan \theta_B)} \quad (2.1)$$

これら既知の A , B がともにカメラである場合にはステレオ法^[33]であり、一方がカメラ、もう一方がパターンを投影する照明系である場合にはアクティブステレオ法となる。本節では、このアクティブステレオ法である光切断法と格子パターン投影法について説明する。

2.2.1 光切断法

光切断法とは、計測対象にライン状のレーザ光（スリット光）を照射し、三角測量の原理を利用して距離を計測する手法である。図2.3に光切断法の原理図を示す。スリット光は、レーザスポット光をシリンダリカルレンズなどでライン状にして投影したものである。計測物体表面に投影されたスリット光は物体表面の形状に応じて変形し、カメラなどの撮像面上に投影される。通常は、

距離計算を単純化するために、スリット平面はカメラ座標の水平または垂直方向の軸と平行になるように設計する．このとき、計測距離 Z を式(2.2)により計算できる．ただし、 f はカメラレンズの焦点距離、 L は線分 AB の長さ、 y は基線位置の画像中心からの撮影面上での y 軸方向の距離、 θ はスリット光の投影角度を示している．

$$Z = \frac{L}{(y/f) + \tan \theta} = \frac{fL}{y + f \tan \theta} \quad (2.2)$$

光切断法では、これらの既知の情報を用いることで、式(2.2)から距離 Z を算出できる．そのため、距離 Z を正確に算出するには、4変数の値を正確に得る必要がある．実際に計測を行う際にはカメラや投影器を設置した後、カメラキャリブレーションを行い、これらの変数を求める．変数 L は各機器の位置関係に依存するため、その位置関係が変動した場合は再度キャリブレーションを行う必要がある．

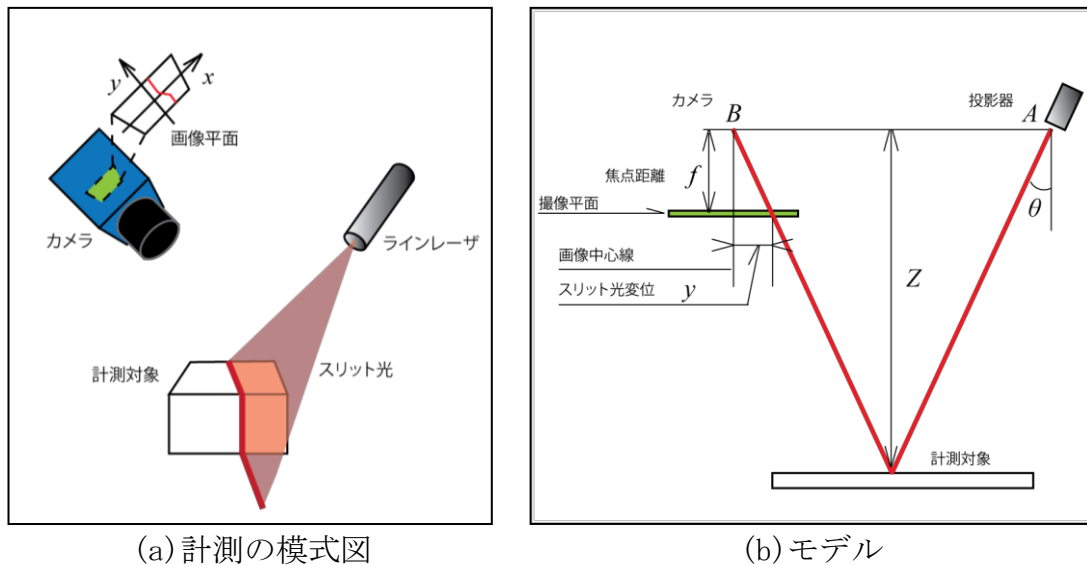


図2.3 光切断法

2.2.2 格子パターン投影法

本研究で用いる格子パターン投影法は、光切断法を利用した計測手法である．格子パターン投影法では、光切断法のスリット光の代わりに、二次元の格子パターンを投影することで三次元計測を行う．光切断法で対象全体を計測するに

は、計測対象を動かす、またはラインレーザを回転プリズムなどによりスキャニングする必要がある。そのため、計測する空間分解能は撮影回数に依存する。これに対して格子パターン投影法では、投影する二次元の格子パターンが照射される全ての領域で、カメラと投影器の対応関係が求まる。そのため、それらの対応点ごとに三角測量の原理を用いることができ、少ない撮影回数で高い空間分解能の計測が可能である。一般的に投影する格子パターンには、参照位相 δ を $\pi/2$ ずつシフトさせた4枚の投影像を用いることが多い。格子パターンを図2.4に示し、これを解析する位相シフト法については2.4節で述べる。

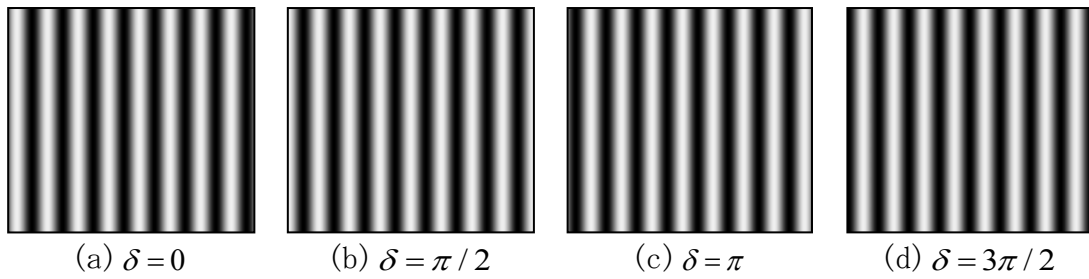


図2.4 格子パターン

2.3 干渉法

本研究では、4章の振動環境における安定計測に関する研究内容において、計測手法に干渉法を用いる。干渉法について説明するため、光が干渉する原理から、その原理を用いた計測装置である干渉計について述べる。

2.3.1 光干渉の原理

現代物理学では、光は電磁波の一種であることが知られている。ある波長 λ の光の進行方向を z 軸としたとき、時刻 t における光の振幅 E は式(2.3)のように表される。

$$\begin{aligned}
 E(z, t) &= A \cos(\omega t - kz + \phi_0) \\
 &= A \cos\left(2\pi f t - \frac{2\pi}{\lambda} z + \phi_0\right)
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

ここで k は波数 (距離 2π に入る波の数), f は光の周波数, ω は角速度である. 物理的な意味として, ωt は光の伝搬時間, kz は伝搬方向を表している. 式(2.3)の余弦関数を $E = A \cos \phi$ と表したとき, ϕ を光の位相と呼ぶ. ϕ_0 は, 原点 $z=0$, 時刻 $t=0$ のときの位相であることから, 一般的に初期位相と呼ばれる. ここで実数表現されている式(2.3)をオイラーの公式を用いて複素数で表現すると, 式(2.4)のように表せる.

$$E(z, t) = A \exp(j(\omega t - kz + \phi)) \quad (2.4)$$

三角関数ではなく複素指数関数で表現した場合, 初期位相を定数と捉ええると複素振幅として扱える. このように計算上扱いが容易になることから, 一般的に式(2.4)で扱われることが多い. この物理モデルを用いて, 2つの光と E_1 , E_2 が重ね合わさる (干渉する) と, 観測される光の強度は, 絶対値の二乗和となることから式(2.5)のようになる.

$$|E_1(z, t) + E_2(z, t)|^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\phi_2) \quad (2.5)$$

式(2.5)より, 2つの光が干渉すると光強度は余弦関数に従い変化することがわかる. この2つの光が干渉して発生した光を干渉縞と呼ぶ.

2.3.2 マイケルソン干渉計

干渉縞を利用することで波長や周波数, 位相を測定する装置を干渉計と呼ぶ. この干渉計の中でも物体の反射を捉えるものの1つとして, 最も一般的な干渉計がマイケルソン干渉計である^[34]. マイケルソン干渉計は, 図2.5に示す光学機器を用いて構成される. ここで, マイケルソン干渉計を用いた光路について順に説明する. まず, レーザから入射した光が, ビームスプリッタで2つの光路に分けられる. そして, その先の基準面と被検面を反射してビームスプリッタで再び重ね合わさり, 2つの光が干渉して干渉縞が発生する. この干渉縞が光検出器により受光されて検知される. 本研究では, 被検面から反射した光を物体光, 基準面から反射した光を参照光と呼称する.

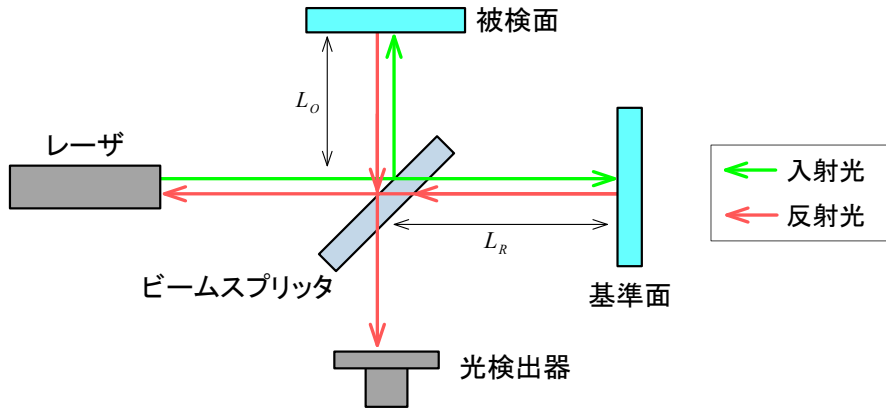


図2.5 マイケルソン干渉計の概念図

続いて、マイケルソン干渉計により被検面の距離情報が得られる原理について説明する．物体光・参照光を E_o , E_r ，ビームスプリッタから被検面と基準面の距離を L_o , L_r ，光の周波数を f ，波長を λ ，物体光・参照光の振幅を A_o , A_r とすると， E_o , E_r は式(2.6)のように表せる．

$$\begin{cases} E_o = A_o \exp \left\{ j \left(2\pi f t + 2\pi \frac{2L_o}{\lambda} \right) \right\} \\ E_r = A_r \exp \left\{ j \left(2\pi f t + 2\pi \frac{2L_r}{\lambda} \right) \right\} \end{cases} \quad (2.6)$$

ここで，検出される干渉縞の光強度 I は，式(2.6)より式(2.7)となる．

$$I = |E_r + E_o|^2 = A_r^2 + A_o^2 + 2A_r A_o \cos \left(2\pi \frac{L_o - L_r}{\lambda / 2} \right) \quad (2.7)$$

式(2.7)では，干渉縞の位相から時間軸の位相情報が除去されて，空間の距離情報として光路差 $L_o - L_r$ を得られることがわかる．被検面の距離情報は光路差としてしか得られないため，一般的に基準面には平面ミラーが置かれる．

しかし，図2.5に示す構成では，基準面と被検面を反射した光が光源であるレーザに戻る光路が存在する．レーザ光が再び光源に戻ると，レーザの発振が不安定になる．そこで偏光の原理を用いることで，この問題が回避された．偏光の原理を用いたマイケルソン干渉計を図2.6に示す．レーザから入射した光は1/2波長板を通過して，偏光ビームスプリッタにより，2つの光路に分けられる．

偏光ビームスプリッタを通過する光は、P偏光の光は直進するが、S偏光の光は曲がり進む。P偏光・S偏光の光の通過率は、1/2波長板の角度を変更することで調整できる。そして、それぞれの反射面を反射して1/4波長板を2回通過することで偏光角が90[deg]変化し、P偏光の光はS偏光に、S偏光の光はP偏光となる。そして、2つの光は光検出器の方向へ進行して干渉するため、光が入射するレーザー光源側へ通過する光を抑えられる。このように偏光の原理を用いたマイケルソン干渉計は、被検面と基準面から反射した干渉縞のみを観測できる。

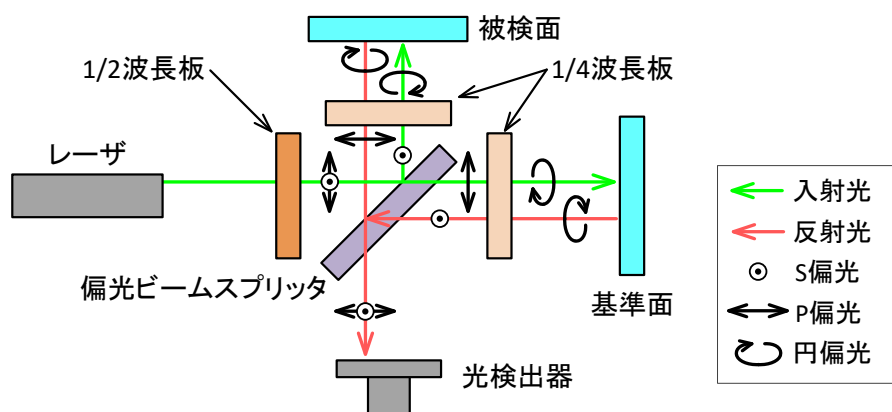


図2.6 偏光の原理を用いたマイケルソン干渉計の概念図

2.4 位相シフト法

本節では、正弦・余弦波状に投影・撮像された光の物理情報を検出する手法の1つである位相シフト法について述べる。位相シフト法は、参照光に既知の位相変調を与えることで、物体光の情報を得る手法である。一般的に位相シフト法では、式(2.8)で表現できる光の物理モデルに基づいて測定する。ここで、 x は二次元画像上の座標、 ϕ は物体光の位相（物体位相）、 δ は参照光に与える位相（参照位相）、 a は光強度の振幅、 b は平均光強度を表す。

$$I(x) = b(x) + a(x) \cos(\phi(x) + \delta) \quad (2.8)$$

格子パターン投影法では、プロジェクタなどの光源から式(2.8)の光強度パターンを振幅変調して投影することで、位相シフト法による解析を行える。この場合には、物体位相 ϕ が視差角を表し、三角測量法の原理に基づいて距離を求め

る．これに対して干渉法では，式(2.7)と比較してわかるように，式(2.8)の各項を $b = A_R^2 + A_O^2$ ， $a = 2A_RA_O$ ， $\phi = 2\pi L_O / (\lambda/2)$ ， $\delta = 2\pi L_R / (\lambda/2)$ と置き換えられる．これは，物体位相 ϕ が距離に対して線形な関数であることを表し，物体位相 ϕ から直接距離に関する情報を得られる．以降では，式(2.8)の物理モデルを用いた代表的な位相解析法である3つの手法について詳しく説明する．

2.4.1 4ステップアルゴリズム

まずは，位相シフト法で最も簡単な4ステップアルゴリズムについて説明する^[35]．参照位相 δ に対して $\delta_k = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ ($k=0, 1, 2, 3$) と位相を90[deg]ずつ制御することで，式(2.9)のように輝度 I_i を得られる．

$$\begin{cases} I_0 = b(x) + a(x) \cos(\phi(x)) \\ I_1 = b(x) + a(x) \cos\left(\phi(x) + \frac{\pi}{2}\right) = b(x) + a(x) \sin(\phi(x)) \\ I_2 = b(x) + a(x) \cos(\phi(x) + \pi) = b(x) - a(x) \cos(\phi(x)) \\ I_3 = b(x) + a(x) \cos\left(\phi(x) + \frac{3\pi}{2}\right) = b(x) - a(x) \sin(\phi(x)) \end{cases} \quad (2.9)$$

これら4つの方程式は，式(2.10)のように対にすることで平均光強度 b の影響を除去でき，位相 ϕ を求められる．

$$\phi(x) = \tan^{-1} \left(\frac{I_3 - I_1}{I_0 - I_2} \right) \quad (2.10)$$

2.4.2 最小二乗法アルゴリズム

干渉縞から得られる光強度は，式(2.8)のように表現された物理モデルを用いると，参照位相 δ は制御可能な既知のパラメータであるため，振幅 a ，位相 ϕ ，バイアス b の3つの未知数を持つ正弦関数と捉えることができる．そこで，観測される光強度から3つの未知変数を求める解法として，最小二乗法を用いた手法がある．これは最小二乗法により，正弦関数にフィッティングすることで位

相を復元する手法であり，Bruningらにより議論され，その後Greivenkampらにより厳密に定義した^{[36][37]}．本項では，この最小二乗法を用いた位相解析法について述べる．

正弦関数は非線形関数であるため，非線形最小二乗問題となりそのままの数式モデルで解くことは非常に困難である．そこで，正弦・余弦関数の加法定理を用いて式(2.11)のように変換することで，余弦関数を位相 ϕ により得られる定数として式(2.12)の線形モデルに置き換えて最小二乗法により解く．ここで， I_k は k 回目のサンプリングで得られる光強度を表す．

$$\begin{cases} p_0(x) = b(x) \\ p_1(x) = a(x) \cos(\phi) \\ p_2(x) = a(x) \sin(\phi) \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} I_k(x) &= b(x) + a(x) \cos(\phi(x) + \delta_k) \\ &= p_0(x) + p_1(x) \cos(\delta_k) + p_2(x) \sin(\delta_k) \end{aligned} \quad (2.12)$$

式(2.12)の残差平方和 E は検出される光強度 I_k を用いて，式(2.13)になる．

$$E(x) = \sum_{k=1}^N \left[I_k(x) - \{b(x) + a(x) \cos(\phi(x) + \delta_k)\} \right]^2 \quad (2.13)$$

この残差平方和を最小二乗法に基づき，残差を最小化する3元1次連立方程式を行列表現すると，式(2.14), (2.15)を用いて式(2.16)のように表せる．

$$\mathbf{A}(\delta_k) = \begin{pmatrix} N & \sum \cos(\delta_k) & \sum \sin(\delta_k) \\ \sum \cos(\delta_k) & \sum \cos^2(\delta_k) & \sum \cos(\delta_k) \sin(\delta_k) \\ \sum \sin(\delta_k) & \sum \cos(\delta_k) \sin(\delta_k) & \sum \sin^2(\delta_k) \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{B}(x, \delta_k) = \left(\sum I_k(x) \quad \sum I_k(x) \cos(\delta_k) \quad \sum I_k(x) \sin(\delta_k) \right)^T \quad (2.15)$$

$$\begin{pmatrix} p_0(x) \\ p_1(x) \\ p_2(x) \end{pmatrix} \mathbf{A}(\delta_k) = \mathbf{B}(x, \delta_k) \quad (2.16)$$

これにより得られた p_1, p_2 から位相 ϕ と振幅 a ，平均光強度 b は，式(2.17), (2.18)により求められる．

$$\phi(x) = \tan^{-1} \left(\frac{-p_2(x)}{p_1(x)} \right) \quad (2.17)$$

$$a(x) = \sqrt{p_1^2(x) + p_2^2(x)} \quad (2.18)$$

$$b(x) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_k(x) \quad (2.19)$$

最小二乗法によるアルゴリズムは、3つ以上の干渉縞を得ることで光波面の位相を求められることを示した。

2.4.3 フーリエ変換アルゴリズム

前項では、最小二乗法を用いた位相復元手法について述べた。しかし、実際に干渉縞に対して位相変調を与えるとき、一定量の位相シフトを与えて、かつ一定間隔でサンプリングする場合が多い。光強度変化の周期が T となるように位相変調を加えると、時刻 t に与えられる参照位相は式(2.20)となる。

$$\delta_t = \frac{2\pi}{T} t \quad (2.20)$$

この一定間隔の位相シフト量が得られた場合に、有効な位相解析法として、武田らによりフーリエ変換位相シフト法が提案されている^{[38][39]}。このフーリエ変換位相シフト法により位相を求める手法について説明する。干渉縞の光強度変化を表す式(2.8)をオイラーの公式で表現すると、式(2.21)のように表せる。ここで、これらは画素ごとに独立であるため x を省略する。また、 c^* は c の複素共役、 f_0 は位相変調される基本周波数を表し、 $f_0 = 1/T$ である。

$$\begin{aligned} I_t(x) &= b(x) + a(x) \cos(2\pi f_0 t + \phi(x)) \\ &= b(x) + \frac{1}{2} a(x) \left[\exp\{j(2\pi f_0 t + \phi(x))\} + \exp\{-j(2\pi f_0 t + \phi(x))\} \right] \\ &= b(x) + c_t(x) \exp(j2\pi f_0 t) + c_t^*(x) \exp(-j2\pi f_0 t) \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\left(c_t(x) = \frac{1}{2} a(x) \exp(j\phi(x)) \right)$$

式(2.21)をフーリエ変換すると、時間周波数 f について、式(2.22)に示す複素フーリエ係数 F を得られる。

$$F(f, x) = B(f, x) + C(f - f_0, x) + C^*(f + f_0, x) \quad (2.22)$$

$$\left(B(f, x) = \int_{-\infty}^{\infty} b(x) \exp(-2\pi ft) dt, C(f, x) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} c_t(x) \exp(-2\pi ft) dt \right)$$

ノイズがない場合は位相変調周波数 f_0 と直流成分のみとなるが、一般にはノイズが存在するため他の項も出現する。周波数 f_0 の成分は位相シフトにより得られた輝度変化の1次成分を表し、ノイズのような位相値を求めるのに不要な成分は、それ以外の周波数成分に含まれる。そこで周波数 f_0 のスペクトルのみを抽出し、虚部と実部の比の逆正接を計算すると、極めて精度良く位相値を求める。上記の式より初期位相 ϕ は、複素フーリエ係数 F の実部と虚部の値から式(2.23)のように求めることができる。

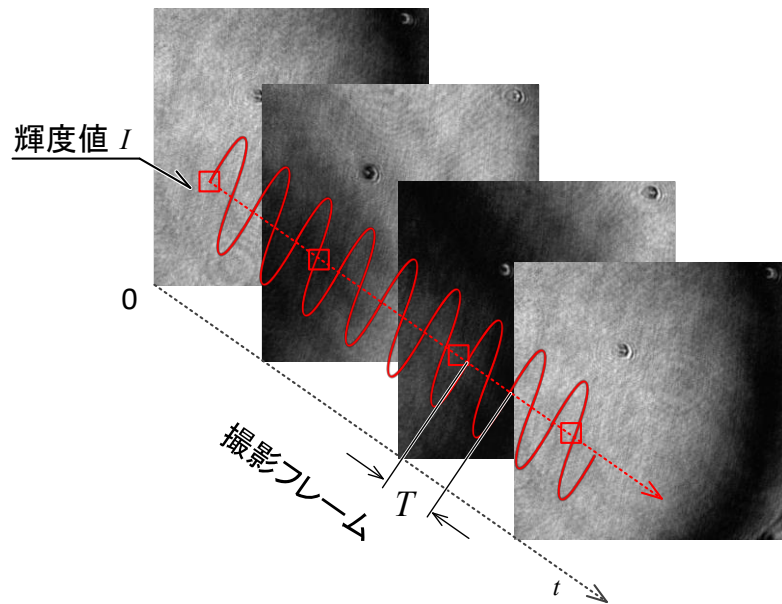
$$\tan \phi(x) = \frac{\text{Im}\{F(f_0, x)\}}{\text{Re}\{F(f_0, x)\}} \quad (2.23)$$

これを離散フーリエ変換（DFT）により記述すると、式(2.24), (2.25)により画素 x における位相 ϕ と振幅 a を求められる。

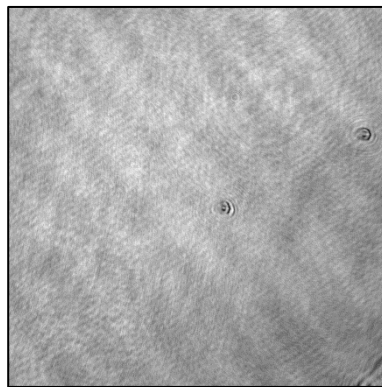
$$\phi(x) = -\tan^{-1} \left(\frac{\sum_{t=0}^{T-1} I_t(x) \sin(2\pi ft)}{\sum_{t=0}^{T-1} I_t(x) \cos(2\pi ft)} \right) \quad (2.24)$$

$$a(x) = \frac{2}{N} \sqrt{\left\{ \sum_{t=0}^{T-1} I_t(x) \cos(2\pi ft) \right\}^2 + \left\{ \sum_{t=0}^{T-1} I_t(x) \sin(2\pi ft) \right\}^2} \quad (2.25)$$

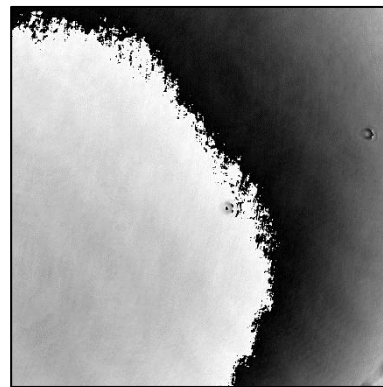
このDFTによる解法は、最小二乗法アルゴリズムと密接な関係があり、一様にサンプリングされた位相ステップが得られた場合には、式(2.14)で示した行列 \mathbf{A} の非対角要素がすべて0になることを表している。フーリエ変換位相シフト法における輝度変化の概念図とともに、解析結果として振幅と位相の例を図2.7に示す。



(a) 概念図



(b) 振幅



(c) 位相

図2.7 フーリエ変換位相シフト法

第3章 航空機用ファスナの自動外観検査

本章では、航空機用ファスナの検査に着目し、プロジェクタとカメラ、ロボットを用いた自動検査システムを提案する。特に、計測に関する、得られる画像・三次元形状を用いた検査アルゴリズムの検討結果を報告する。提案するシステム・手法について、実利用化の可能性とその有用性を示す。

3.1 まえがき

近年、国内旅客機の就航に向けて国内航空機産業における機体製造工程の効率化が進んでいる^{[12][14]}。その取り組みの一つとして、航空機主翼組立におけるファスナ装着状態検査の自動化が望まれている^[15]。ファスナとはボルトやリベットの一種であり、機体を構成するアルミやCFRPパネルを接合するために利用される。一般的にファスナは金属導体であり、接合する構造体がCFRPのような非金属体である場合、金属同士の接合と比べて接触抵抗が大きくなる。そのため、ファスナヘッドやその周辺に被雷した場合、電流の一部がファスナに流れ込み、接触抵抗の大きい接合部で放電が発生する可能性がある^[16]。航空機主翼内部には燃料タンクが兼ね備えられており、ファスナの装着状態は機体の安全性に大きく影響する。そのため、ファスナ装着後の検査が必要不可欠であり、現在は全てのファスナに対して接触式測定器であるデプスゲージを用いた人手による検査が実施されている（図3.1）。



(a) デプスゲージ



(b) 検査の様子

図3.1 検査装置とその使用例

しかし、人手による検査は非効率的であり、例えばボーイング787の主翼に装着されるファスナは8万本にも及ぶため、1機あたり4千時間の工数を要する。さらに、航空機業界では製造工程のトレーサビリティが重要視されており、検査記録を残す必要がある。しかし、現在は検査員が検査結果を手書きで記録しているため、非効率的である。

現在、画像処理技術を用いた航空機主翼の外観検査に関する研究が進んでいる^{[40]–[43]}。これらの外観検査のうち、ファスナの検査に関する研究としては、ファスナ周辺にできる亀裂を検査する研究が行われている。Melらは小型遠隔制御ロボットを用いた主翼表面上の亀裂に対する検査手法を提案している^[44]。ロボットを滑走させて撮影した画像からエッジ特徴によりファスナ穴を検出して、ファスナ穴付近の亀裂をニューラルネットワークにより検出している。Yimingらは光磁気を用いて機体表面と表面下の様子を撮影し、ファスナ付近にある亀裂を検出するシステムを提案している^[45]。撮影した光磁気画像を閾値で二値化するとファスナが斜めに取り付けられたものは二値化ラベルの形状が変化するため、その特徴を用いて亀裂を検出しており、実験では誤検出率8.3%で検出可能と示されている。しかし、これらの研究ではファスナの装着状態については検討されていない。特に光磁気を用いた手法では推定したファスナの傾きを推定することで亀裂を検出しているが、ファスナの取り付け深さの異常を検出することは不可能である。

これに対して本研究では、画像処理・三次元計測を用いたファスナ装着状態の自動検査システムを提案する。一般的に現在のファスナ装着状態検査では、パネル面からのリベット面の深さが規定範囲内であるかを良否判定基準として用いている。本研究においてもその基準に基づき、ファスナとその周囲の翼面パネル部分の三次元計測結果を用いて自動検査を行う。具体的な検査システムの構成として、本研究ではプロジェクタとカメラを用いた小型三次元計測器を構築し、それをロボットアームに搭載した自動検査システムを提案する。ロボットアームにより計測器をファスナが計測可能な位置へ移動させた後に、プロジェクタからパターン光を投影して、それをカメラで撮影することで三次元計測を行う。計測時の撮影画像と復元した三次元形状からファスナ装着状態の良否判定に必要なファスナの傾きと深さを算出する。システム自動化のため、二次元画像に対してSnakesを用いたファスナ部の検出・切り出し手法、三次元形状に対して平面・円推定にRandom Sample Consensus (RANSAC)^{[46][47]}を用い

た傾きと深さの測定手法を提案する．提案手法の有効性は，接触式測定器による測定結果と比較して，統計的にシステムの検査精度を示す．

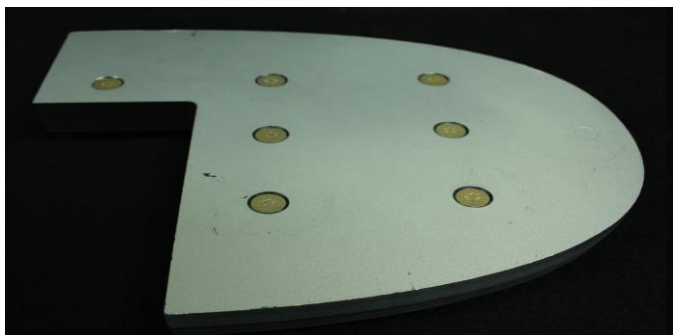
提案システムでは，ファスナ全体が規定範囲内であるかのみでなく，パネル面に対するファスナ重心の深さとファスナ面の傾きを算出する．そのため，ファスナの装着状態に関する記録データを軽量化でき，データの確認を容易にする．提案手法は検査の自動化を実現するとともに，ファスナ装着状態の画像や三次元形状・翼面パネルに対するファスナの傾き・中心の深さを定量データとして記録でき，トレーサビリティの向上が見込める．

3.2 検査対象・システムの概要

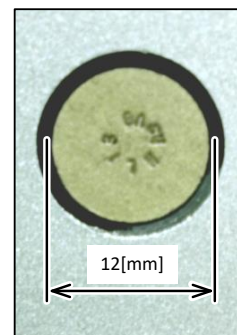
本節では、本稿で用いる計測装置および対象の概要について説明する。

3.2.1 検査対象・検査項目

本研究では、CFRP製の主翼に装着されたファスナの検査を目標として、検査対象とするファスナは直径12[mm]と10[mm]の2種類である。翼面パネルを模して作成した実験用サンプルをファスナの拡大図とともに図3.2、図3.3に示す。

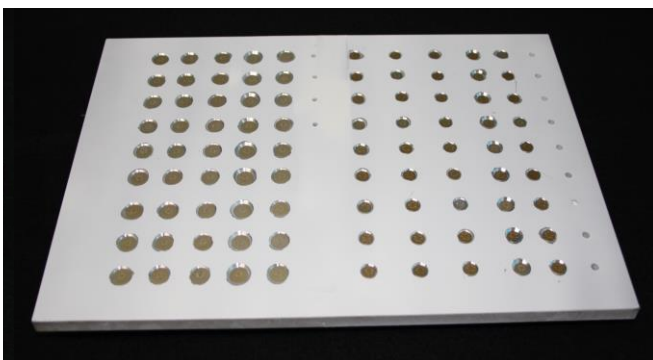


(a) パネル



(b) ファスナ拡大

図3.2 12[mm]のファスナサンプル



(a) パネル



(b) ファスナ拡大

図3.3 10[mm]のファスナサンプル

10[mm]と12[mm]のファスナではパネル表面の塗装、ファスナの材質が異なる。12[mm]のサンプルはCFRPにファスナを装着したものである。10[mm]のサンプ

ルはアルミの平板にファスナを装着したものであり、外観をCFRPに似せるため、パネルを白、パネルとファスナの境界部を黒に塗装してある。航空部品はトレーサビリティを保证するために、全てに部品番号が割り当てられている。ファスナにもそれぞれ部品識別するための文字が打刻されており、ファスナに打刻される文字列や箇所にはバラツキがある。本研究では、撮影画像に写る翼面パネルをパネル部、ファスナの領域をファスナ部、翼面パネルとファスナの間に存在する黒い領域を境界部と呼称する。

現在のファスナ装着状態の検査としては、ファスナの面全体が一定範囲内に収まるか否かにより良品・不良品が判定されている。このファスナの面全体の装着状態として数値化するために、本研究では以下の2点を検査項目として定めた。

- ・パネル面に対するファスナ面の傾き
- ・パネル面に対するファスナ中心点の深さ

これらを検査項目とした場合に、要求される計測精度は、傾き誤差 $0.28[\text{deg}]$ 、深さ誤差 $50[\mu\text{m}]$ である。

3.2.2 検査装置

検査装置は、カメラとプロジェクタを用いて構築した小型三次元計測器と、それを搭載したロボットアームで構成される。三次元計測器には、ロボットアームに搭載可能な小型計測器を構築した。計測器の外観を図3.4に示す。計測時における計測装置と対象の位置関係は、鏡面反射が最も少なくなるように撮影を行う。翼面パネルはCFRPであるため金属に近い光沢を持つが、塗装処理が施されている。そのため、光源とカメラで入射角・反射角が等しいと鏡面反射が多く観測されるが、その角度差を大きくすると鏡面反射成分を少なくかつ拡散反射成分を多くするように観測できる。そこで本研究では、光源であるプロジェクタに対して正対するように撮影することとして、鏡面反射が可能な限り少なくなるように計測を行う。検査システムに用いるカメラ、レンズ、プロジェクタ、ロボットアームの仕様を表3.3～表3.4に示す。

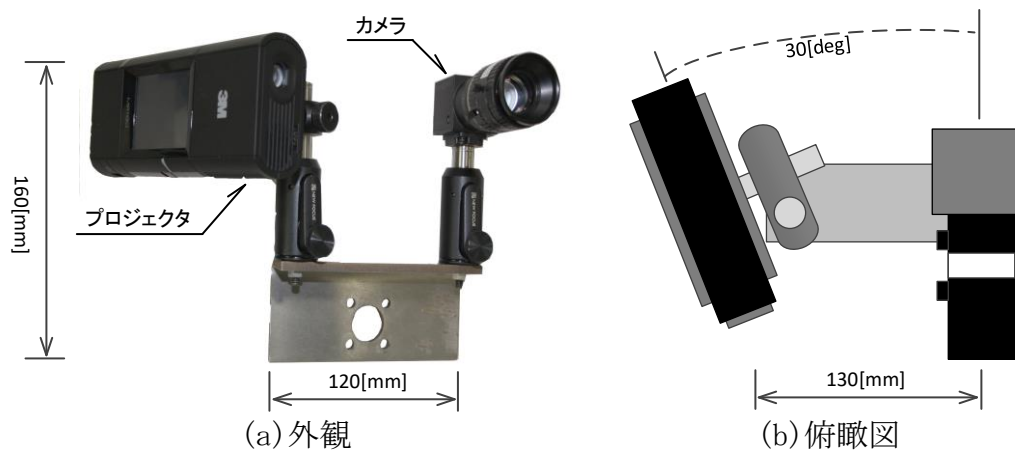


図3.4 三次元計測器

表3.1 カメラレンズ仕様

メーカー	computar
型番	M2514-MP
焦点距離[mm]	25
最大口径比	1 : 1.4
外観	

表3.2 プロジェクタ仕様

メーカー	3M
型番	MP180
最大輝度[lm]	30
パネルタイプ	LCOS方式
パネル画素数[pixel]	1440×768
投射可能距離[m]	300～2440
投射レンズ	F値2.6 / 焦点距離22[mm]
外形寸法[mm]	150×65×33
外観	

表3.3 カメラ仕様


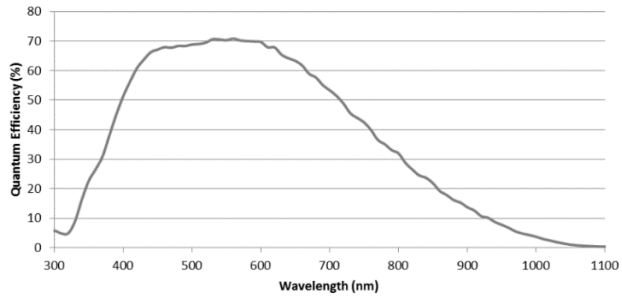
メーカー	PointGrey
型番	FL3-GE-50S5M-C
撮像素子	Sony ICX655
解像度[pixel]	2448×2048
素子サイズ[μm]	3.45
外観	
分光特性	

表3.4 ロボットアーム仕様

メーカー	三菱電機
型番	RV-4FL
動作自由度	6軸
駆動方式	ACサーボモータ
外観	

3.3 提案手法

本節では、提案する検査システムを用いた検査の内容について述べる．提案システムの検査フローを図3.5に示す．検査フローより，ロボットアーム移動後の各工程の手法について各項で詳しく説明する．

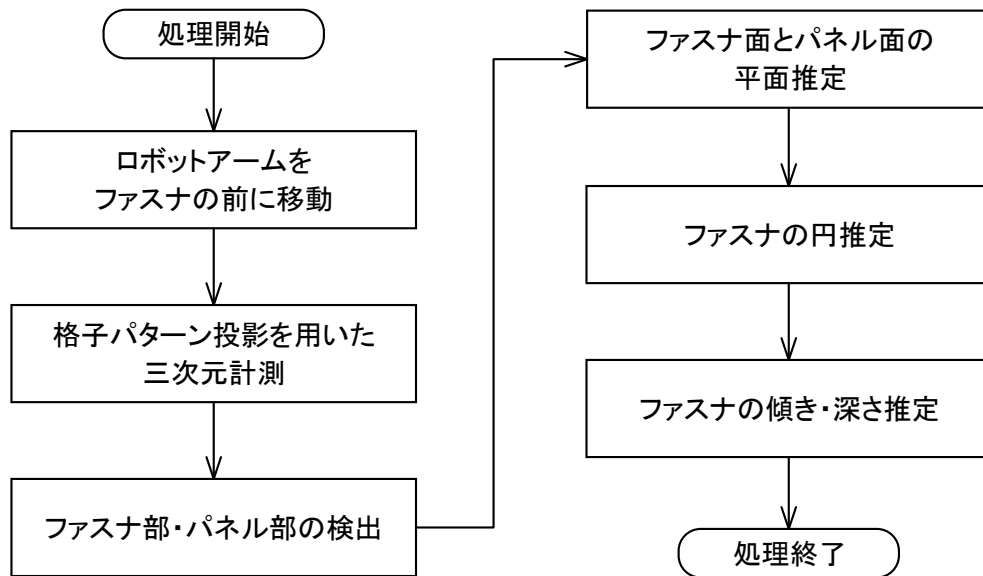


図3.5 検査フロー

3.3.1 三次元計測

計測手法には、格子パターン投影法を用いる．格子パターンには、位相を $\pi/2$ ずつシフトした4枚の正弦波パターンを投影して、撮影画像から位相シフト法の4ステップアルゴリズムを用いて位相を復元する^[48]．プロジェクタを基準とした絶対位相を求めるために、図3.6(a)(b)に示すように周期の異なる正弦波パターンを用いて大域位相と局所位相を復元する．そして大域位相を基に局所位相を位相連結するGlobal Phase Unwrappingにより、空間分解能の高い絶対位相を求める^{[49]–[51]}．この計測手法では、大域位相4枚 + 局所位相4枚 の合計撮影画像8枚のみでプロジェクタとカメラの対応関係が一意に求まる三次元計測が可能であり、高速かつ高精度に三次元形状を得られる．実際にファスナを計測した撮影画像と三次元形状を図3.6(c)に示す．

本研究では、三次元計測の前に行うレンズキャリブレーションにはZhangの手法^[52]を用いてレンズ歪み補正パラメータを求め、プロジェクタとカメラの対応関係を求めるキャリブレーションには全空間テーブル化手法^[53]を用いる。

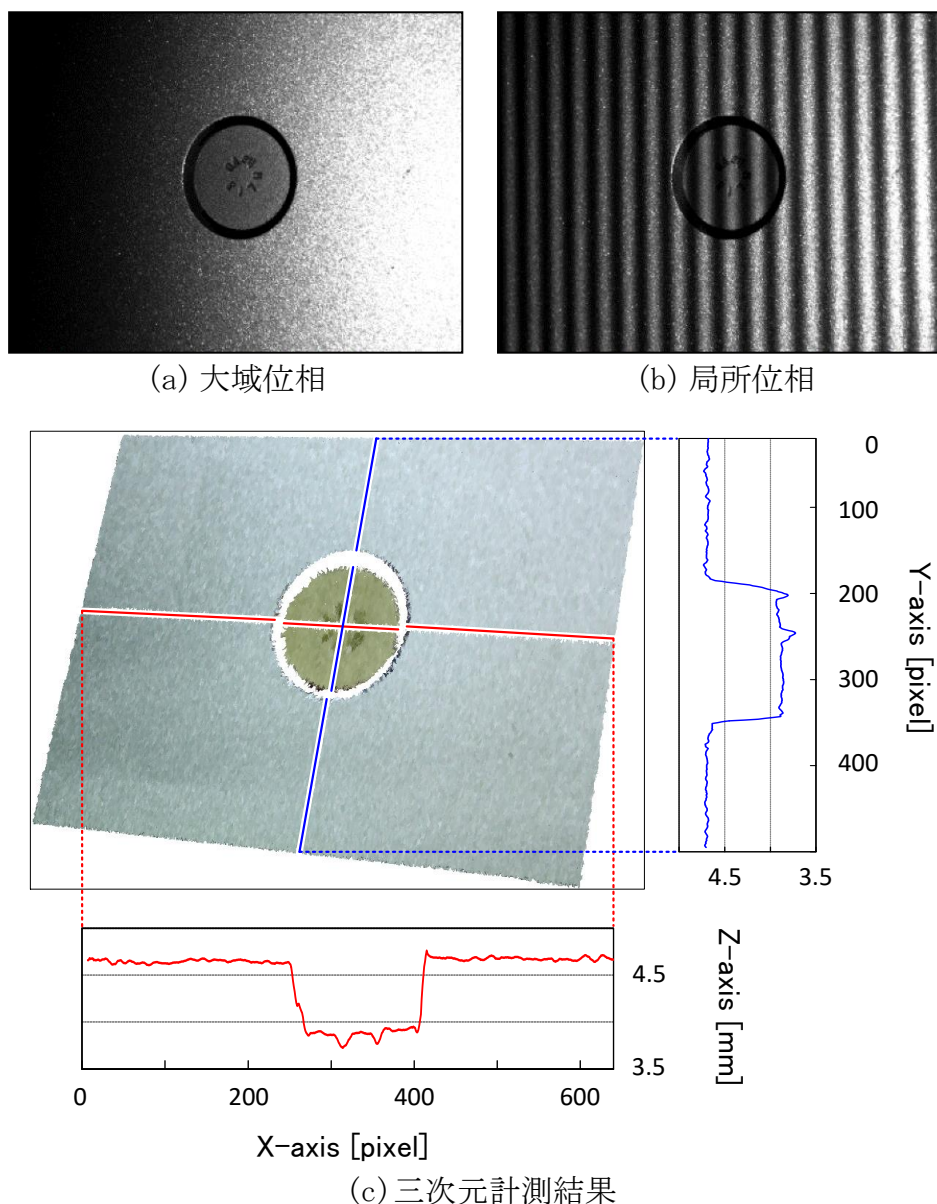


図3.6 ファスナの三次元計測データ

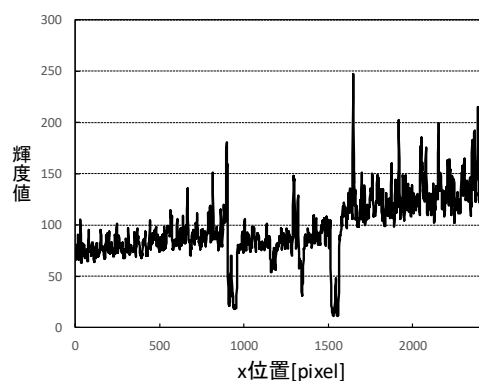
3.3.2 ファスナ部・パネル部の検出

ファスナの深さと傾きを算出する前処理として、画像からファスナ部とパネル部の検出を行う。計測時間短縮のため投影枚数を増やすことなく、計測時に

撮影する正弦波パターンの画像のみからテクスチャ画像を生成する．局所位相を求めるために投影した4枚の正弦波パターンの撮影画像を平均化することで，平均光強度を取得でき，図3.7(a)に示すようなファスナ・パネルのテクスチャ画像を得られる．画像中には，パネル面の法線とプロジェクタの照射方向の角度差に従い，平面上のシェーディングが存在する．そのため画像の輝度に対して近似平面のパラメータを求めて，テクスチャ画像との差を求めることでシェーディングの除去された画像（図3.7(c)）を得る．シェーディング補正前後の輝度値の断面図を図3.7(b) (d)に示す．シェーディング補正では，補正後の近似平面が輝度値128になるように補正を行う．



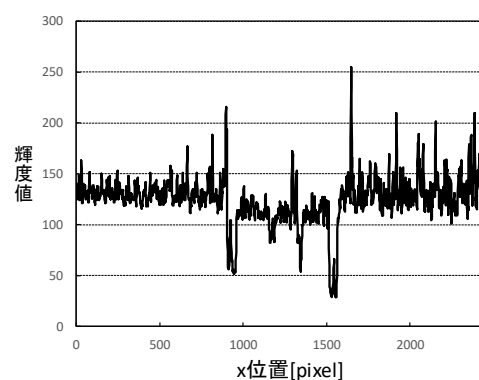
(a) 撮影画像



(b) (a)の輝度値



(c) 補正画像



(d) (c)の輝度値

図3.7 シェーディング補正

シェーディング除去されたファスナのテクスチャ画像を用いて，ファスナ部の検出を行う．まず，粗くファスナの位置を検出するにあたり，ファスナ面がパネル面よりも全体的に輝度が低い特性を用いる．画像の輝度に対して閾値（実験的に100とした）で二値化することでファスナの位置を検出する．二値化

後の画像とシェーディング補正後の画像における輝度値のヒストグラムを図3.8に示す．シェーディング補正により，パネル面全体の輝度が平均128のガウス分布に近い分布で集中しており，それよりも低い輝度がファスナ領域であることを表している．ここからさらに，二値化画像に対するラベリング処理を行い，面積の大きいラベルを基にファスナを含む領域を決定し，切り出す．

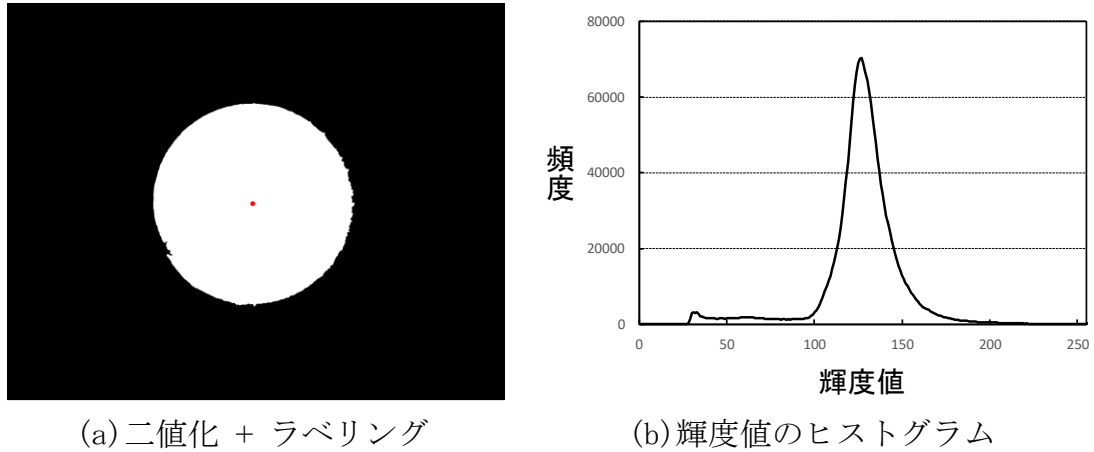


図3.8 粗いファスナの位置検出（赤点：重心座標）

ファスナ部の切り出しには，輪郭抽出法の一つであるSnakes^[46]を用いる．ファスナの検出に三次元形状を用いない理由としては，ファスナ面とパネル面の1つの平面になる場合に，検出できない可能性がある．そのため，ファスナの検出には二次元画像ベースの手法を用いる．また，画像ベースの代表的なセグメンテーション手法として，Level Set^{[54][55]}やGraphCut^{[56][57]}など様々な手法が提案されている．これらの両手法は，エネルギー関数を定義することで，高精度に抽出できる．しかし，本研究で対象とするファスナについては，円形の領域が1つしか存在しないことが既知である．そのため，セグメンテーション領域が1つになることを保証しない他の手法では，セグメンテーション後の扱いを考慮する必要がある．この特性から，Snakesによるセグメンテーションが最も実現が容易であると考えられ，採用することとした．

Snakesでは，式(3.1)で定義されるエネルギー E_{snakes} を最小化することで，輪郭点集合 $U = \{\mathbf{v}_i\}$ ，($i=1 \sim N, \mathbf{v}_i = (x_i, y_i)$)を求める．ただし，式(3.1)に用いる各エネルギー関数の係数 α ， β ， γ には， $\alpha + \beta + \gamma = 1$ の制約式を用いる．式(3.1)において一般的に用いられる各エネルギー関数は，式(3.2)～(3.4)のように定義される．このとき， \bar{d} は隣接する輪郭点 \mathbf{v}_i 間のユークリッド距離の平均値， ∇I は

輪郭点を中心としたウィンドウ内の各画素におけるXY方向の微分値をそれぞれ合計した2次元の勾配ベクトルである．各エネルギー関数 E_{cont} ， E_{curv} ， E_{image} は，それぞれ全輪郭点間の平均距離に対する輪郭点間の距離の差，輪郭線の曲率，輪郭点周辺の勾配に関するエネルギーを表す．

$$E_{snakes} = \sum_{i=1}^N \{ \alpha E_{cont}(\mathbf{v}_i) + \beta E_{curv}(\mathbf{v}_i) + \gamma E_{image}(\mathbf{v}_i) \} \quad (3.1)$$

$$E_{cont}(\mathbf{v}_i) = \left| \bar{d} - \|\mathbf{v}_{i+1} - \mathbf{v}_i\| \right| \quad (3.2)$$

$$E_{curv}(\mathbf{v}_i) = \|\mathbf{v}_{i+1} - 2\mathbf{v}_i + \mathbf{v}_{i-1}\| \quad (3.3)$$

$$E_{image}(\mathbf{v}_i) = -\|\nabla I\|^2 \quad (3.4)$$

$$E_{image}(\mathbf{v}_i) = -\|\nabla I\|^2 \cos \theta = -\|\nabla I\|^2 \frac{\mathbf{c} \cdot \nabla I}{\|\mathbf{c}\| \|\nabla I\|} \quad (3.5)$$

式(3.4)で定義されるエネルギー関数を用いたSnakesは，勾配強度のみを用いているため，輪郭が隣接して複数存在する場合に収束する場所が不確定となる．本研究ではファスナの輪郭のみを検出するために，ファスナ中心からの輝度変化に注目した．ファスナ部から境界部への輪郭は輝度が小さくなり，境界部からパネル部への輪郭は輝度が大きくなる．この輝度変化にあわせて，Snakesにおける内部エネルギーの関数を式(3.5)のように定義し，図3.9に式(3.5)のエネルギー算出方法の模式図を示す．ただし，全輪郭点の重心座標と \mathbf{v}_i 間のベクトルを \mathbf{c} ， ∇I と \mathbf{c} のなす角を θ とすると，輪郭点の初期位置はファスナラベルの重心座標から円周状に等間隔で配置する．図3.8(a)の二値化画像に赤点で示した重心座標を初期位置としたとき，算出されるエネルギーの分布を図3.10(a)に示す．ファスナの輪郭においてエネルギーが低くなることが確認できる．Snakesの勾配に関するエネルギー関数に式(3.4)を用いた手法を従来手法，式(3.5)を用いた手法を提案手法として比較した．提案手法でSnakesに使用するパラメータは予備実験により $\alpha = 0.10$ ， $\beta = 0.65$ ， $\gamma = 0.25$ を用いることとした．さらに輪郭点については，制御する輪郭点の数を50点として，その初期位置はファスナの直径に合わせて，12[mm]ファスナでは半径280[pixel]，10[mm]ファスナでは半径210[pixel]の円周状に配置することとした．提案手法によるファスナ部の輪郭検出結果を図3.10(b)に示す．

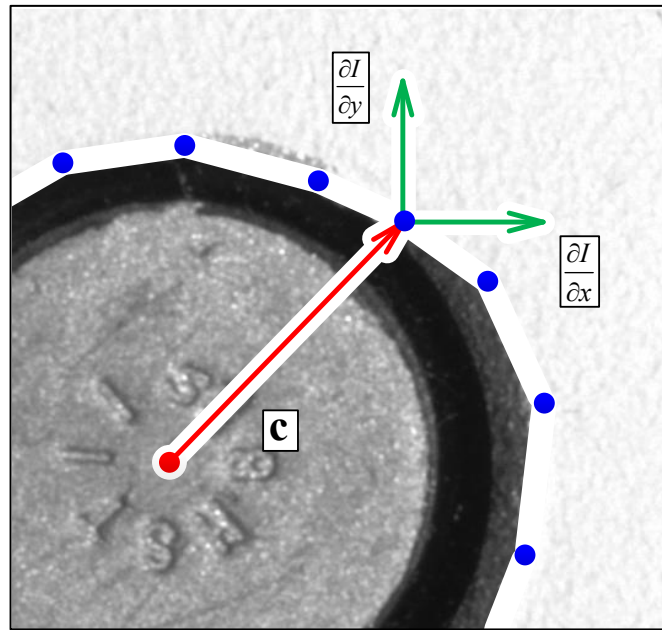


図3.9 エネルギー関数（式(3.5)）の模式図

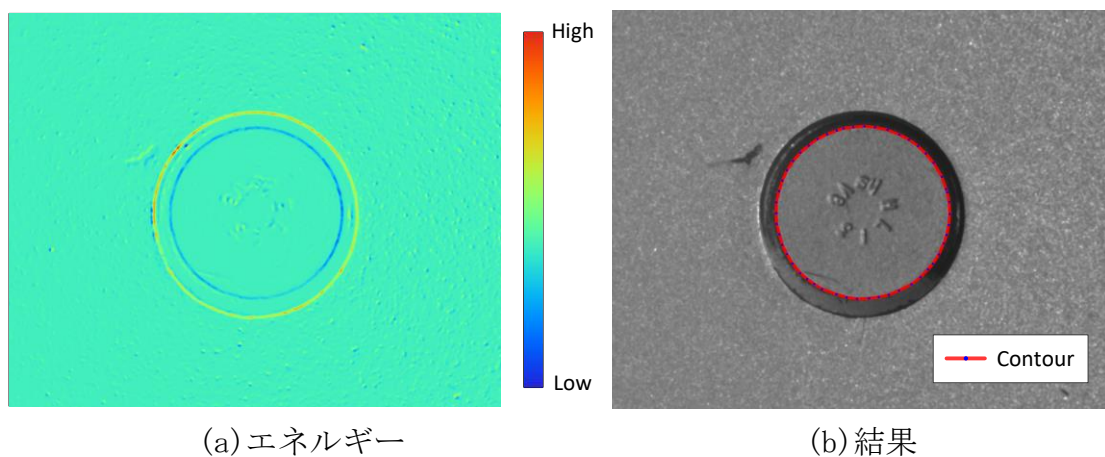


図3.10 輪郭検出結果

3.3.3 平面・円推定処理

ファスナ部には文字が打刻されており，文字領域はファスナ面より凹んでいる．打刻される文字の種類や打刻箇所はファスナごとに異なるため，文字領域を動的に除外してファスナの平面を推定する必要がある．これに対して，ファスナとパネルの各面に対する平面推定法にRANSACを用いたロバスト推定法を適用する．Snakesにより検出された輪郭内部をファスナ領域として，ファスナ領域全体の点群を使用してRANSACにより平面推定を行う．このとき，

RANSACで推定した最適な仮説平面のinlier点群のみを用いて、さらに最小二乗法で推定した平面を検査（深さ・傾き推定）に使用するファスナ面とする．ファスナ面には打刻された文字が含まれるため、主に文字領域がoutlierとして除外したい領域に当たる．さらに、ファスナ面・パネル面は金属物体でできているため、鏡面反射に起因するノイズも平面推定のoutlierとして取り扱う必要がある．12[mm], 10[mm]ファスナに対して推定平面からの許容誤差をそれぞれ ± 0.1 [mm], ± 0.05 [mm]としたときの処理結果を図3. 11, 図3. 12に示す．左が撮影画像, 中央が深度画像, 右がRANSACにより選択されたinlierピクセルを白・outlierピクセルを黒として表した画像である．処理結果からは、深度の安定したファスナ面をinlier, ファスナ上の計測ノイズと見られる点群と文字領域がoutlierとして判定されていることを確認できる．このことより、文字領域を除外したロバストな平面推定が行われていると言える．

続いて深さを算出するため、推定したファスナ面を基にファスナ部の三次元座標系における中心座標を算出する．ファスナ部が円形であることから、Snakesにより切り出したファスナ部の輪郭の点群を用いて、推定したファスナ平面上で円推定を行う．輪郭上の三次元点群を推定したファスナ平面に射影することで、平面上で最小二乗法にRANSACを組み合わせた円推定を行い、ファスナ部の三次元座標上の中心を求める．検査するファスナの直径は検査時には既知であるため、推定されたファスナ部の中心座標を用いてパネル面の推定を行う．具体的には、今回対象としている直径10もしくは12[mm]ファスナの場合、ファスナの中心座標より半径10[mm]から ± 0.2 [mm]の範囲にある点群をパネル領域として、ファスナ面と同様にRANSACにより平面推定を行う．この半径は、現在の検査装置がパネルに接触する半径と同じになるように定めている．

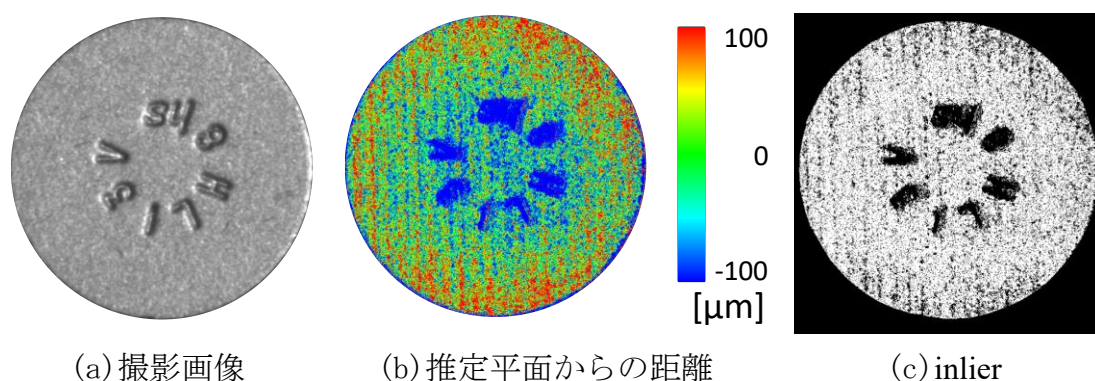


図3. 11 12[mm]ファスナにおける平面推定結果

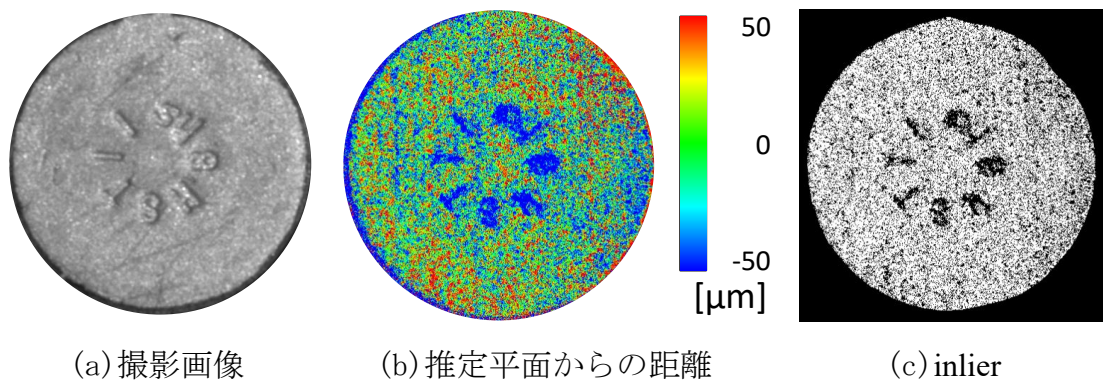


図3.12 10[mm]ファスナにおける平面推定結果

3.3.4 ファスナの傾き・深さ算出

前節で述べた処理により求められたファスナの中心座標から一定距離をパネル部, Snakesにより切り出された領域をファスナ部として計測した三次元点群を用いて, それぞれの近似平面を求めることで, 図3.13に示すように傾き θ ・深さ D を算出する. ファスナ部とパネル部から求められた近似平面における法線ベクトルをそれぞれ \mathbf{F} , \mathbf{P} とし, 式(3.6)により傾きを算出する. 三次元座標を XYZ 座標系とした場合, 推定したファスナ面から算出されるファスナ部の中心座標を (C_x, C_y, C_z) , 推定したパネル面の近似平面の方程式を $aX+bY+cZ+d=0$ とすると, パネル面からのファスナ中心の深さは式(3.7)に示すように求められる.

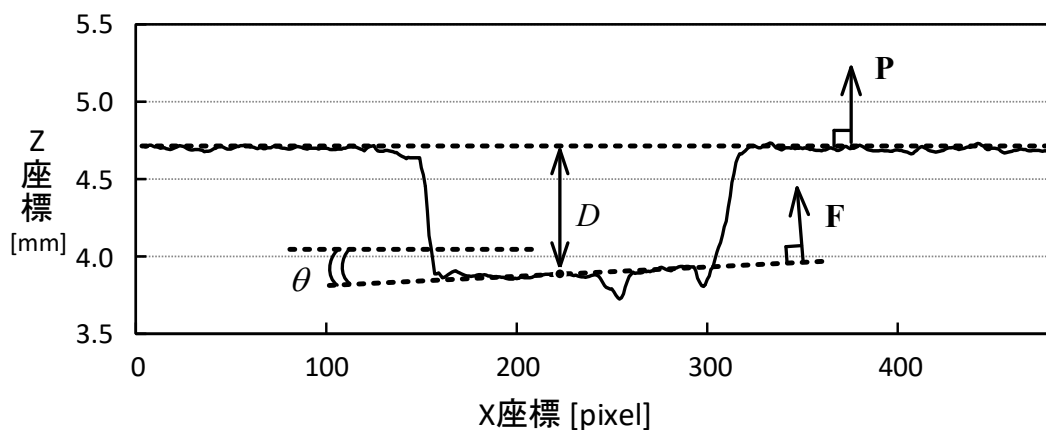


図3.13 傾き・深さ算出の模式図

$$\theta = \cos^{-1} \frac{\mathbf{F} \cdot \mathbf{P}}{\|\mathbf{F}\| \|\mathbf{P}\|} \quad (3.6)$$

$$D = \frac{|aC_x + bC_y + cC_z + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (3.7)$$

3.4 システムの評価

本節では、提案する検査システムの検査精度を評価するために、システム全体で得られる検査項目の精度評価だけでなく、前節の提案手法で述べたファスナの切り出し手法の有効性についても評価を行う。さらに、システムの検査時間についても評価を行い、従来の検査システムと比較して優位性を示す。

3.4.1 ファスナの検出精度

勾配に関するエネルギー関数 E_{image} に式(3.5)を用いる提案手法の有効性を示すため、 E_{image} に式(3.4)を用いる場合を従来手法として、検出精度で比較する。ファスナ領域を手動でマスクしたデータを正解データとして、それに対して誤検出した画素数を評価する。画像全体の画素の集合を P とすると、ファスナ領域の正解ラベルを $F = \{F_1, F_2, \dots, F_{|P|}\}$ 、得られた切り出し結果を $L = \{L_1, L_2, \dots, L_{|P|}\}$ とする。ある画素 p における判定結果が、ファスナ領域であるときに $L_p = 1$ 、ファスナ領域でないときに $L_p = 0$ となることを表す。正解ラベル F_p も同様にファスナ領域を1、それ以外を0で表す。このときファスナ領域を領域外と誤検出したもの（Under segmentation）と、領域外をファスナ領域と誤検出したもの（Over segmentation）の和をSegmentation errorとして式(3.8)により評価する^[58]。ここで、 $\overline{L_p}$ は0, 1の値が反転することを表す。また、 δ はディラックのデルタ関数を表し、 $x=0$ であるときに $\delta(x)=1$ 、それ以外の $x \neq 0$ では $\delta(x)=0$ となる。評価結果（図3.14）に示すように、提案手法によりファスナ部の誤検出した画素数が低下しており、切り出し精度の向上を確認した。

$$seg.err = \sum_{p \in P} \delta(\overline{L_p} - F_p) \quad (3.8)$$

Snakesに従来・提案手法を用いたときのファスナ検出結果の比較を図3. 15, 図3. 16に示す. 従来手法では単純な勾配強度を用いているため, 境界部においてファスナの輪郭, またはパネルの輪郭で強度の高い方に輪郭点が収束する. これに対して, 提案手法ではファスナ中心からの勾配方向も考慮するため, 輪郭点がファスナの輪郭に安定して収束することを確認した.

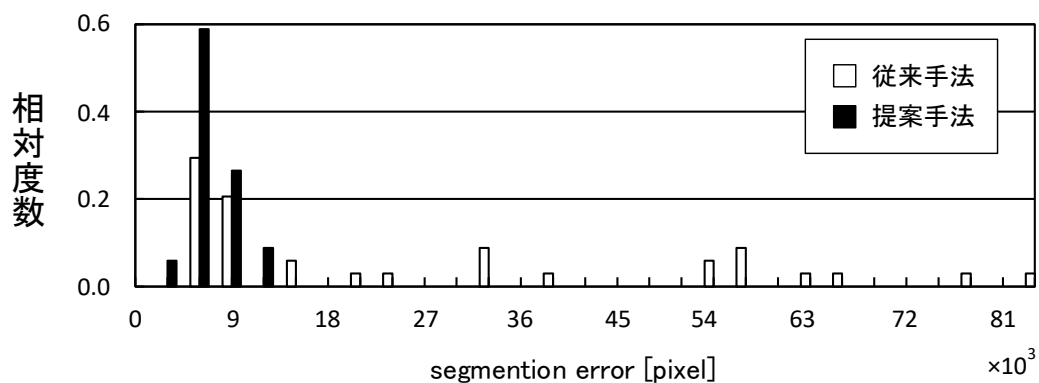


図3. 14 SnakesによるSegmentation errorの分布

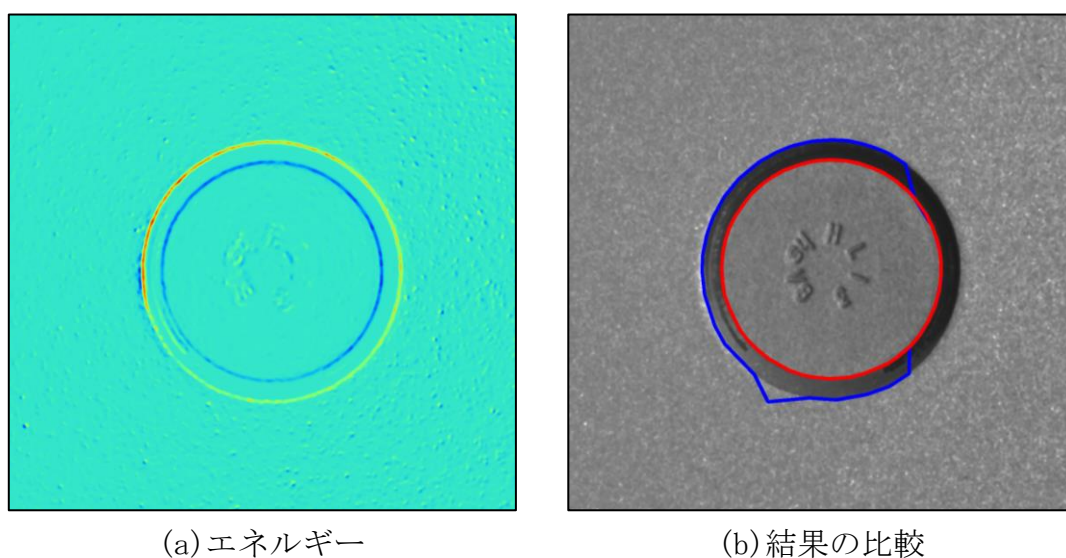
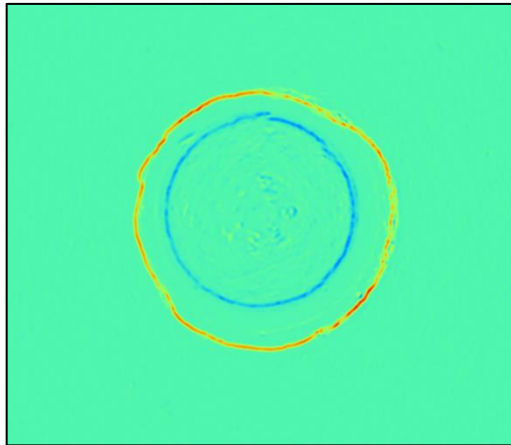
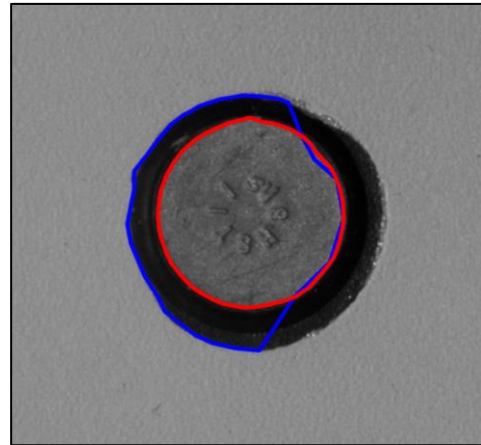


図3. 15 12[mm]ファスナの検出結果 (赤線: 提案手法, 青線: 従来手法)



(a) エネルギー

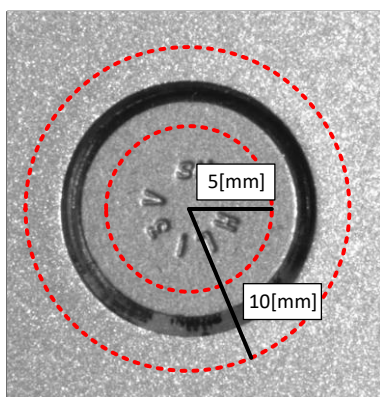


(b) 結果の比較

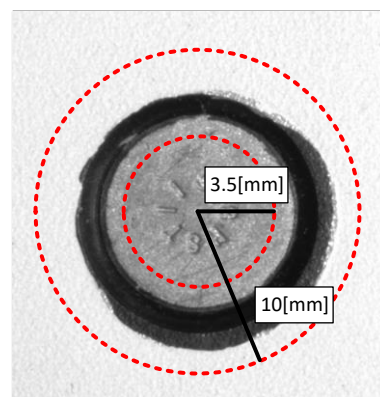
図3.16 10[mm]ファスナの検出結果（赤線：提案手法，青線：従来手法）

3.4.2 システムの検査精度

図3.2, 図3.3に示した2種類のファスナサンプルを用いて評価実験を行う．精度の比較対象として，カールツアイス社製の接触式測定器UPMC550CARATを用いて計測した結果を真値として扱う．真値の測定箇所として，パネル部はファスナ中心から半径10[mm]の位置，ファスナ部は12[mm]ファスナでは半径5[mm]，10[mm]ファスナでは半径3.5[mm]の位置を測定した．測定時はファスナ中心から円周状に測定子を走査して得られた測定結果からファスナの深さ・傾きを算出した．接触式測定器による測定箇所を図3.17に赤点線でそれぞれ示す．



(a) 12[mm]ファスナ



(b) 10[mm]ファスナ

図3.17 接触式測定による測定箇所

本研究が提案する検査アルゴリズムの精度を評価するため、三菱電機社製のロボットアームRV-4FLに三次元計測器を搭載した状態で計測したデータを用いる。またロボットアームで指定ファスナの位置へ計測器を移動させた後に、ロボット内のサーボモータを駆動させた状態で計測した。これによりモータによる振動を考慮した、実利用に近い環境での検査精度が検証可能となる。実験環境を図3.18に示す。サンプル数は、12[mm] ファスナ7個、10[mm]ファスナ10個であり、1個のファスナに対して6回繰り返し計測した。実際に検査を行う際と同様にロボットアームを各ファスナの正面へ自動で移動させて、カメラに対してパネル平面がほぼ正対するという条件のもとで撮影されるように制御した上で、実験用データを撮影した。

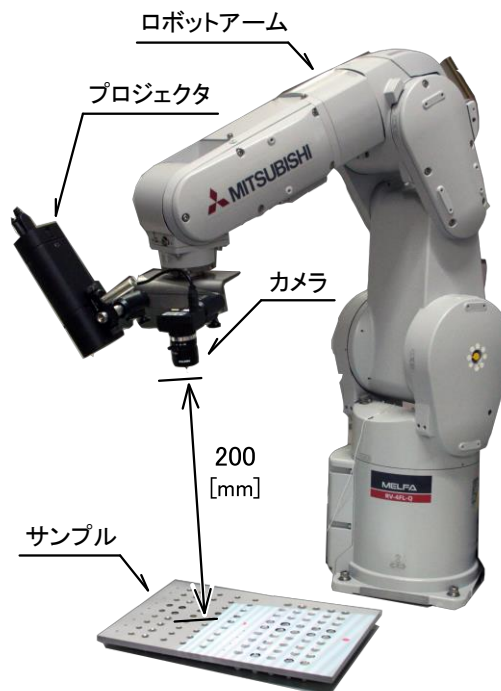


図3.18 検査システム外観

真値との誤差を基に母標準偏差を推定するため、カイ二乗分布を用いて上側検定（信頼区間95[%]）した結果を表3.5、表3.6に示す。RANSACを用いた平面推定法の有効性を確認するために、最小二乗法を用いた場合の実験結果を併記する。最小二乗法を用いた手法では、ファスナ・パネル上の三次元点群全てを用いた。RANSACを用いた結果では、打刻された文字やパネル表面のノイズに対してロバストな深さ・傾きの推定できるため、より高精度に算出可能である

ことを確認できる．提案システムの精度評価にあたり，航空機1機につきファスナは8万本であるため，8万本の中から信頼区間から外れるファスナが1本未満となるように，信頼区間を 5σ として評価する．母標準偏差から信頼区間 5σ でシステムの計測誤差を評価すると，12[mm]ファスナでは深さ42.8[μm]，傾き0.269[deg]，10[mm]ファスナでは深さ42.3[μm]，傾き0.185[deg]以内の計測誤差に収まる．これは，要求精度である深さ50[μm]，傾き0.28[deg]未満であるため，要求精度を達成することを確認した．

表3.5 深さの誤差に関する統計量

ファスナの直径[mm]	標準偏差[μm]	
	最小二乗法	提案手法
12	93.2	8.47
10	11.4	8.58

表3.6 傾きの誤差に関する統計量

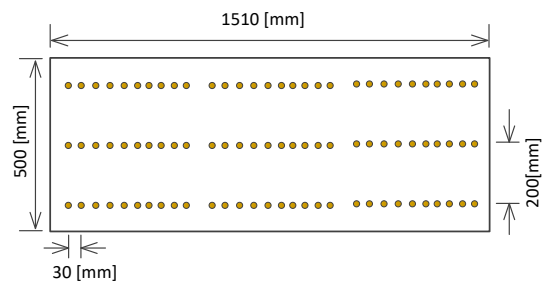
ファスナの直径[mm]	標準偏差[deg]	
	最小二乗法	提案手法
12	0.725	0.054
10	0.136	0.037

3.4.3 システムの検査時間

続いてシステムが検査に要する時間を評価するため，図 3.19 に示す翼面パネルと，図 3.20 に示す実験環境を用いた．翼面パネル全体に対して検査を行うには，ロボットアームを水平方向に移動させる必要がある．そのため，長さ 1000[mm]のスライドレールに乗せた状態で，翼面パネルに装着された 90 個のファスナすべてを検査し終わるまでの時間を測定した．実験の測定結果として得られた，ファスナ 1 つあたりに要した各工程の平均所要時間と合計タクトタイムを表 3.7，計算処理に使用した計算機の仕様を表 3.8 に示す．三次元計測後に行うファスナの傾き・深さ算出の計算時間に関しては，ロボットアームの移動中・三次元計測中にも並列して実行可能であるため，本システムによるタクトタイムは 5.6[sec/個]となる．



(a) 外観



(b) ファスナの配置

図3.19 主翼の一部

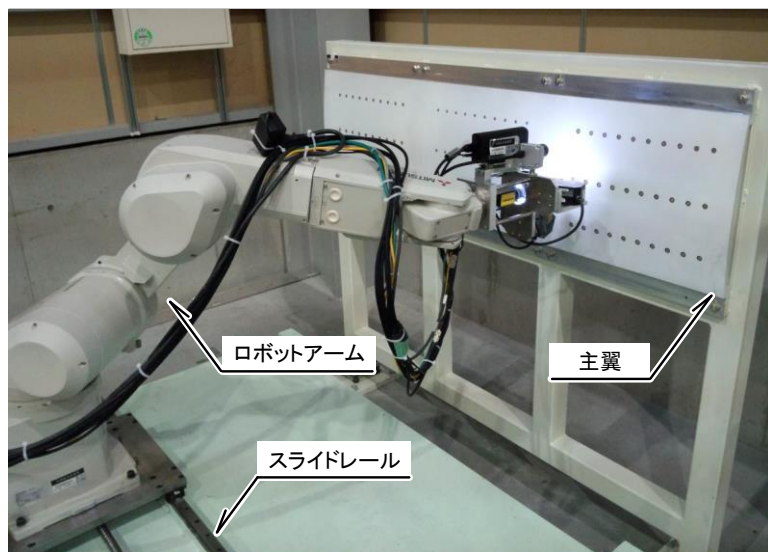


図3.20 システムの実験環境

表3.7 ファスナ1つあたりの平均タクトタイム

項目	時間[sec]
ロボットアームの移動時間	1.9
撮影時間	3.7
計算時間（並列に行うため合計から除く）	4.8
合計	5.6

表3.8 計算機の仕様

項目	詳細
CPU	Intel Core i7 2.3[GHz]
RAM	8[GB]

3.4.4 考察

提案手法では平面推定にRANSACを用いて、outlierと判定された画素を文字領域またはノイズとして判定する。このとき、RANSACの許容誤差は、最も深さ・傾き検査の誤差が小さくなる結果を採用しており、文字領域の判定精度については考慮していない。そこで、この最適な許容誤差に対応する文字領域の判定精度について評価・考察を行う。12[mm]、10[mm]ファスナの各3サンプルについて、文字領域をoutlierとした正解マスクデータを作成した上で、判定精度を確認した。その結果、12[mm]ファスナではoutlierに対して49.0[%]、inlierに対して88.3[%]が正しく判定された。最終的に平面推定に使用される点群中の文字領域の平均点数は80,147点中5,951点から68,555点中3,046点（7.4 → 4.4[%]）に減少した。同様に10[mm]ファスナではoutlierに対しては49.0[%]、inlierに対しては88.3[%]が正しく判定されており、平面推定に使用される点群中の文字領域の平均点数は43,294点中3,130点から38,718点中1,745点（7.2 → 4.5[%]）に削減された。文字領域中の点数が顕著に削減されていることから、文字領域に多く含まれるノイズ成分を効果的に削減できていると推測できる。また、文字領域の判定精度がそれほど高くない理由として、計測データに含まれるノイズが多いことが挙げられる。ノイズもoutlierとして判定するため、結果的に文字とは関係ない部分も除外しており、文字領域かファスナ面だけの判定精度では正しく測れないと考えられる。図3.21に、RANSACによるinlier, outlierの判定結果を示す。図3.21(b)(c)では、赤をファスナ面、青を文字と判定することを表す。

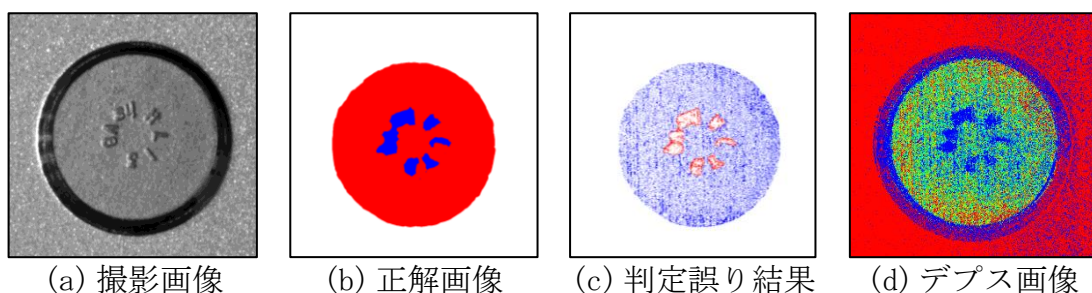


図3.21 12[mm]ファスナにおける文字領域のinlier, outlier

次に、提案システムで得られた計測精度について実運用性の観点から考察する。航空機の検査基準では、ファスナは設計値から $\pm 200[\mu\text{m}]$ 以内で検査される必要があると定められている。そのためシステムの計測誤差を考慮すると、シ

システムが設計値から $\pm 150[\mu\text{m}]$ 以内の測定値を示したファスナには異常がなく、 $\pm 250[\mu\text{m}]$ 以上を示すファスナには異常があると判定できる。しかし、設計値から $\pm 150 \sim 250[\mu\text{m}]$ の測定値を示したファスナは、システムの判定が保証されない。そのため、システムの判定が保証できないファスナに対しては、人が手動で再検査を行うことで本検査システムを利用した半自動的な検査が運用可能である。

続いて、提案システムで得られる検査時間の効果についても考察する。デブスゲージを用いた人手の検査において、移動や記録時間などを含めたファスナ1個に要するタクトタイムは、約 $30[\text{sec}]$ 程度である。提案システムはタクトタイムを約 $20[\%]$ に短縮しているため、手動検査の発生頻度が $20[\%]$ 未満であれば全体の検査時間は短くなると考えられる。厳密な検査時間については、ファスナの設置精度に依存するため、今後これらを踏まえた検証を行い、実利用性を検証していく必要がある。

3.5 むすび

本章では、FA化があまり進んでいない航空機の分野に対する自動検査システムとして、小型三次元計測器とロボットアームを組み合わせた航空機用ファスナの自動検査システムを提案し、その実利用性を示した。提案した検査の手法としては、はじめに8枚の格子パターンを投影して三次元計測を行い、得られた画像をファスナの検出、三次元形状をファスナの装着状態の算出に用いる。ファスナの検出では、Snakesを用いたファスナの輪郭特徴に基づいたエネルギー関数を定義し、ファスナ部を高精度に切り出す。ファスナ装着状態の算出では、RANSACを用いてロバストに平面・円を推定することで、打刻文字の影響を緩和して深さ・傾きを求め、検査を行う。

実利用を想定してロボットアームの移動を含めた計測実験を行い、ファスナの装着状態として翼面パネルに対するファスナの傾き、中心の深さをロバストに算出できることを確認した。接触式測定器の測定結果を真値として求めた誤差を評価する際には、システムの誤差の標準偏差(σ)について、信頼区間 $95[\%]$ で母標準偏差の区間推定により求めた。さらに実利用する際の統計的な観点より、航空機1機につきファスナが8万本であるため、8万本の中から信頼区間から

外れるファスナが1本未満となるように、信頼区間を 5σ として評価した。 5σ の余裕を考慮した場合においても12[mm]ファスナでは深さ42.8[μm]・傾き0.269[deg], 10[mm]ファスナでは深さ42.3[μm]・傾き0.185[deg]以内の誤差で検査可能であることを示した。この誤差について提案システムを用いた実運用の体制を考えるため、ファスナが $\pm 200[\mu\text{m}]$ 以内か否かという良品・不良品の判定基準に当てはめる。その場合には、 $\pm 150 \sim 250[\mu\text{m}]$ の測定値を示したファスナは、システムの判定を保証できない。それらについては、人が手動で再検査を行うことで、半自動検査の体制が実現可能であるといえる。

さらに検査時間についても、従来の検査ではファスナ1個あたりタクトタイム30[sec]であるところ、提案システムでは5.6[sec]を達成することを示した。厳密な全数検査に必要な時間は、ファスナの装着精度について統計的な分布を考慮する必要があるが、従来の人手による検査よりも検査時間の短縮が見込める。

以上の結果より、従来の人手による検査と比較して、検査品質の安定化、作業員の安全性の向上、検査時間の短縮という観点から、提案システムは有用であることを示した。さらに、検査データを保存することで、トレーサビリティが保証される。

今後、実際に検査システムへの導入を想定した実地運用試験を通して、要求される三次元計測の安定性・計測環境の構築を明らかにし、実用化へとつなげていきたい。また、航空機には実験で使用したファスナとは異なり、小さいファスナが使用される場合もあるため、多様なファスナへの対応にも今後取り組む必要があると考える。

第4章 位相シフト法における 信頼性評価

本章では、位相シフト法を用いた計測において、静止物体を前提とすること
に起因する計測精度の低下に関する問題について述べる。特に、ナノオーダーの
静止状態の実現が難しい光干渉に注目した。この問題について、光干渉法では
振動が支配的な誤差の要因であるため、振動による誤差と相関関係のある評価
手法を提案し、その有効性を示す。

4.1 まえがき

近年、工業製品の精密不良検査および医療用精密検査などを目的とした精密
三次元形状計測技術の需要が増えている^{[28][59][60]}。非接触にこれらの物体を計測
可能な手法として、光干渉を用いた位相シフト干渉計^{[61][62]}やデジタルホログラ
フィ^{[63][64]}、白色干渉計^{[65][67]}などの計測法が存在する。上記の光干渉を用いた
計測法は、光の波長がきわめて短く、光路差の変化に応じて光強度が大きく変
化するため、光の波長のオーダーで計測可能であり数nmの凹凸も計測できる。

光干渉を用いた計測法は、光の干渉により生じる干渉縞の明暗変化から縞と
縞の間の情報（サブフリンジ情報）を読み取ることで高精度な形状計測が可能
となる^[68]。サブフリンジ情報には、光路に対して線形な情報である光の位相が
用いられる。干渉縞の明暗変化は周期関数であるため、その周期性を用いて干
渉縞の位相を求められる。それらはサブフリンジ解析法と呼ばれ、時間的位相
検出法と空間的位相検出法の2つに大別できる。

空間的位相検出手法としては、一般的にフーリエ変換法^{[38][69]}が用いられる。
これは、空間的に既知のキャリア周波数を加えることで、1枚の干渉縞の画像の
みから位相を解析する手法である。具体的には、既知の周波数付近の位相のみ
をバンドパスフィルタで抽出することにより計測でき、ダイナミックな計測を
実現できるという大きな利点を持つ。一方で、形状が大きく変化するような物
体は計測できないことや、細かい形状変化は除去されるという欠点も存在する。
そのため、赤血球や微生物の細胞などを対象とした3Dライブイメージングに用
いられることが多い^{[70][71]}。

これに対して時間的位相検出法では、位相シフト法が最も用いられる^{[72]-[74]}。これは、時間的に既知の位相変調を与えて、光強度が変化した干渉縞の画像を複数枚取得することで、画素毎に干渉縞の位相を計算する手法である。これは空間的位相検出法とは異なり、画像解像度と等価な分解能を持つため、微小な形状変化も計測でき、精密部品の計測などに適している。しかし、光干渉を用いた計測装置は光路差に対する敏感性により、周辺環境の振動や空気揺らぎがある場合、意図しない位相変調が加わる^[75]。この問題により、これらの解析法を用いて得られる計測結果は非常に不安定となり、計測結果にはリップルと呼ばれる周期的なノイズが発生することが知られている^[76]。振動で発生する誤差のモデルとしては、参照位相に誤差を加えるものであり、高調波を発生させる。この高調波により、一般的にリップル誤差は空間周波数の2倍で発生する。そのため安定した計測結果を得るには、防振台などを用いてナノオーダの振動や空気揺らぎのない特別な環境下に装置を設置して計測する必要がある。これは現在実用化されている光干渉を用いた計測器にも同様である^{[77]-[79]}。しかし防振台などを用いた場合も、除去しきれない微弱な振動や防振台固有の周波数での振動が発生している。

この問題に対して、本研究では精度の良い計測結果を得られるまで計測を繰り返すことにより、安定して精度の保証された計測の実現を目指す。この解決法の実現には、計測結果の良し悪しとなる信頼性を評価する必要がある。そこで本研究では、振動により生じる位相の誤差に対して相関の高い信頼性評価手法の開発を目指す。従来研究として、Riらによりフーリエ変換位相シフト法で算出される位相の信頼性評価値が提案されている^[80]。フーリエ変換位相シフト法により算出される初期位相はフーリエスペクトルの1次周波数にのみ依存しており、1次周波数よりも高次の周波数には、ノイズが含まれている場合が多いという特性を用いている。この特性より、1次周波数と高次の周波数とのS/N比を位相の信頼性を評価する値として用いることで画素毎に、ノイズの少ない（信頼性の高い）データを取得できる。しかし、この従来研究では、複数の周波数帯のスペクトルを得る必要があるため、画素毎に輝度値をフーリエ変換する必要があり、計算負荷が高いというデメリットが存在する。また、2014年にZygo社がVerifire QPZという振動に強い位相シフト干渉計を実用化している。これはDeckらが提案したQPSIアルゴリズムと呼ばれる手法を用いており、振動の影響をソフトウェア上で補正して位相の計測誤差を最小化する手法である^[22]。このアルゴリズムの中でも画素毎に位相信頼性を評価する手法を用いており、

その信頼性評価値から得られた誤差の最小化問題を解いている．しかしこの計測器においても，メーカースペックに記載されているように150[nm]程度の振動までしか許容していない．これは，光源波長633[nm]の約1/4に相当する値，つまり位相シフト誤差が $\pi/2$ 未満であることを前提としており，依然としてナノオーダより大きな振動環境下では安定した計測は困難である．

これらの位相信頼性評価手法に対して本研究では，画素単位ではなく，画像単位で位相の信頼性を評価することで従来手法よりも位相の誤差に対して相関の高い評価手法を提案する．具体的には，位相シフト法により算出される振幅画像と物体光の撮影画像との相関値を位相の信頼性を評価する尺度として用いる．そのため，フーリエ変換位相シフト法だけでなく，位相と同時に振幅を解析できる位相シフト法では適用可能な手法である．提案手法のメリットとして，画像間の相関を求めるだけで信頼性を評価できることから高速に信頼値を得られることが挙げられる．本稿では，ナノオーダの基準器を用いた実験を通して，従来・提案手法により得られる評価値と位相の計測誤差（粗さ）との相関関係を明らかにし，有効性を示す．

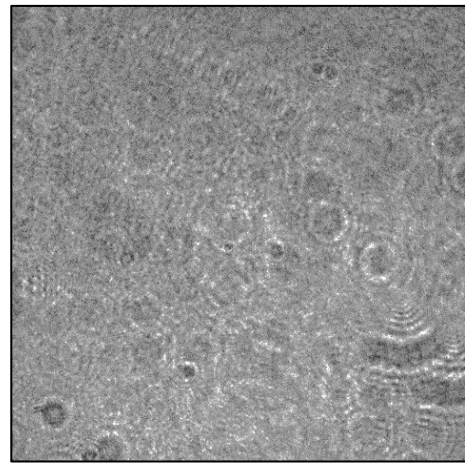
4.2 位相シフト法における計測誤差

位相シフト法を用いた計測には、計測精度に影響する多くの誤差要因が存在する。位相シフト法における誤差要因については、Creathらにより検出器の非線形性や光源の安定性、量子化誤差など様々な種類のシミュレーションが行われている^{[19][81]}。本研究では、様々なノイズ要因の中でも振動や空気揺らぎによる環境ノイズが位相シフト法へ与える影響について評価を行う。そのため、本節では計測誤差が起きる場合にどのような計測データ・結果が得られるかについて、平面ミラーを例に用いて説明する。平面ミラーの干渉縞画像と物体光画像を図4.1に示す。参照ミラーが計測物体に対して傾いている場合、その傾き方向に応じて縞の方向が決まり、傾斜が大きくなるほど縞のピッチが細くなる。この干渉縞画像より、参照ミラーが物体に対して右斜め方向に傾いており、計測物体が平面であるため、空間的に縞の明暗が一方向でありズレていないことがわかる。このような場合、理想的な計測結果は図4.2(a)(b)に示すように位相が空間的に線形な変化を持つ分布であり、物体光画像に類似した一様な振幅（強度）の分布が得られる。しかし、位相シフト法において計測誤差が発生した場合には、図4.3(a)(b)のように歪みが含まれた位相となり、振幅も周期的にバラついていることがわかる。これら2つの例は計測環境における防振台の有無により得られた結果であり、図4.2(c)、図4.3(c)に中心座標における輝度変化と位相シフト法により推定した波形を合わせて示す。防振環境下では、常におおよそ一定の周波数で輝度が変化しており、推定した波形は観測した波形の細かなノイズ成分を除去したような変化をしていることがわかる。これに対して防振していない環境下では、一定の周波数が全く見て取れず観測した波形に一致しないため、推定した波形の振幅も小さいことがわかる。

位相シフト法は既知の位相変調量を基に、物体の位相を求める手法である。振動環境下では、既知の位相変調量に環境の振動変位量が重ね合わされた位相変調がされる。振動による位相変調量はランダムに変化するため、変位量が未知であるとともに、その周期を知ることも困難である。さらに、図4.2(c)に示したように防振台を用いた環境下においても、常に一定の周波数で観測されるようにはできていないことを見て取れる。位相シフト法では、このように計測環境に大きく依存しているため、位相シフト法により得られる結果の確からしさを得る手法が必要であり、位相の信頼性を評価する手法がいくつか提案されている。次節では、これらの手法について述べる。

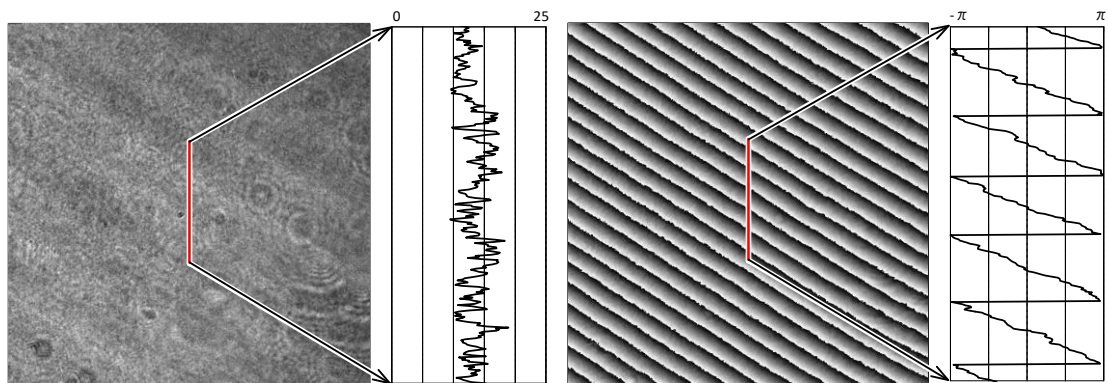


(a) 干渉縞



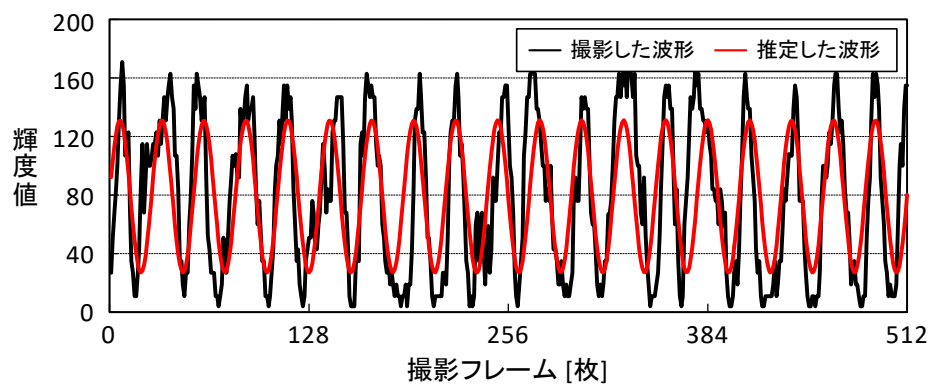
(b) 物体光

図4.1 平面ミラーの撮影画像



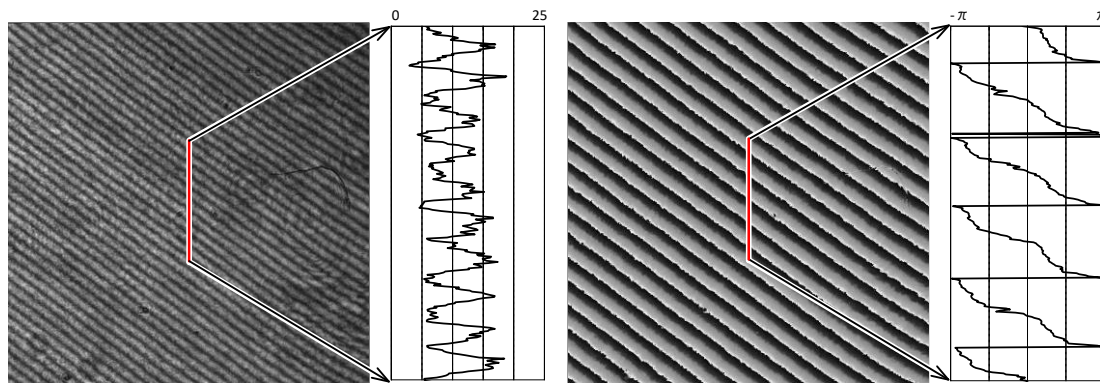
(a) 振幅

(b) 位相



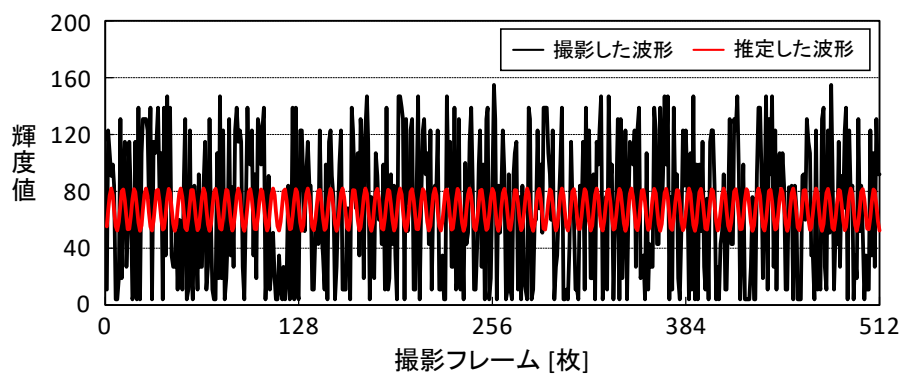
(c) 画像中心座標における輝度変化

図4.2 防振環境下において計測した平面ミラー



(a) 振幅

(b) 位相



(c) 画像中心座標における輝度変化

図4.3 非防振環境下において計測した平面ミラー

4.3 従来研究

本節では、位相信頼性評価に関する従来研究について述べる。また、これらの従来手法を提案手法との比較対象として用いる。

4.3.1 位相信頼性評価の従来手法 1

最小二乗アルゴリズムを用いた位相シフト法では、式(2.13)に示したように既知の位相変調量により推定した波形と観測した波形の平方二乗誤差を最小化して位相を推定する。この誤差関数は推定した波形の誤差量を表すため、そのまま信頼性評価関数 S （式(4.1)）として用いられている^{[22][82]–[84]}。信頼性評価関数の模式図を図4.4に示す。この評価関数を用いて画素毎に信頼性を評価する。

S の値が大きいほど推定した正弦波の誤差が大きいことを表しており、信頼性の低い計測点であることを意味する．従来研究では、この評価関数の値に閾値を設けて異常な計測点を除去することで、確度の高い計測結果を取得している．

$$S(x) = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left[I_k(x) - \{b(x) + a(x) \cos(\phi(x) + \delta_k)\} \right]^2} \quad (4.1)$$

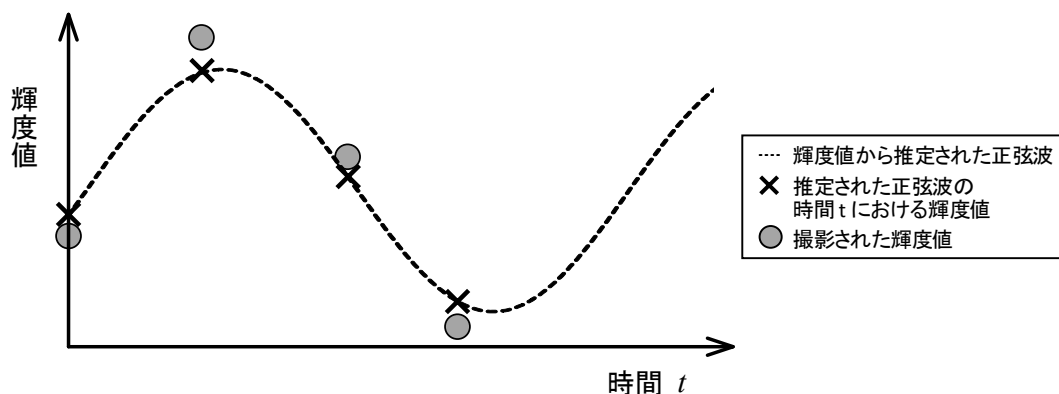


図4.4 従来手法1における信頼性評価関数の模式図

4.3.2 位相信頼性評価の従来手法 2

位相シフト法では画素毎に変調（鮮明度）を求めて、データの品質（クオリティ）の指示量として用いる手法が存在する．変調 γ は、振幅 a 、平均光強度 b を用いて式(4.2)により得られる．Schwiderらは、変調が位相変調器の較正誤りや光強度の線形性などの誤差原因に敏感であることを示した^{[85][86]}．さらにKinnstatterらは、位相と振幅を極座標上に二次元プロットした図4.5に示すリサージュ図形を用いることで、位相誤差の要因と測定のクオリティをわかりやすく表現できることを示した^[20]．変調は1に近いほど良いデータであり、小さいほど悪いデータであることを表す．変調の小さなデータ点は、計測環境などによるノイズに対してS/N比が十分ではなく、その点では信頼できる位相を計算出来ない．そのため、これらの計測点を解析から除外することが行われる．一般的な変調の閾値は5～10[%]である．

$$\gamma(x) = \frac{a}{b} = \frac{2\sqrt{\left\{\sum_{k=1}^N I_k(x) \cos(\delta_k)\right\}^2 + \left\{\sum_{k=1}^N I_k(x) \sin(\delta_k)\right\}^2}}{\sum_{k=1}^N I_k(x)} \quad (4.2)$$

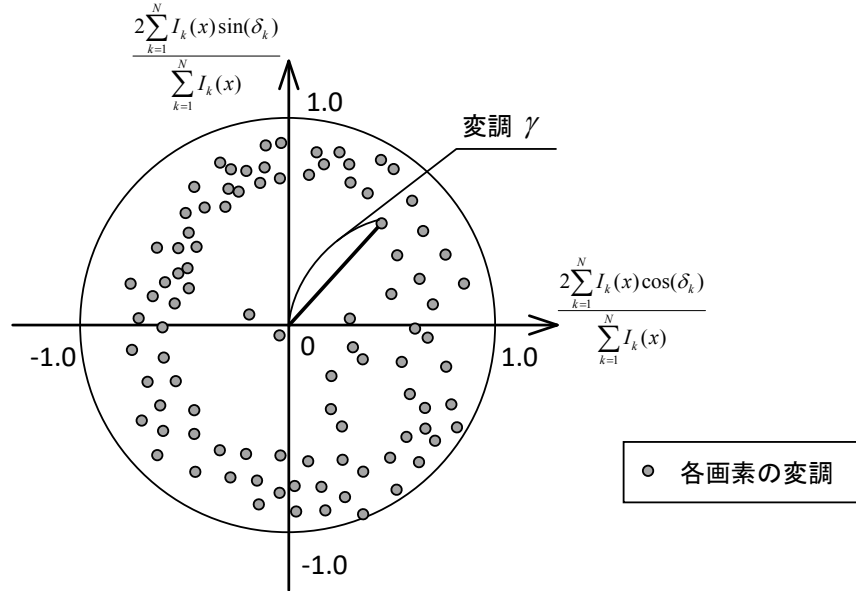


図4.5 変調を極座標プロットした図

4.3.3 位相信頼性評価の従来手法 3

位相シフト法の中でも、位相変調量が線形に変化して、かつ一定時間毎に光強度をサンプリングする際には、フーリエ変換位相シフト法が最も位相抽出精度の高い手法として用いられる。フーリエ変換位相シフト法により算出される初期位相はフーリエスペクトルの1次周波数にのみ依存している。さらに、受光センサノイズのような雑音成分は、大部分が1次周波数以外の高次な周波数に含まれている。そこで、1次周波数とその他の周波数とのS/N比を位相の信頼性を評価する値として用いる。具体的には、1次周波数のパワースペクトルとその他の周波数のパワースペクトルの平均値との比を評価値とする^[80]。位相信頼性評価関数 SNR を式(4.3)に、その模式図を図4.6に示す。ここで、画素 x における周波数 ω の振幅スペクトルを $|F|$ 、1次周波数を ω_o とする。

$$SNR(x) = \frac{|F(x, \omega_0)|}{\sum_{\omega=\omega_0+1}^N |F(x, \omega)|} \quad (4.3)$$

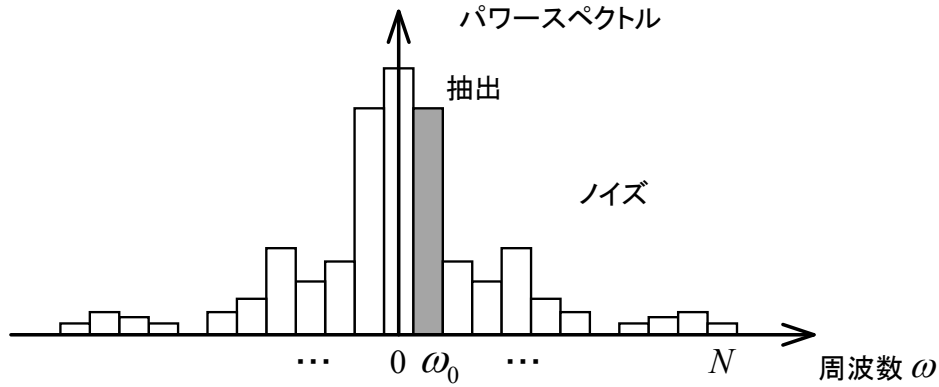


図4.6 従来手法3における信頼性評価関数の模式図

4.4 提案手法

前節で述べたように、従来研究において画素毎に信頼性を評価する手法がいくつか提案されている。これらの手法は、プロジェクタ投影などによる不安定な光源を用いて位相シフト法による計測を行う場合には、画素毎の計測信頼性が重要な指標となる^[84]。しかし、位相シフト干渉計などのレーザ光の波面を用いた計測器では、ナノオーダーの分解能を持つため、出力の安定した時間的・空間的にコヒーレンスな光源を用いることが前提である。そのため、位相シフト計測を行う場合は、カメラゲインによるセンサノイズや計測対象からのスペクトルノイズを除いて、画素毎の計測精度のバラツキは小さい。

一般的に光学顕微鏡では、XY軸方向の分解能は高々200[nm]程度が限界であることが知られており、この分解能を理論的にさらに向上させる手法も数多く研究・提案されている^[87]。しかしこれらの研究成果を踏まえても、Z軸方向の分解能は光源波長の分解能と等価であるため、XY軸方向に対してZ軸方向の分解能のオーダーは2,3桁ほど小さい。そのため、計測環境の振動や空気揺らぎにより生じる環境ノイズは、XY軸方向よりもZ軸方向の方が大きく影響する。また、ナノオーダーの精度で物体を計測する場面において、防振台を用いている現状を

踏まえると、外部から振動を加える装置などが無い限り、XY方向に振動するような環境で計測するケースはあまり無いと考えられる。

以上の前提に基づいて、本研究では計測装置が静止した環境下にあることを条件として、XY方向に大きな振動がない環境を想定する。その計測環境の振動や空気揺らぎにより生じる環境ノイズが、Z方向に対して一様な位相シフト誤差を発生させる。そのため本研究では、画素ごとの計測精度のバラツキではなく、計測エリア全体での計測精度に対して敏感な指標が重要であると考え。

一般的にデジタルホログラフィの分野では、再生像は焦点面の振幅分布を表すことが知られている^{[64][88]}。本研究では、振幅（再生像） \mathbf{a} が干渉していないとき（以降、非干渉状態）の撮影画像 \mathbf{b} と類似した強度分布であると考え、再生像と撮影画像の類似度を位相の信頼値として用いる手法を提案する。本研究では、2枚の画像から類似度を求める手法として、正規化相互相関（NCC）とゼロ正規化相互相関（ZNCC）を用いる。本研究では、非干渉状態の撮影画像を得るために、ビームシャッタを用いて物体光と参照光を別々に撮影して加算した画像を用いた。

$$R_{NCC} = \frac{\mathbf{b} \cdot \mathbf{a}}{\|\mathbf{b}\| \|\mathbf{a}\|} = \frac{\sum_{x=0}^{X-1} b(x)a(x)}{\sqrt{\left[\sum_{x=0}^{X-1} b(x)^2 \right] \left[\sum_{x=0}^{X-1} a(x)^2 \right]}} \quad (4.4)$$

$$R_{ZNCC} = \frac{\sum_{x=0}^{X-1} (b(x) - \bar{b})(a(x) - \bar{a})}{\sqrt{\left[\sum_{x=0}^{X-1} (b(x) - \bar{b})^2 \right] \left[\sum_{x=0}^{X-1} (a(x) - \bar{a})^2 \right]}} \quad (4.5)$$

ただし、 x は画像座標、 X は画像の画素数、 \mathbf{b} は非干渉状態の撮影画像（平均光強度）、 \mathbf{a} は振幅画像、 \bar{b} 、 \bar{a} は \mathbf{b} と \mathbf{a} 画像全体の平均値を表す。本手法により算出される信頼値 R_{NCC} 、 R_{ZNCC} は類似度であるため、値域は $[-1, 1]$ である。本手法では、理想的な振幅画像が得られた場合に類似度が1に近くなるため、信頼値が高いほど良い計測結果であるということを表す。

本手法では、干渉縞とともに物体光と参照光のみの画像を別々に撮影する必要がある。ピエゾステージを用いて位相変調する光学系では、参照ミラーを物理的に移動させながら干渉縞を撮影する。そのため、ステージの移動量に応じて参照光のテクスチャは変化するため、物体光と参照光の画像を交互に撮影す

る必要がある．しかし，ピエゾステージではなく回転ステージを用いた光学系では参照ミラーを移動させる必要が無く，計測時に撮影画像のテクスチャは変化しないため，あらかじめ撮影しておくことが可能である．したがって，実用上，物体光を撮影する最も単純な機構としては，参照ミラーの前に参照光を遮るビームシャッターを取り付け，干渉縞を撮影する際に，シャッターを切り替えることで物体光のみを撮影する光学系が考えられる．

4.5 評価実験

本節では，4.3節において述べた従来・提案手法の有効性についての検証，および本計測システムの評価を行う．まず，提案手法を適用可能な装置の構成と，計測手法について述べる．実験では，はじめに位相シフト法を用いた通常の計測を行い，本計測システムの計測精度と安定性について評価する．そして，従来・提案手法の有効性について計測環境における振動の有無を比較した検証を行い，最後に各手法の処理時間を評価する．

4.5.1 計測装置の構成

本実験で用いる計測装置について述べる．本研究で構築した計測装置と光学模式図を図4.7，計測装置に用いたカメラ，光源，光学素子，自動ステージの仕様を表4.1～表4.13に示す．本研究ではYuらの提案した回転ステージを用いた位相シフト干渉計を基に構築した^{[89][90]}．この光学系では回転ステージを用いるため，従来のピエゾステージを用いた光学系と比較して安価に装置を構築できる．また，回転ステージを用いて偏光板を回転させることで，干渉縞の位相がシフトする．そのため，参照ミラーを物理的に平行移動させる必要がなく，安定した計測器を構築可能であるという特徴がある．

本研究では，提案手法において非干渉状態の撮影画像が必要である．そのため，物体光・参照光を別々に撮影する必要がある．Yuらの光学系にビームシャッターを取り入れている．これにより参照光を遮断して，物体光のみを撮影できる．参照光のみの撮影については，この光学系では参照ミラーを移動させない

ため、あらかじめ撮影しておくことが可能であり、ビームシャッタを物体光側に取り付ける必要がないという利点もある。

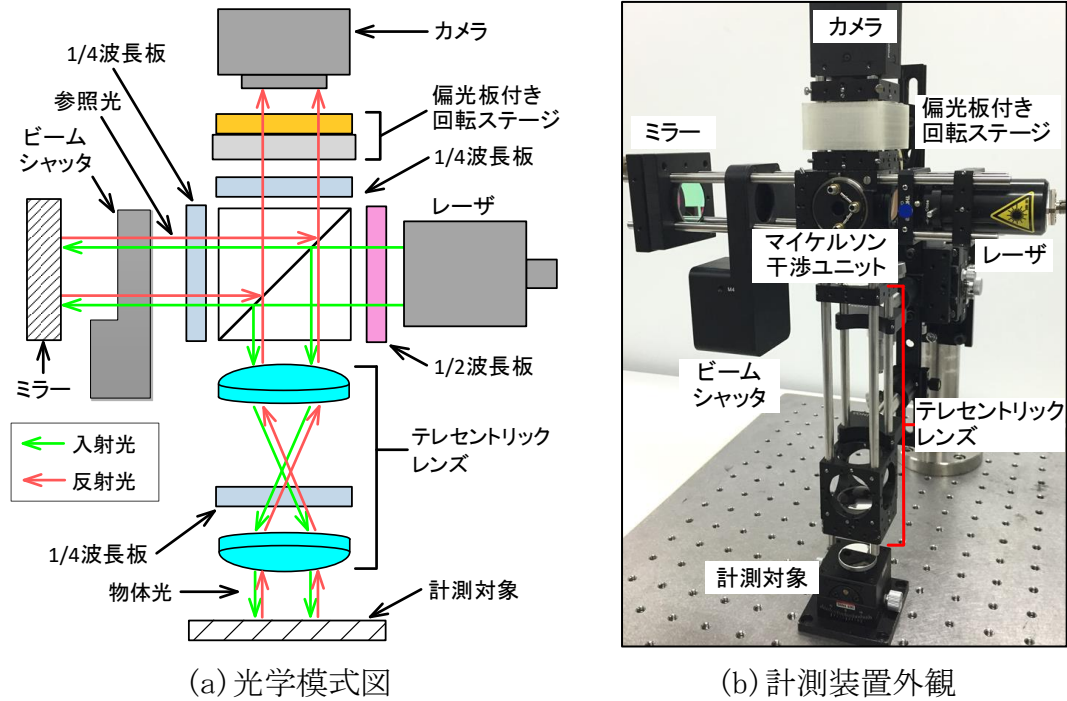


図4.7 計測装置

表4.1 カメラ仕様


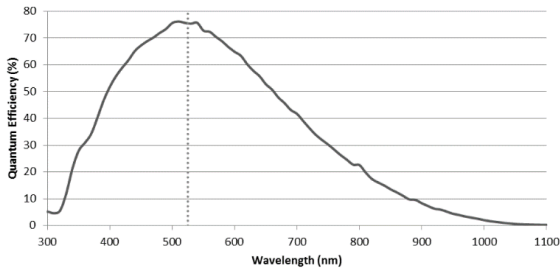
メーカー	PointGrey
型番	GS3-U3-41S4M-C
撮像素子	Sony ICX808
解像度[pixel]	2016×2016
素子サイズ[μm]	3.1
外観	
分光特性	

表4.2 外部トリガ制御装置仕様

項目	詳細
メーカー	Arduino UNO
マイコン	ATmega328
Digital I/O ピン	14
Analog 入力ピン	6
外観	

表4.3 アクロマティックレンズ仕様

項目	詳細
メーカー	シグマ光機
型番	DLB-30-100PM
焦点距離[mm]	100.7
偏心[']	<1
外観	

表4.4 回転ステージ仕様

項目	詳細
メーカー	Technohands
型番	DT70-3602型
分解能[deg/p]	0.005
トルク[g・cm]	50
保持トルク[g・cm]	150
中空 (貫通) 穴径	φ10.5
外観	

表4.5 レーザ仕様

項目	詳細
メーカー	Coherent
型番	Sapphire 532 SF
ビーム径[mm]	0.70±0.05
発振波長[nm]	532±0.1
出力[mW]	50
干渉距離[m]	200
外観	

表4.6 ビームシャッタ仕様

項目	詳細
メーカー	Thorlabs
型番	SH1/M
オープン時間[ms]	10
クローズ時間[ms]	10
外観	

表4.7 偏光板仕様

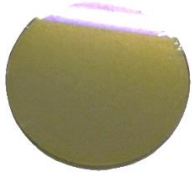
項目	詳細
メーカー	岡本硝子
型番	Glapola
材質	ガラス
適応波長[nm]	532
外観	

表4.8 1/2波長板仕様

項目	詳細
メーカー	シグマ光機
型番	WPQ-5320-2M
材質	水晶
適応波長[nm]	532
外観	

表4.9 1/4波長板仕様

項目	詳細
メーカー	シグマ光機
型番	WPQ-5320-4M
材質	水晶
適応波長[nm]	532
外観	

表4.10 干渉ユニットキューブ仕様


項目	詳細
メーカー	LINOS
型番	Cube 30 G06 1081 000
寸法[mm]	40×40×40
外観	

表4.11 偏光ビームスプリッタ仕様


項目	詳細
メーカー	シグマ光機
型番	WPQ-5320-2M
適応波長[nm]	532
S 偏光反射率[%]	> 97
外観	

表4.12 平面ミラー仕様

項目	詳細
メーカー	Thorlabs
型番	SSM1010B
焦点距離[mm]	$\lambda / 20$
偏心[']	<1
外観	

表4.13 ビームエキスパンダ仕様

項目	詳細
メーカー	シグマ光機
型番	LBED-10
ビーム倍率[倍]	10
適応波長[nm]	400～700
外観	

4.5.2 計測対象

本研究の評価実験ではナノオーダの段差基準器を用いた．基準器はSi基板にイオンビームを用いてスパッタリングすることで作成されたものである．この基準器は，1[nm]以下の測定精度を持つACCRETECH社製の接触式測定器SURFCOM 1400Dを用いて，段差の高さを確認済みである．基準器の外観を図4.8，基準器の仕様を表4.14に示す．

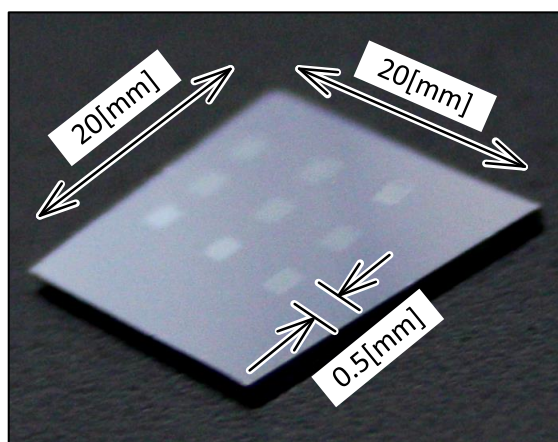


図4.8 基準器

表 4.14 基準器の仕様

項目		詳細
材質		Si
加工法		イオンビーム
サイズ [mm]		0.5×0.5×3 (L/W/H)
深さ種類 [nm]	1	15
	2	30
	3	70
	4	80
	5	450
	6	1,500

また，基準器は急峻な段差ではなく約45[deg]の斜面を持つ段差である．そのため単一波長のレーザで計測した場合にも，位相連結を行うことで三次元形状を復元可能である．基準器の段差は深さが異なるだけであり，表面反射など他の特性はすべて同一であるため，本評価実験では80[nm]の段差のみを対象として評価実験の計測および結果の考察を行う．

4.5.3 計測手法

本実験では，干渉計測における一般的な計測処理フロー（図4.9）に従い，三次元計測を行う．本項では，計測に用いる手法について具体的に述べる．

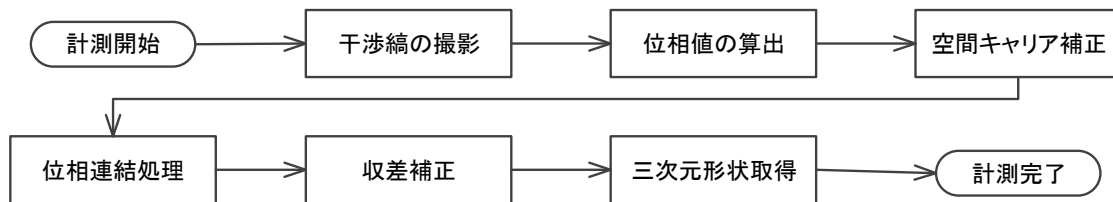


図4.9 計測処理フロー

まず、カメラで干渉縞の撮影を行う。段差を撮影した際に得られる干渉縞の画像を図4.10(a)に示す。干渉縞の撮影時には、回転ステージにより偏光板を回転させることで位相変調させながら、連続的に撮影する。これにより位相が一定量ずつシフトした干渉縞を得られる。次にフーリエ変換位相シフト法により画素毎に物体光の位相を算出する。得られた位相値を図4.10(b)に示す。以降では、画像中の最大の位相値を白（輝度値255）、最小の位相値を黒（輝度値0）として、位相値をグレースケールに置き換えて表現する。ここで、参照ミラーが計測対象表面に対して傾斜している場合には、干渉縞が図4.10(a)のように一方向に細かい明暗のパターンとなる。この傾斜（キャリア）を補正しなければ計測対象平面に対して垂直なZ軸方向の高さを算出できない。そこで干渉縞の細かい明暗より空間周波数を求めることで、この傾斜を補正する。本研究では、干渉縞撮影画像を2次元フーリエ変換してパワースペクトルの最大値である周波数を求めて、その空間周波数に対応する位相平面を差分することで空間キャリアを補正する。空間キャリア補正した位相画像を図4.10(c)に示す。ここで計測対象の形状変換がレーザ波長より大きい場合に、算出される位相値は $-\pi \sim \pi$ の不連続な値であるため、位相連結処理を用いて連続な位相値に変化する。本研究では、Laplacian Based QualityMap^[91]を用いた二次元位相連結法^[92]により位相連結を行う。位相連結後の連続な位相値を図4.10(d)に示す。

ここで計測装置の光学系に、テレセントリックレンズや対物レンズなどの光学素子を用いた場合、必ず収差が生じる。この収差による光路差を取り除かず形状を位相値からそのまま形状に変換すると、図4.11(a)に示すように計測箇所が平面であるにもかかわらず収差により歪んだ形状が求まる。そこで本研究では、Zernikeの円環多項式に基づいた最小二乗法による波面フィッティングを行うことで、これらの収差成分を含んだ誤差を校正し除去する^{[93][94]}。Zernike多項式を用いたフィッティングは、計測前にキャリブレーション工程として平面ミラーを対象にあらかじめ行う。このキャリブレーションにより、計測形状を

補正するパラメータを算出して，計測時にそのパラメータを用いて収差成分を除去する．最後に，干渉測量法に基づいて収差補正後の連続な位相値から三次元形状を復元する．復元した三次元形状を図4.11(b)に示す．

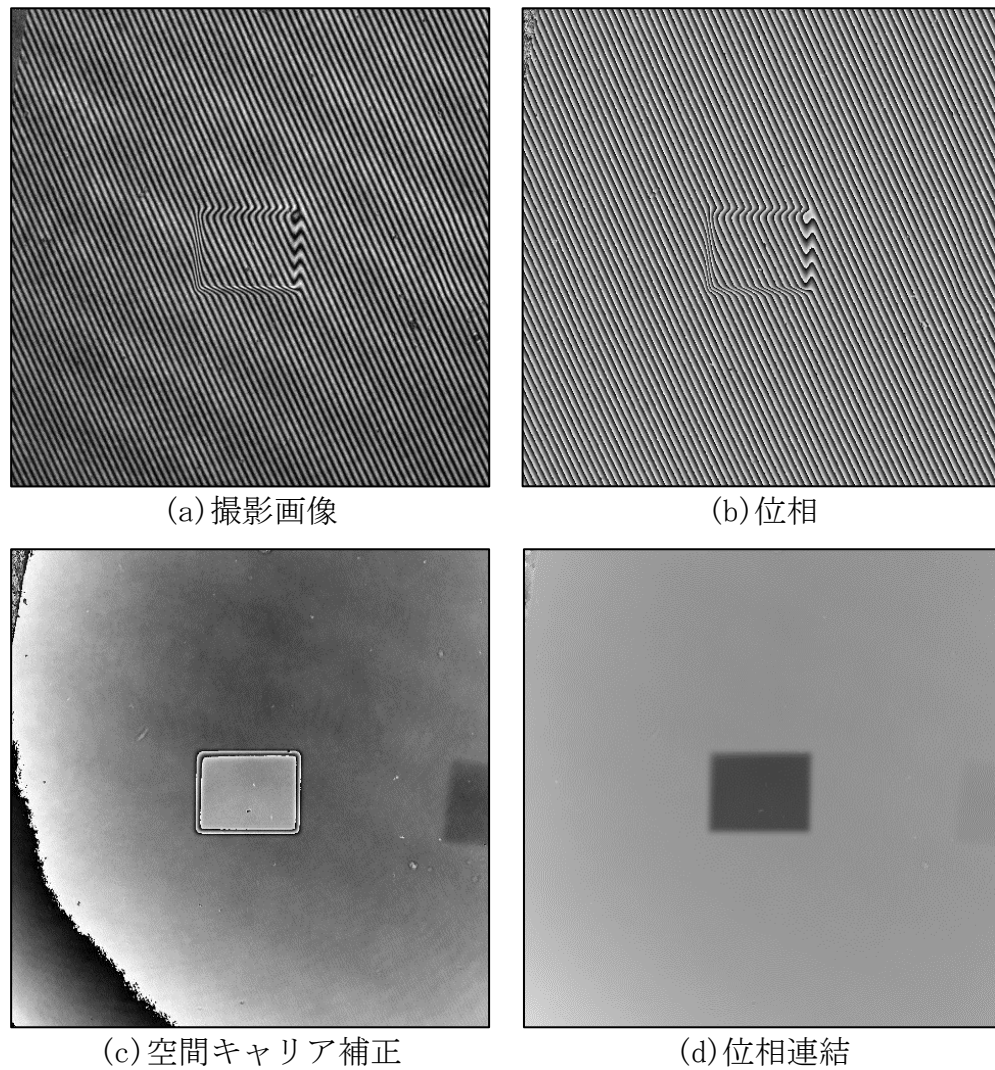


図4.10 各処理結果

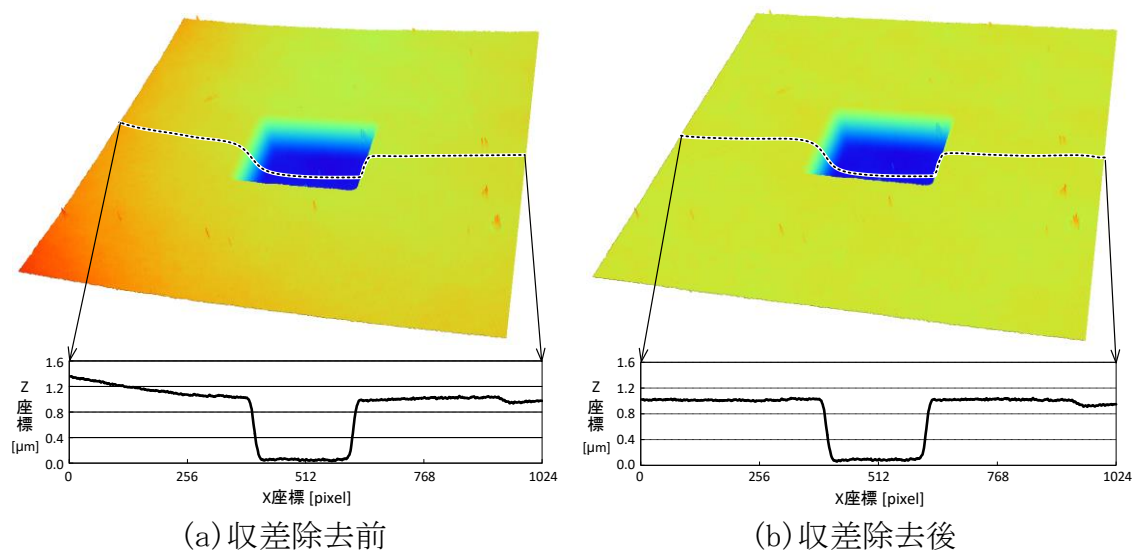


図4.11 収差補正

4.5.4 位相シフト法による計測精度評価

まず位相信頼性を評価する手法を比較する前段階として、本研究で構築した計測装置の計測精度を評価した。計測装置の精度を評価するために、ナノオーダの基準器を用いて段差間の距離がどれだけ真値に近いのか、表面粗さが小さいかの2点で評価を行う。しかし、位相シフト法による計測では、計測に使用する干渉縞の撮影枚数に大きく依存して計測精度がする。そこで撮影枚数を限りなく多く撮影して、撮影枚数を減らして位相解析したときの計測誤差も評価することで、どの程度の撮影枚数を用いれば、計測環境のノイズを除去して解析可能かについても検証した。本研究では、位相復元法に位相変調信号以外のノイズを除去可能なフーリエ変換位相シフト法を用いる。また本実験では、計測装置の精度限界を評価することが目的であるため、表4.16に示す防振台に計測装置を固定して、基準器を防振台に対して水平において計測した。実験で用いる計測装置のパラメータを、表4.15に示す実験条件に設定して実施した。

表4.15 計測時のパラメータ

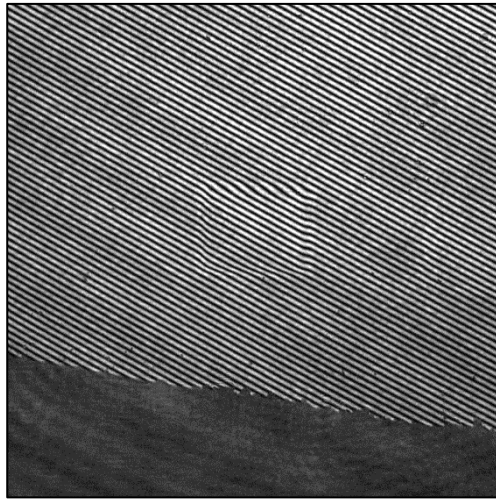
項目	詳細
カメラのフレームレート [fps]	18
カメラの露光時間 [ms]	0.15
回転ステージの速度 [deg/sec]	120

表4. 16 防振台の仕様

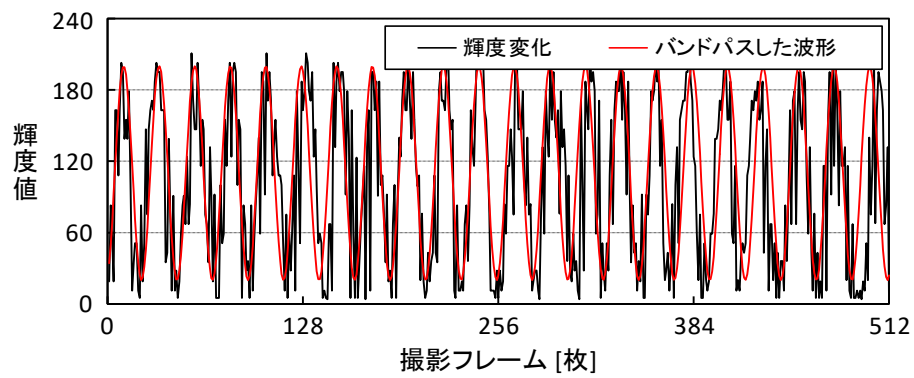
項目	詳細
メーカー	シグマ光機
型番	DT-4048A-E
固有振動数 [Hz]	約 2.0～2.3
防振方法	精密空気ばね
搭載可能重量 [N]	392
外観	

評価実験では、位相変調させながら2048枚の干渉縞画像を撮影した。計測した干渉縞の撮影画像、画像中心座標の輝度変化、そのパワースペクトルを図4. 12に示す。フーリエ変換位相シフト法において抽出するピーク周波数を赤線で示す。この計測で得られた2048枚全ての画像を用いて計測した段差の三次元形状を図4. 13(a)、破線部の断面図と接触式の測定結果を合わせて図4. 13(b)に示す。2つの装置間ではXYの測定分解能も異なるため、表面のバラツキも異なる。そのため、計測結果のバラツキをあわせるために、本計測装置で得られた計測結果にガウシアンフィルタ ($\sigma=3$, 窓サイズ 7×7) を適用している。また、接触式の測定箇所と本計測結果の断面の箇所は厳密に一致しないため、断面にはずれが生じている。

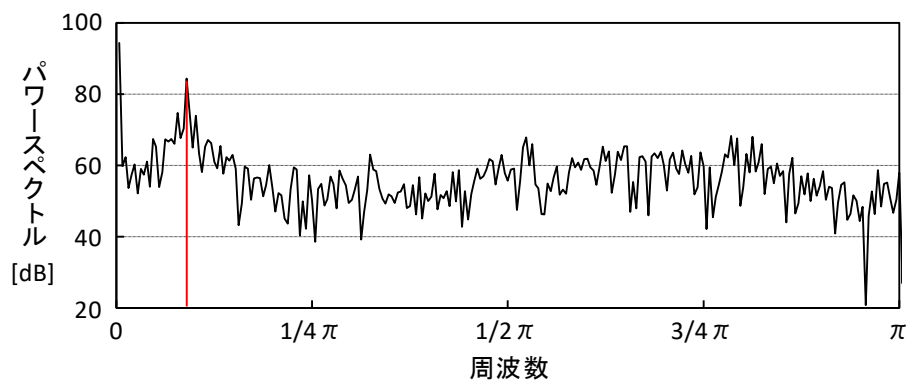
本実験では、2048枚を用いて復元したデータを基準として、位相の算出に用いる画像枚数を減らしたときの計測精度の変化を評価する。使用する画像枚数は1024枚から半分ずつ減らしていき、最低32枚まで減らして検証した。どの使用画像枚数の場合においても、初期フレームから4フレームずつ使用する画像をシフトしていき、100回分の三次元形状を求めた。そして精度評価の方法として、全ての形状から段差の平均距離と表面粗さの評価を目的とした標準偏差の2つの値を求めて評価した。平均距離の算出方法として、平面部と段差面でRANSACを用いて近似平面を求めた後、両近似平面間の距離の平均値を求めた。標準偏差の算出方法では、各近似平面とその面に属する点群の累積二乗距離の平方根を求めた。



(a) 干渉縞の撮影画像

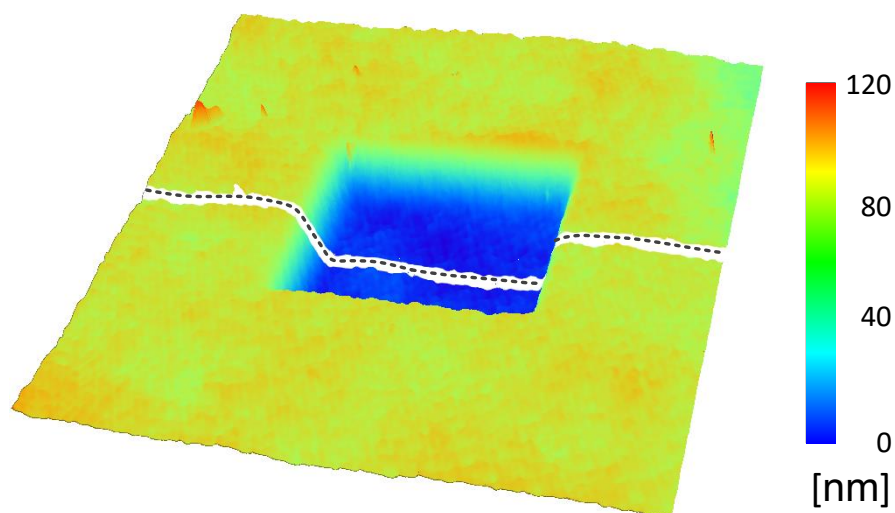


(b) 輝度変化

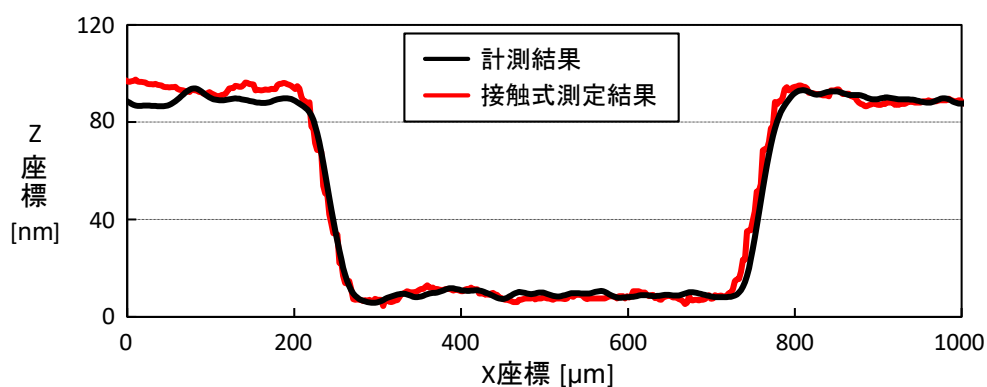


(c) パワースペクトル

図4.12 基準器の計測データ（画像中心座標）



(a) 段差80[nm]の三次元形状



(b) (a)の破線部における断面図

図4.13 基準器の計測結果

位相算出に用いた画像枚数に対応する近似平面間の平均距離の分布を図4.14、標準偏差の分布を図4.15に示す。平面推定に使用するRANSACの許容誤差は ± 10 [nm]として、段差の傾斜付近は手動でマスクすることにより除外している。これらの分布より、図4.14、図4.15中に赤点で示した平均値からの一定範囲内の点群を正しく計測できた点とみなすことで、その発生頻度から計測の安定性を評価した。平均距離では平均値から ± 2 [nm]、標準偏差では平均値から ± 1 [nm]を安定した計測結果と定義して評価した結果を表4.17、表4.18に示す。平均距離と標準偏差の頻度より、使用枚数256枚以上で安定した計測が可能であること確認できた。本システムの計測誤差は、使用枚数1024枚のとき平均誤差5.8[nm]、標準偏差7.1[nm]である。

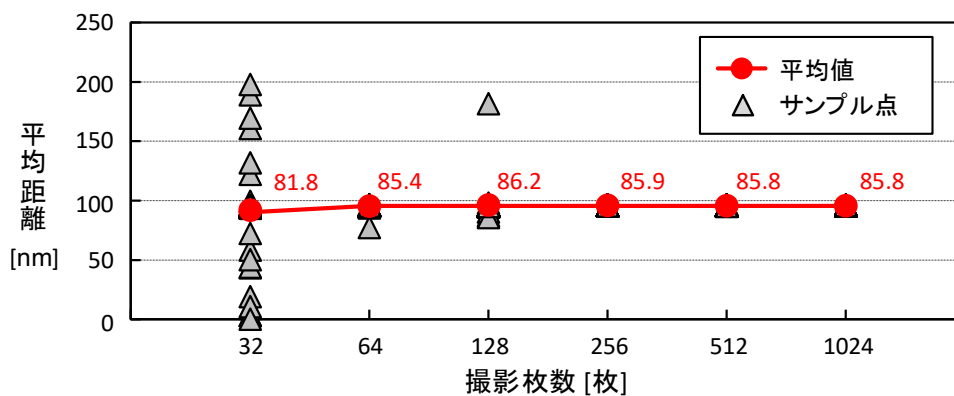


図4.14 平均距離

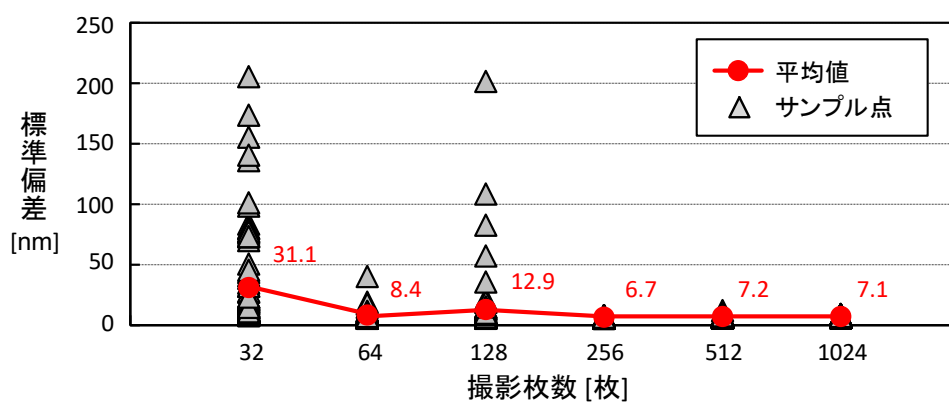


図4.15 標準偏差

表4.17 平均距離の平均値から ± 2 [nm]の頻度

使用枚数 [枚]	32	64	128	256	512	1024
頻度 [%]	82	99	96	100	100	100

表4.18 標準偏差の平均値から ± 1 [nm]の頻度

使用枚数 [枚]	32	64	128	256	512	1024
頻度 [%]	28	71	66	100	95	100

撮影枚数に依存して計測精度が変化する大きな要因としては、サンプリング数が減ることにより本来の位相変調周波数とは異なるノイズの周波数と分離できず、ノイズも丸め込んだ位相が算出されることが考えられる。そのため、ある一定のサンプリング数を越えたところからは、計測精度が変化せず安定す

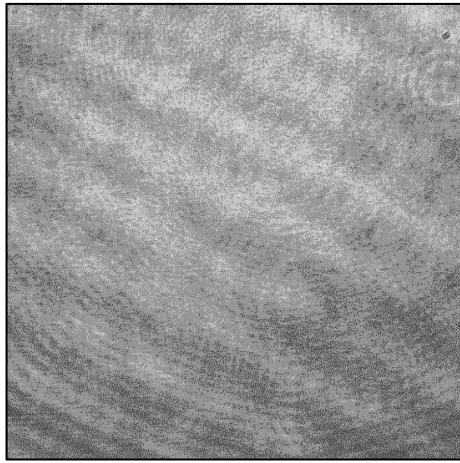
と考えられる．しかしサンプリング数が少ない場合においても，頻度は少ないが計測精度の良い結果も何度かは取得できていることがわかる．今回の防振台には，空気圧で制御するタイプを使用している．しかし防振方式に依らず，一般的な静止環境においても，図4. 15に示すように振動をナノオーダで制御することが困難であり，計測精度にバラツキが生じる．

4. 5. 5 防振環境における信頼性評価手法の比較実験

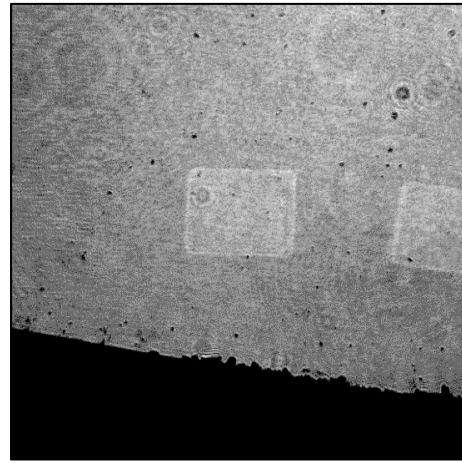
本項では，提案手法の有効性を確かめるため，4.3節で述べた従来手法と比較した実験について述べる．本実験では，計測して得られる位相の誤差と位相信頼性評価値の相関関係を実験的に確かめる．実験環境や条件については，前項の計測精度評価実験と全て同一条件である．防振環境においても，前項の結果で得られたように，安定性を保つことは困難であるため，まず本実験では防振環境で実施する．本実験の計測対象である基準器はSi製であるため，基準器の表面が平坦であるという前提に基づき，計測した形状の表面粗さを真値との計測誤差とみなして，各手法により得られる信頼値との相関関係を評価する．

本実験では位相信頼性を評価するためのデータセットを，初期フレームから4フレームずつ使用する画像をシフトしていき，100回分の計測結果（振幅画像・位相画像）を取得した．計測アルゴリズムにはフーリエ変換位相シフト法を用いて，64枚の撮影画像から振幅・位相分布の算出を行う．本実験で取得した基準器の計測データの一例を図4. 16(a)～(c)に示す．基準器の平面部の表面粗さを評価するため，最小二乗法にRANSACを用いて近似平面を求め，近似平面とその面に属する点群の累積二乗距離を表面粗さとして算出した．平面推定と表面粗さの評価に使用した領域を表すマスク画像を図4. 16(d)に示す．この表面粗さと従来・提案手法の信頼値との分布を求めた．ただし，従来手法はいずれも画素毎に信頼値を得る手法であるため，そのままでは比較できない．そこで，計測範囲全体の信頼値の平均値を従来手法の画像全体の信頼値として用いる．

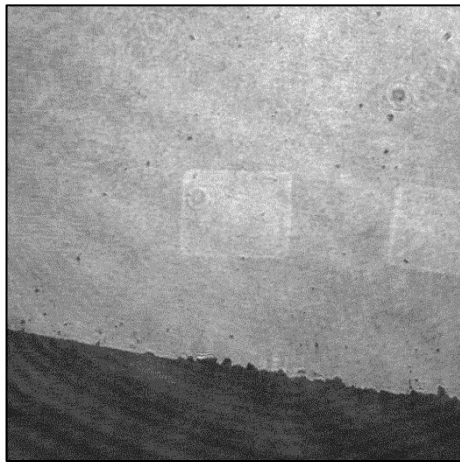
前項の実験と同様に，防振台を用いた環境下で基準器を測定したデータを用いて相関関係を求めた．計測装置を防振台に固定し，防振台の上に基準器を置いた状態で計測した．この計測を5回繰り返して作成したデータセットを用いて，計測データ毎に得られる表面粗さを表す標準偏差と各手法の信頼値を二次元プロットした散布図を図4. 17～図4. 21に示す．



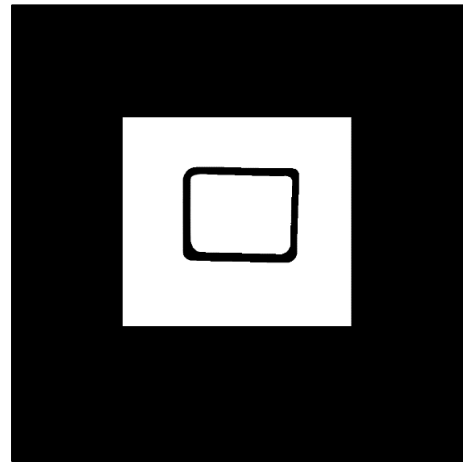
(a) 参照光画像 I_R



(b) 物体光画像 I_O



(c) テンプレート画像 I_{O+R}



(d) 平面推定・表面粗さの評価領域

図4.16 基準器の計測時に撮影した画像

(1) 従来手法 1 (\bar{S})

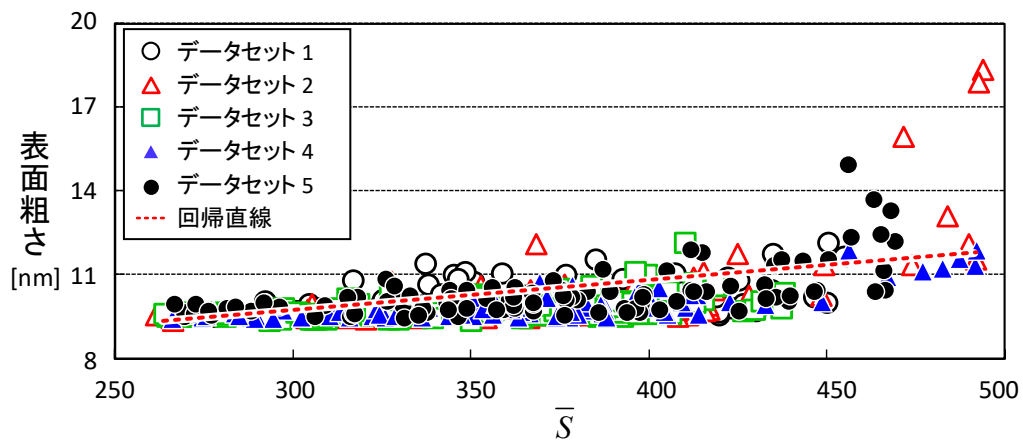


図4.17 従来手法 \bar{S}

(2) 従来手法 2 ($\bar{\gamma}$)

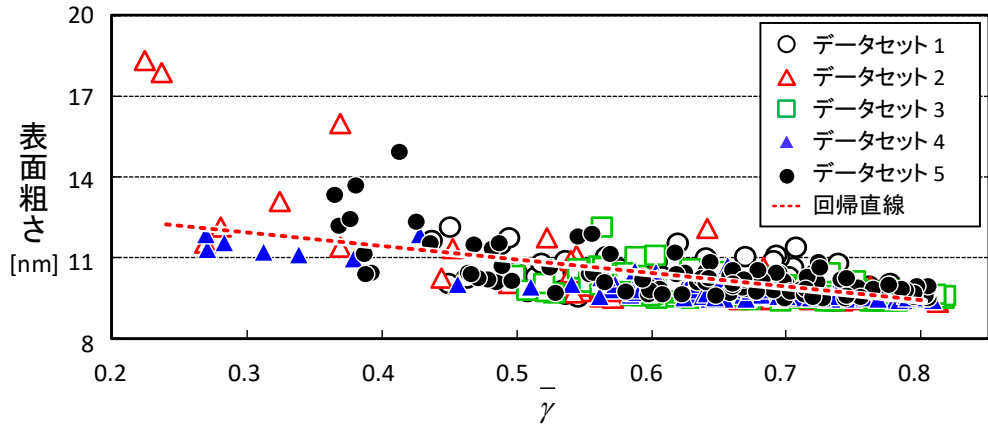


図4.18 従来手法 $\bar{\gamma}$

(3) 従来手法 3 (\overline{SNR})

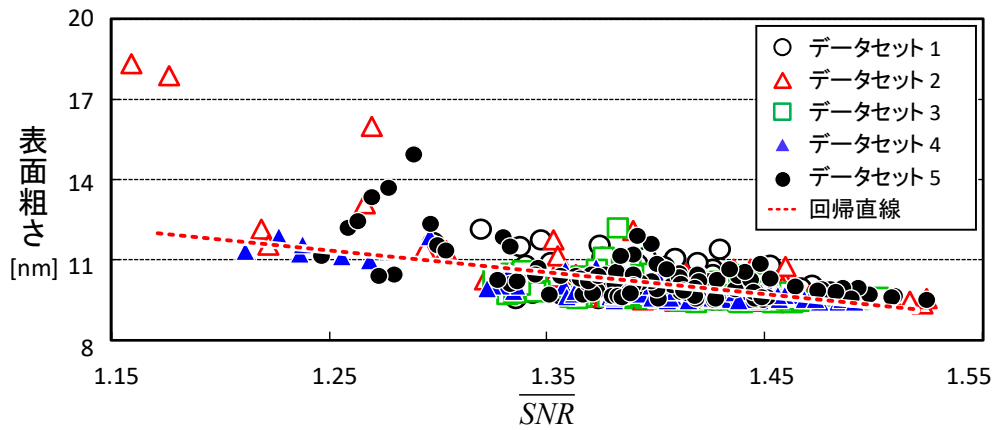


図4.19 従来手法 \overline{SNR}

(4) 提案手法 1 (R_{NCC})

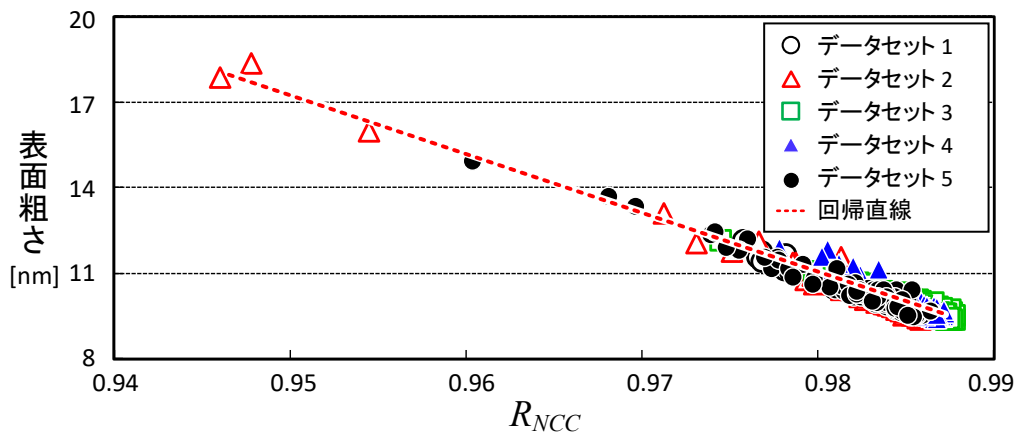


図4.20 提案手法 R_{NCC}

(5) 提案手法 2 (R_{ZNCC})

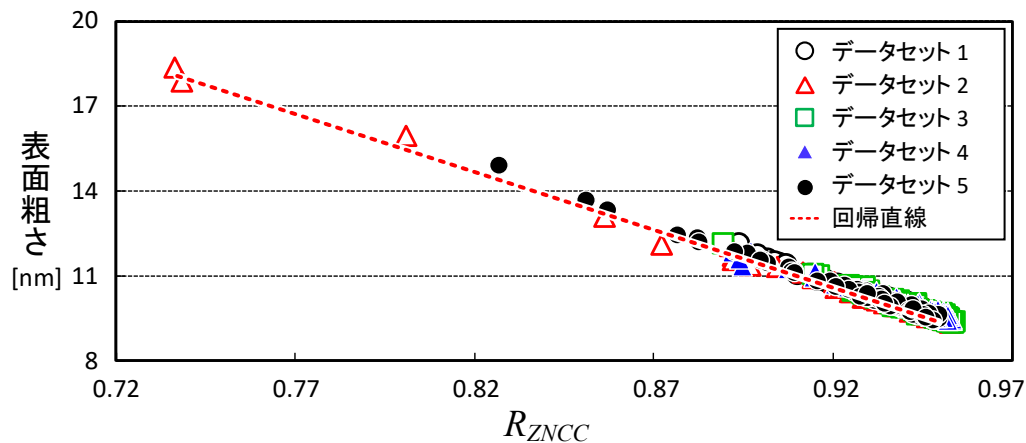


図4. 21 提案手法 R_{ZNCC}

従来手法1のみ誤差量に基づいた信頼値であるため、右上がりの分布をしている。他の手法で得られる信頼値は、位相変調信号の強さに基づいているため、右下がりの分布をしている。

これらすべての手法を比較するため、データセットごとの相関係数の絶対値と回帰直線の決定係数について箱ひげ図を比較した結果を図4. 22，図4. 23に示す。さらに、各手法で5つのデータセット全てをまとめた全体の分布に対して、相関係数，決定係数を求めた結果を表4. 19に示す。従来手法1 (\bar{S}) のみ右上がりの分布をしているため、相関係数を絶対値にして比較した。この結果より、従来手法はいずれの手法も決定係数が低いことから、表面粗さに対して線形な指標であるとは言えない。しかし相関係数の絶対値は0.5～0.6程度であるため、全体的に右上がりまたは右下がりの分布をしており、ある程度の相関関係にはあるといえる。一方、提案手法により得られた信頼値 R_{NCC} ， R_{ZNCC} は、相関係数と回帰直線の決定係数が、いずれも表面粗さに対して明らかに高い線形の相関関係であることを確認した。信頼値が線形であるとする、信頼値のある値に対応した計測精度を容易にわかるため、信頼値が直接計測精度を表す尺度であると言える。

提案手法の信頼値がどれだけ形状の誤差に相関があるか、表面粗さだけでなく実際の計測結果の形状を確認する。ここでは代表例として、提案手法2 (R_{ZNCC}) の信頼値が最も低いデータと最も高いデータのみを示す。計測データの振幅画像，空間キャリア補正後の位相画像，形状とその断面図を図4. 24，図4. 25に信頼値 R_{ZNCC} を併記して示す。

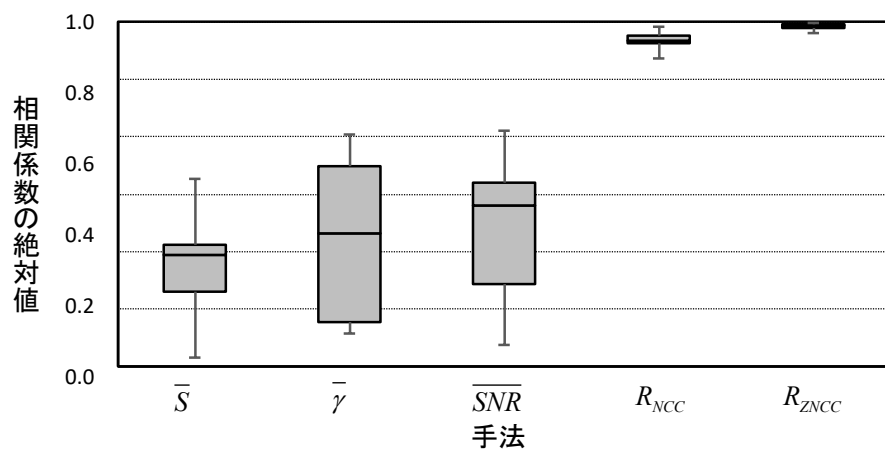


図4.22 防振環境下におけるデータセットごとの相関係数

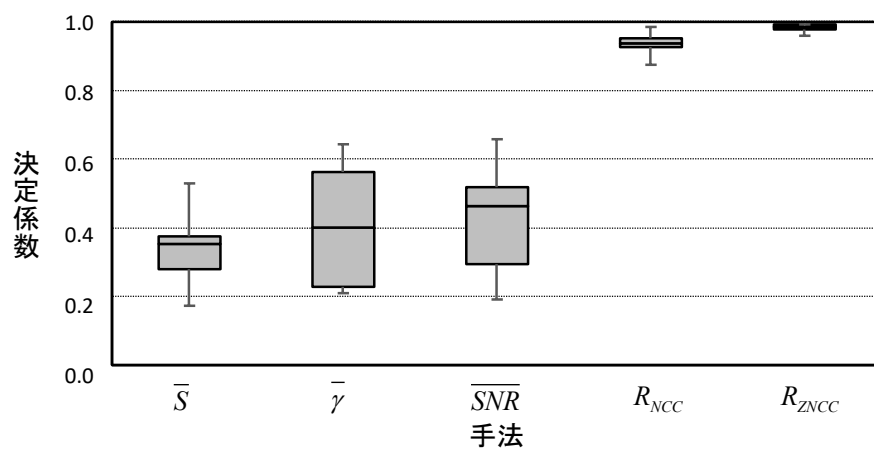
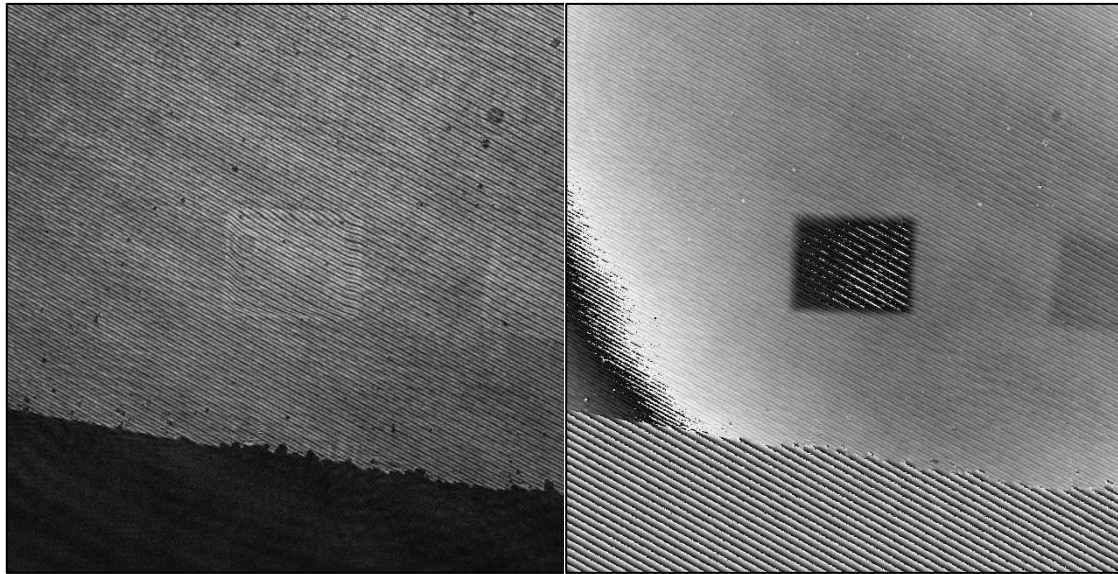


図4.23 防振環境下におけるデータセットごとの決定係数

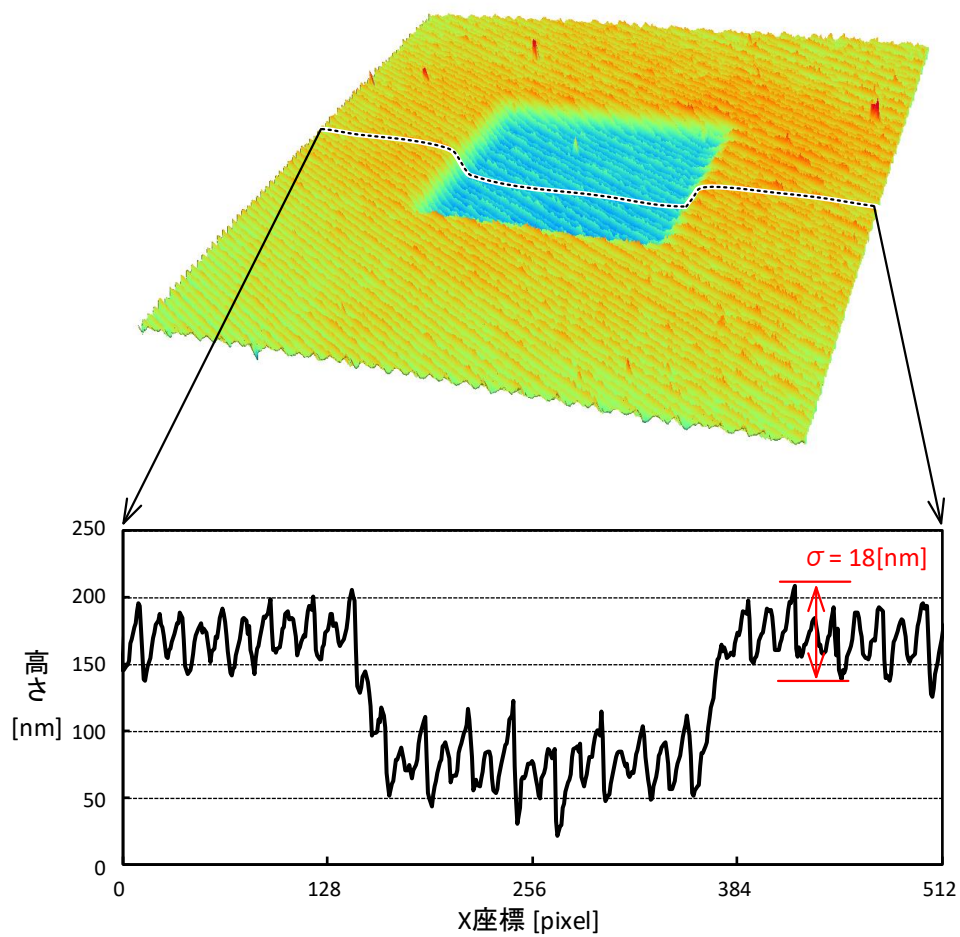
表4.19 防振環境における相関関係

手法	相関係数	決定係数
\bar{S}	0.546	0.298
$\bar{\gamma}$	-0.638	0.407
\overline{SNR}	-0.634	0.402
R_{NCC}	-0.972	0.945
R_{ZNCC}	-0.993	0.987



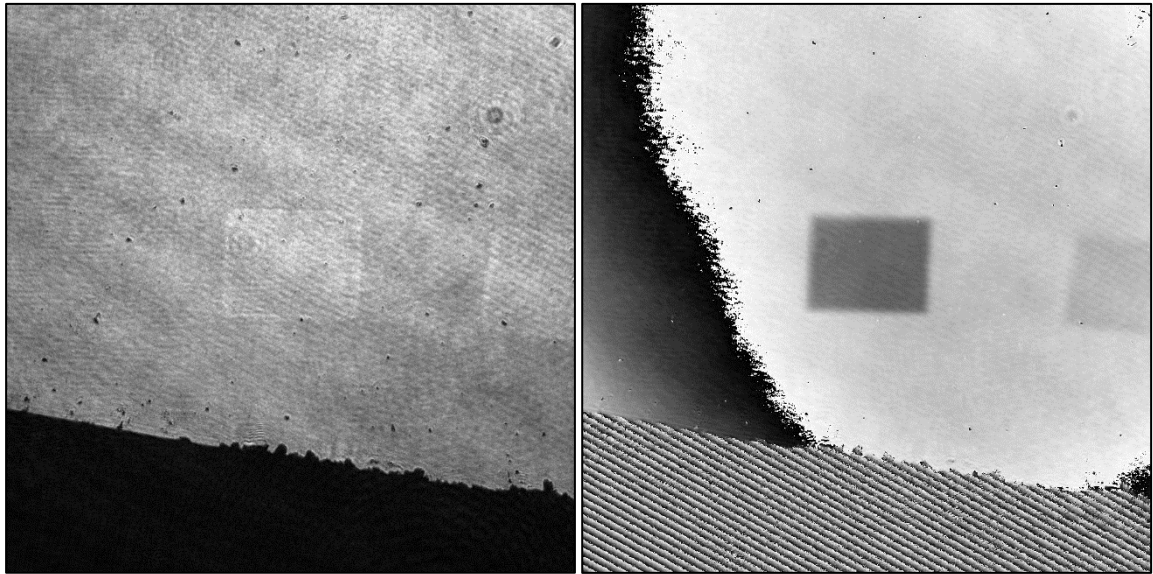
(a) 振幅画像

(b) 位相画像（空間キャリア補正後）



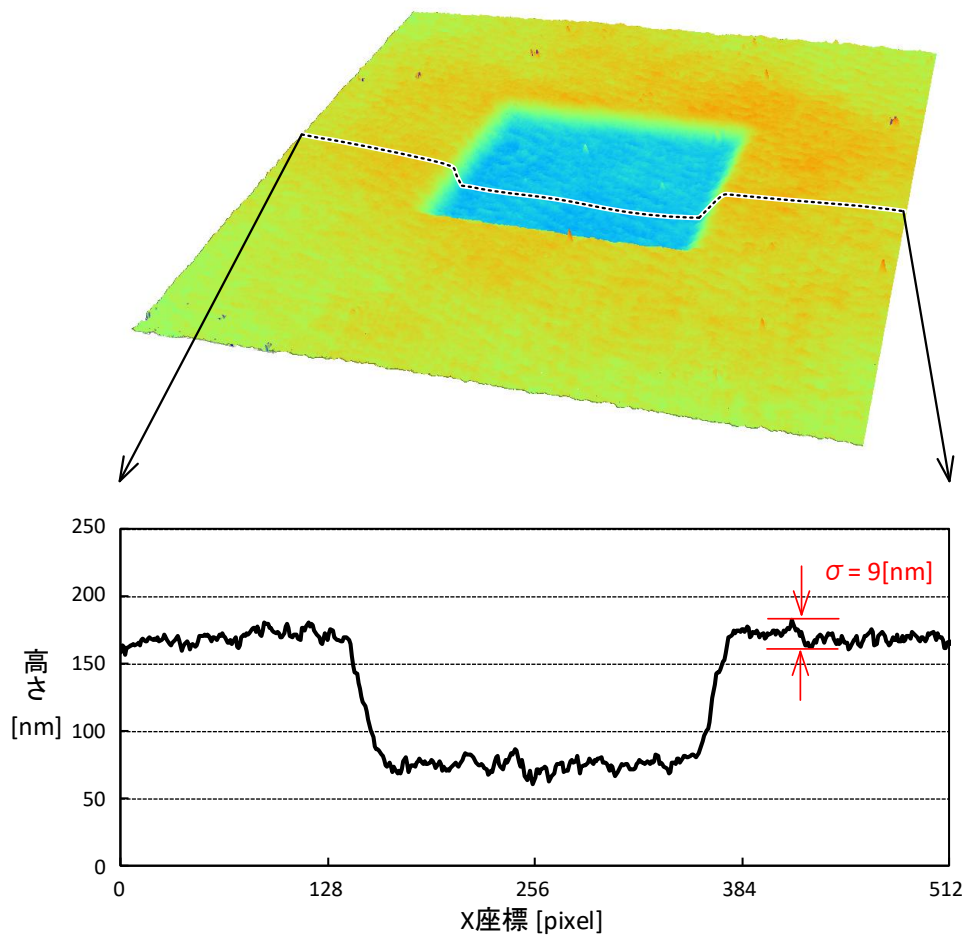
(c) 三次元形状と断面図

図4.24 信頼値の最も低い計測結果 ($R_{ZNCC} = 0.736$)



(a) 振幅画像

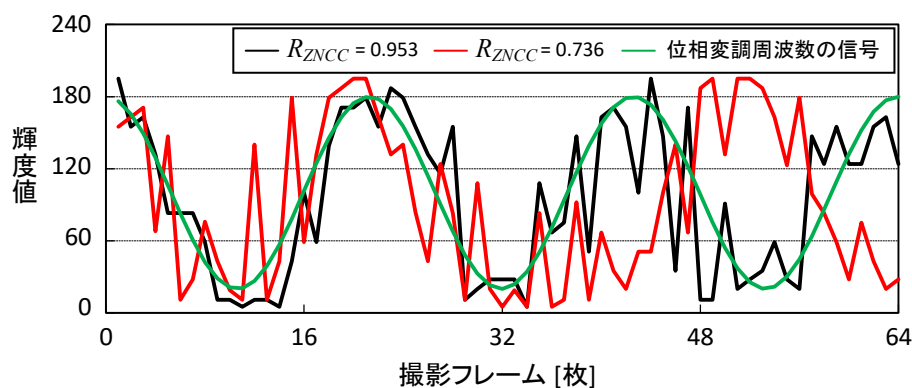
(b) 位相画像（空間キャリア補正後）



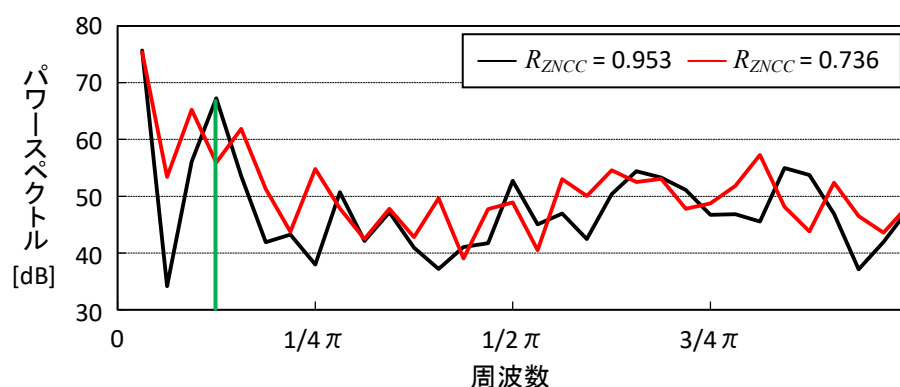
(c) 三次元形状と断面図

図4.25 信頼値の最も高い計測結果 ($R_{ZNCC} = 0.953$)

以上の2つの例より，提案手法の信頼値を用いて，計測誤差が大きい計測データと小さい計測データに区別出来ていることが，表面粗さの分布だけでなく，全体の形状からもわかる．ここで計測精度が異なる要因について考察するため，上記2例の画像中心座標における輝度変化とパワースペクトルの比較を図4.26に示す．また，フーリエ変換位相シフト法により抽出した位相変調周波数と同じ波形とパワースペクトルに抽出した周波数を緑線で合わせて示す．



(a) 輝度変化



(b) パワースペクトル

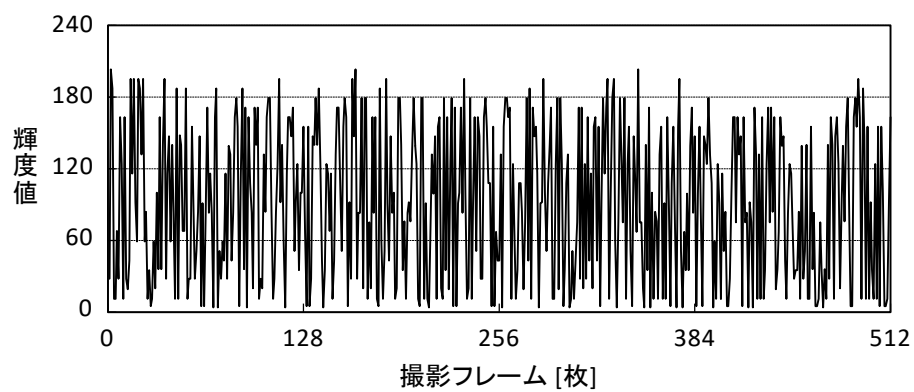
図4.26 計測精度に大きな差があるサンプル計測データの比較

以上の比較より計測精度が高いデータは，位相変調信号と同じ周期3つ分の波形であることがわかる．これに対して，計測精度が低いデータは周期2つ分の波形であり，抽出した周波数よりも低い周波数の信号が大きいことがわかる．パワースペクトルからも，計測精度が低いデータでは1周期分小さい信号と，位相変調周波数の倍周期に当たる信号のパワーが高いことが確認できる．まず1つ目の1周期分小さい信号については，本来の位相変調信号に，計測環境の低周

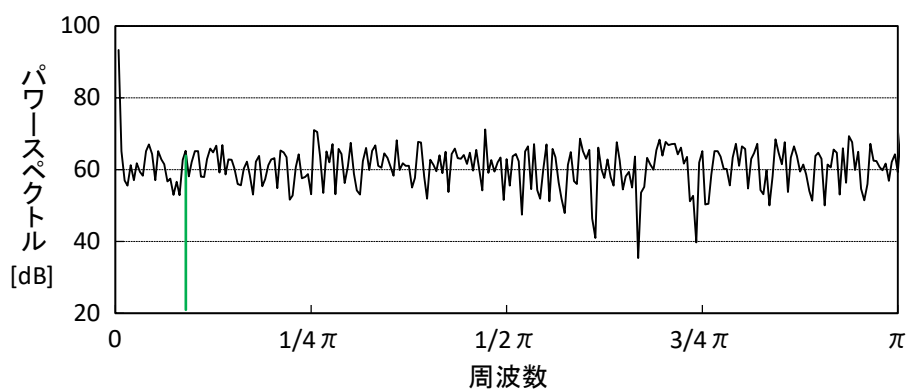
期振動が重ね合わさることで長い周期の輝度変化が起きたと考えられる。倍周期が観測された要因としては、高調波が発生したことが考えられる。高調波とは、一定周波数の信号に対して白色雑音加わると観測される、その周波数の定数倍に当たる信号である。防振環境でも観測される微弱な振動が白色成分を含んでおり、高調波が発生したと考えられる。以上の理由から、図4.24の計測データでは位相変調信号を検出できておらず、得られた位相値は全く信頼できないものであることを表す。このように実際の計測データからみても、提案手法により得られた信頼値が、計測精度の評価に相当する指標となる可能性があることを確認できる。

4.5.6 振動環境下における信頼性評価手法の比較実験

前節では、防振台を用いた環境下において計測した平面物体の表面粗さと提案手法の信頼値がおおよそ線形な相関関係であることを確認できた。本節では振動環境下においても、提案手法が位相の誤差に対して線形な相関関係が得られるか検証を行う。防振台を用いてないことで、振動が物体に伝わる環境で計測を行い、前節同様に5回分のデータセットを作成して、評価した。計測物体は前節の実験から平行移動させていないため、得られる撮影画像はおおよそ同一である。この振動環境下で計測したデータとして、位相変調しながら撮影した干渉縞画像の中心座標における輝度変化と、そのパワースペクトルを図4.27に示す。図4.27(b)にフーリエ変換位相シフト法により抽出した周波数を緑線で示すように、前節の計測環境と比較してノイズ成分が多く、本来の位相変調振動のS/N比が低いことがわかる。このように振動環境下では計測時にノイズが多く含まれてしまい、安定した計測精度を保つことが非常に困難である。したがって本節では、計測誤差が大きすぎるあまりに、全体の大まかな形状も正しく得られない計測データが多く存在した。この要因としては、計測に失敗したデータの1例を図4.28に示すように、位相連結処理において位相境界を正しく判定できず、位相連結に失敗することが挙げられる。これらの位相連結に失敗したサンプルでは、平面部分の表面粗さで計測誤差を評価することが適当ではない。そのため、目視で位相連結に失敗したサンプルを除外したデータセットを作成した。そのときのサンプル数を表4.20に示す。



(a) 輝度変化



(b) パワースペクトル

図4.27 振動環境下における基準器の計測データ（画像中心座標）

表4.20 各データセットのサンプル数

データセット	サンプル数
1	94
2	69
3	51
4	36
5	69

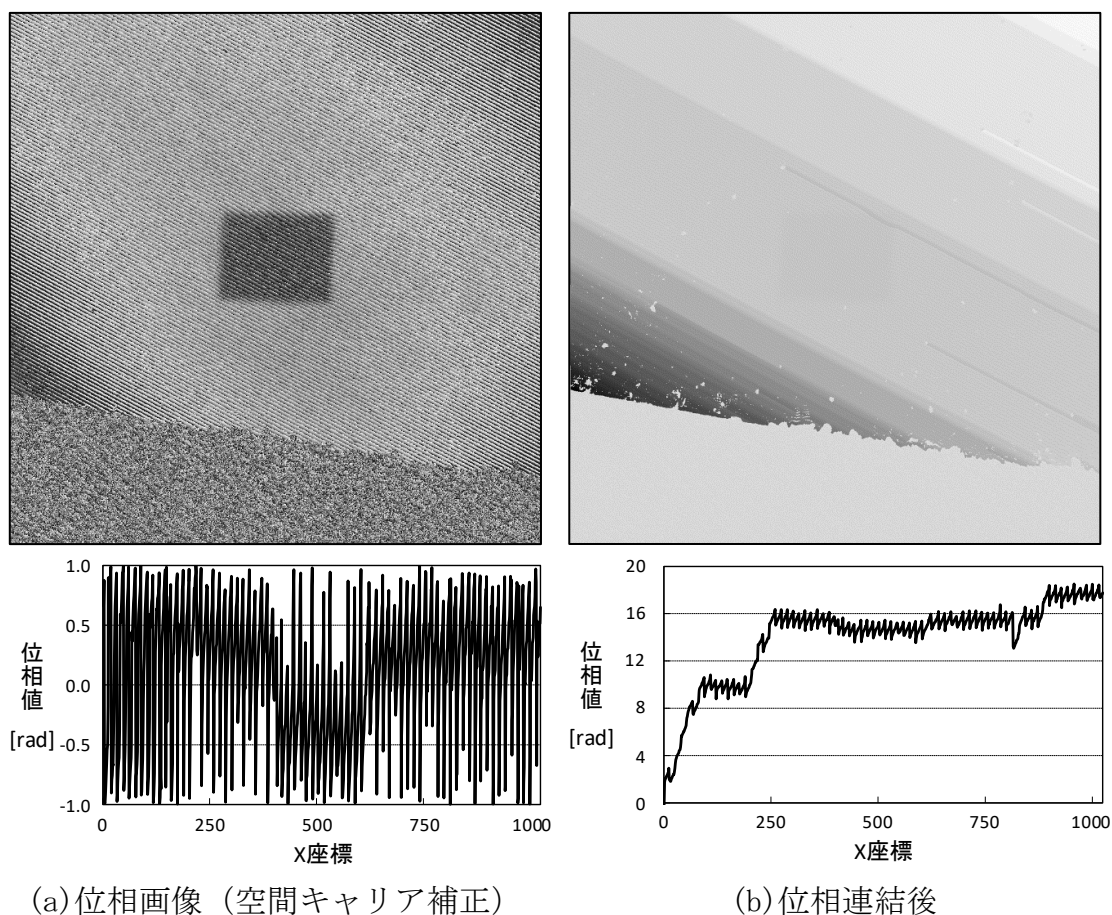


図4.28 位相連結の失敗例

このデータセットにより得られた表面粗さと各手法の信頼値を用いて、相関関係を評価した．結果として、相関関係を表す二次元プロットの散布図と回帰直線を図4.29～図4.33に示す．

(1) 従来手法 1 (\bar{S})

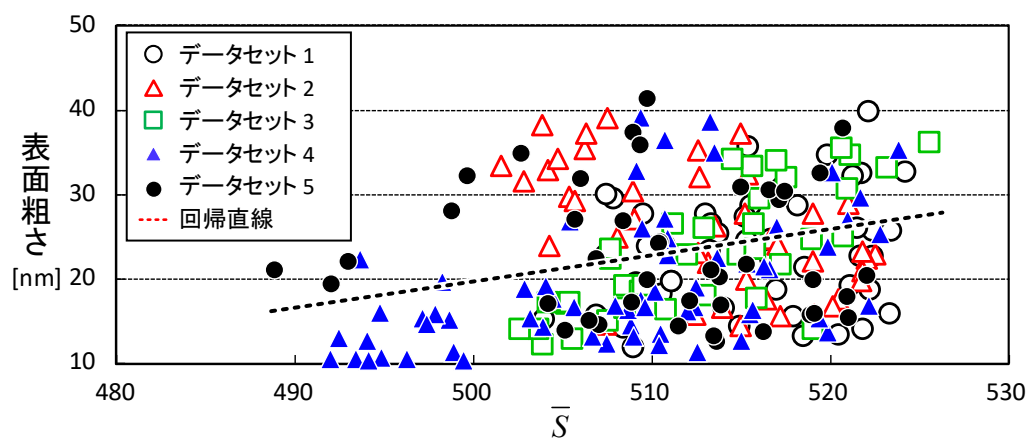


図4.29 従来手法 S

(2) 従来手法 2 ($\bar{\gamma}$)

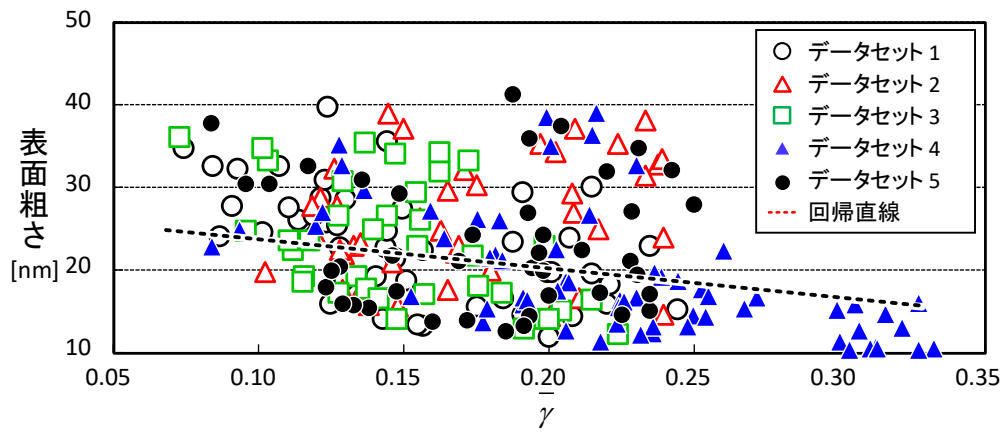


図4.30 従来手法 γ

(3) 従来手法 3 (\overline{SNR})

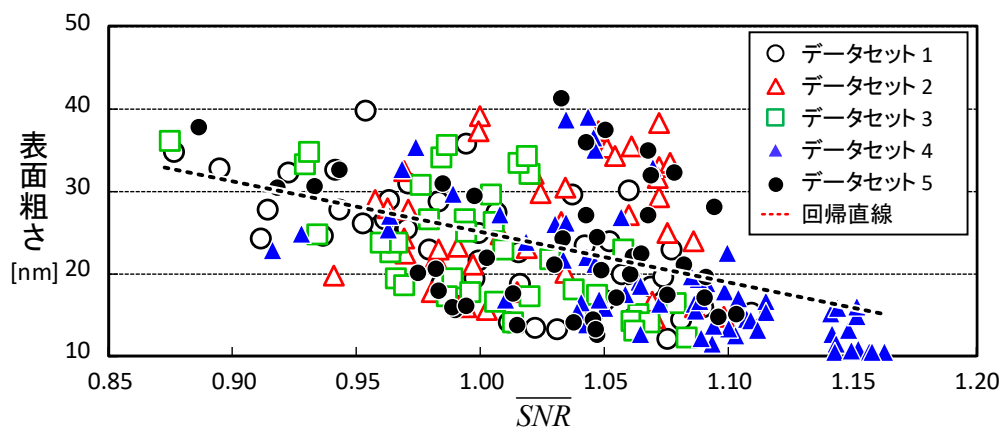


図4.31 従来手法 SNR

(4) 提案手法 1 (R_{NCC})

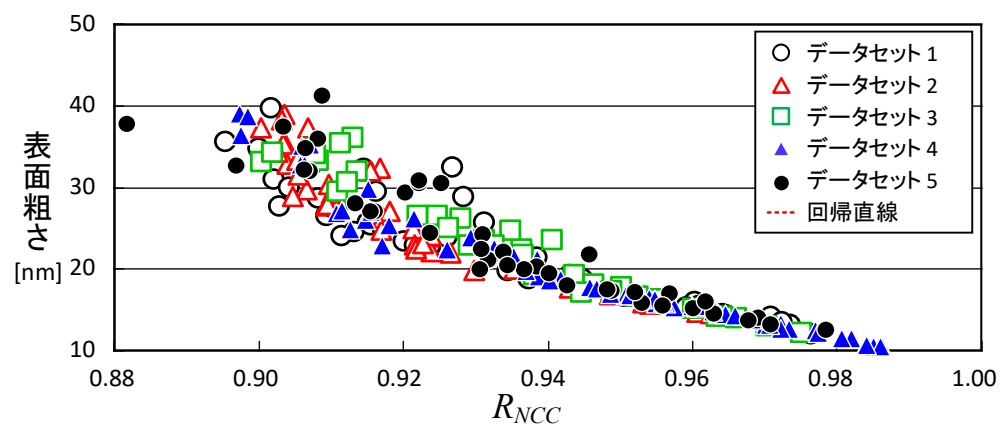


図4.32 提案手法 R_{NCC}

(5) 提案手法 2 (R_{ZNCC})

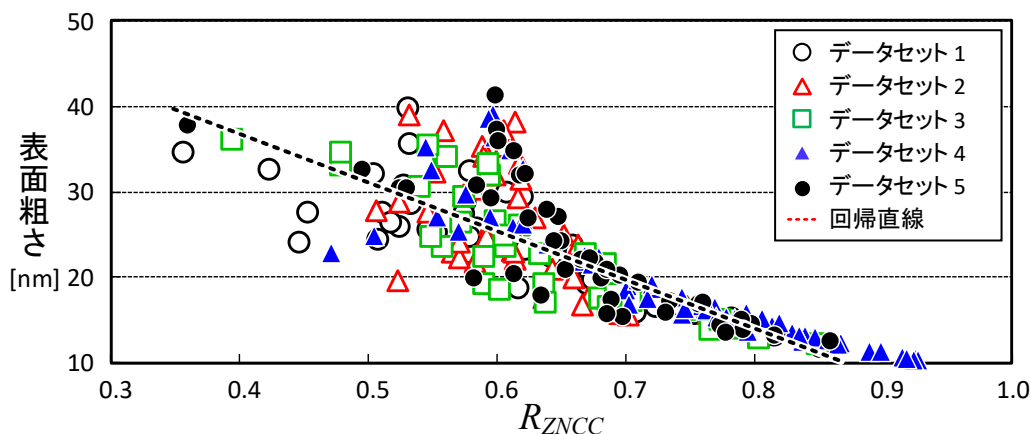


図4.33 提案手法 R_{ZNCC}

以上の散布図より，従来手法についてはいずれも相関関係が無いことが見て取れる．提案手法では， R_{ZNCC} について表面粗さ20[nm]以上では相関関係に線形性が無くなっていることが見て取れるが，良い計測結果を選択するという観点では，信頼値が低すぎるものに対しては採用するはずがないため，選択する用途の場合には問題ない影響であると考えられる．

これらの手法を比較するため，データセットごとの相関係数と，回帰直線の決定係数の箱ひげ図を図4.34，図4.35に示す．さらに，各手法で5つのデータセット全てをまとめた全体の分布に対して，相関係数，決定係数を求めた結果を表4.21に示す．

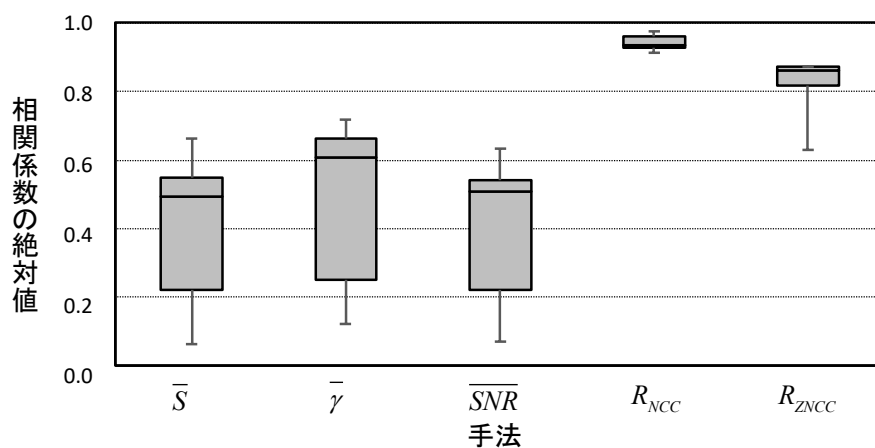


図4.34 振動環境下におけるデータセットごとの相関係数

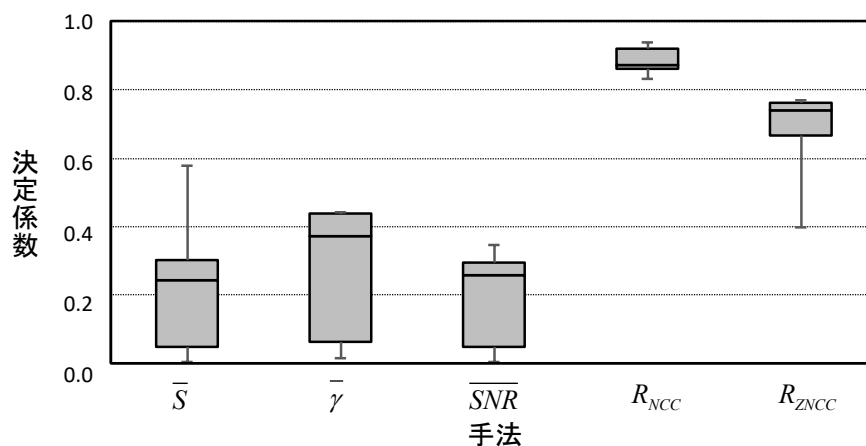


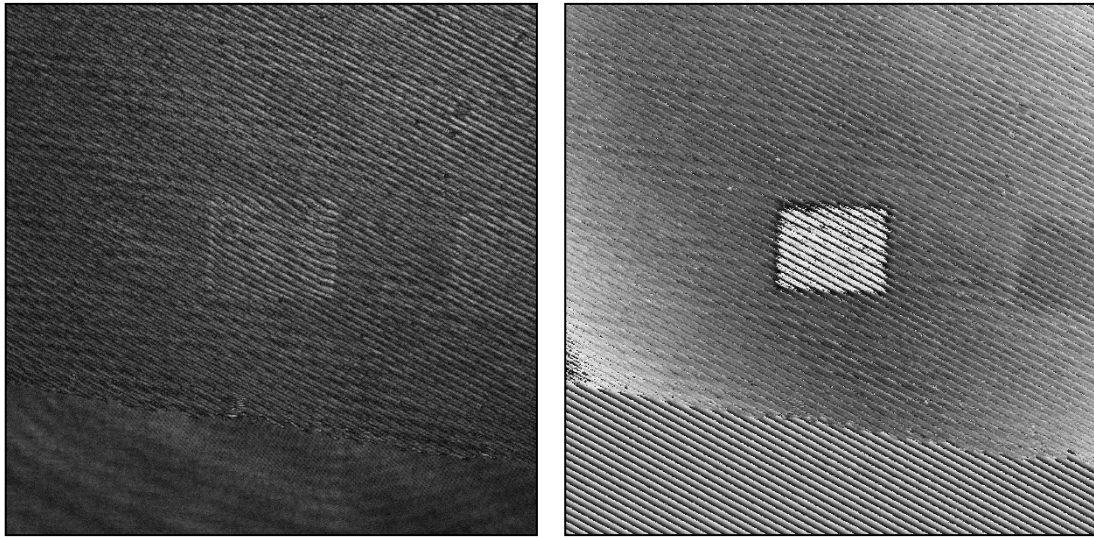
図4.35 振動環境下におけるデータセットごとの決定係数

表4.21 振動環境における相関関係

手法	相関係数	決定係数
\bar{S}	0.263	0.131
$\bar{\gamma}$	-0.401	0.161
\overline{SNR}	-0.495	0.245
R_{NCC}	-0.940	0.883
R_{ZNCC}	-0.825	0.701

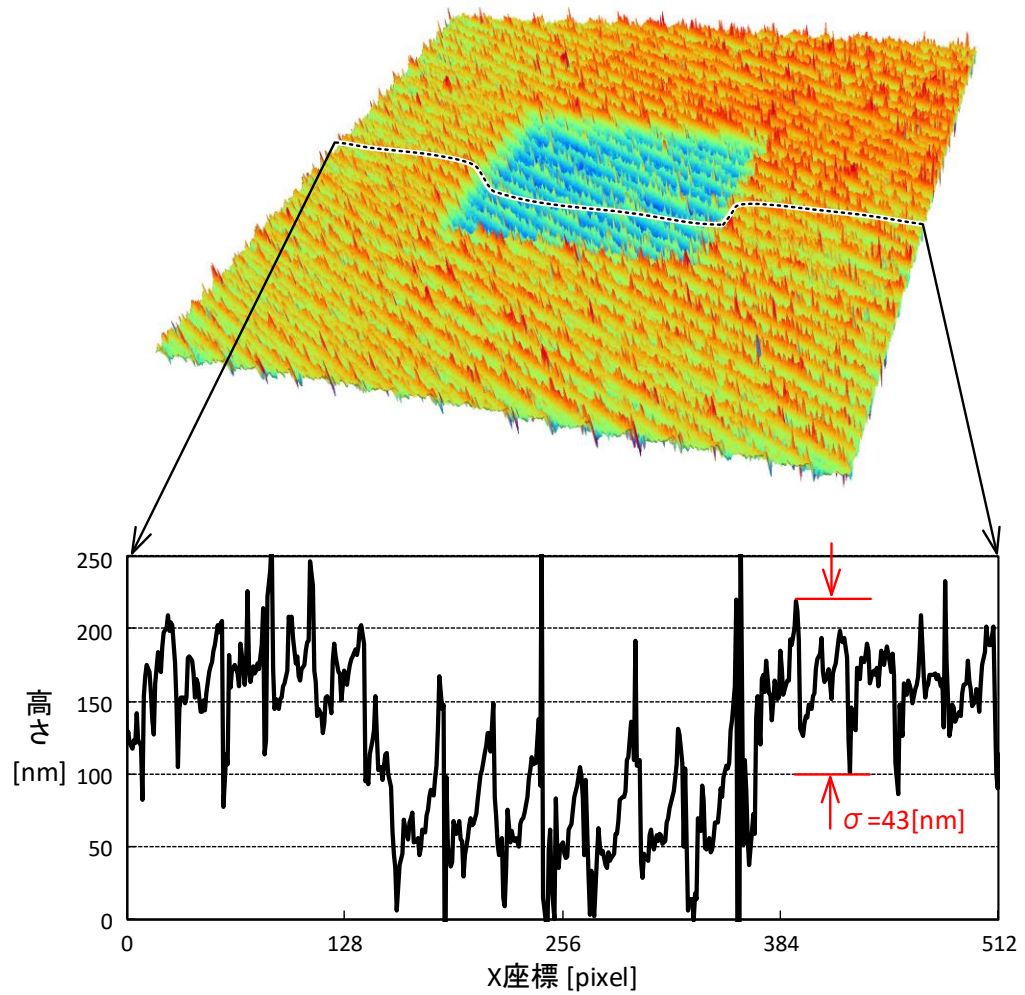
各手法の相関係数の結果より、振動環境下において計測したデータでは、いずれの従来手法で得られる信頼値にも表面粗さ（計測誤差）と線形な相関関係がないことがわかる。これに対して提案手法では、振動環境においても、相関係数-0.8以下かつ決定係数0.7以上と高い線形の相関関係があることを確認した。また、防振環境では R_{ZNCC} が最も線形に近い結果であるのに対して、振動環境では R_{NCC} が最も線形に近い相関関係であるという結果が得られた。

ここで振動環境においても、提案手法2 (R_{ZNCC})の信頼値が最も低いデータと最も高いデータのみを示して、実際の計測結果の形状を確認する。計測データの振幅画像、空間キャリア補正後の位相画像、形状とその断面図を図4.36、図4.37に信頼値 R_{ZNCC} を併記して示す。比較で示した形状の外観より、提案する信頼値を用いて、振動による明らかにリップル誤差の大きい計測結果と、誤差の小さい計測結果に区別できることがわかる。



(a) 振幅画像

(b) 位相画像（空間キャリア補正後）

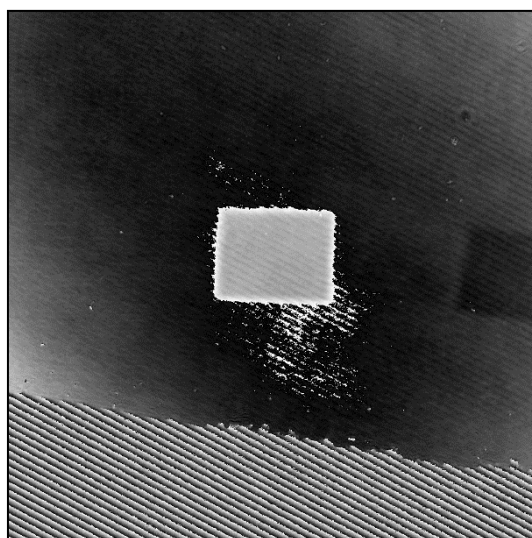


(c) 三次元形状と断面図

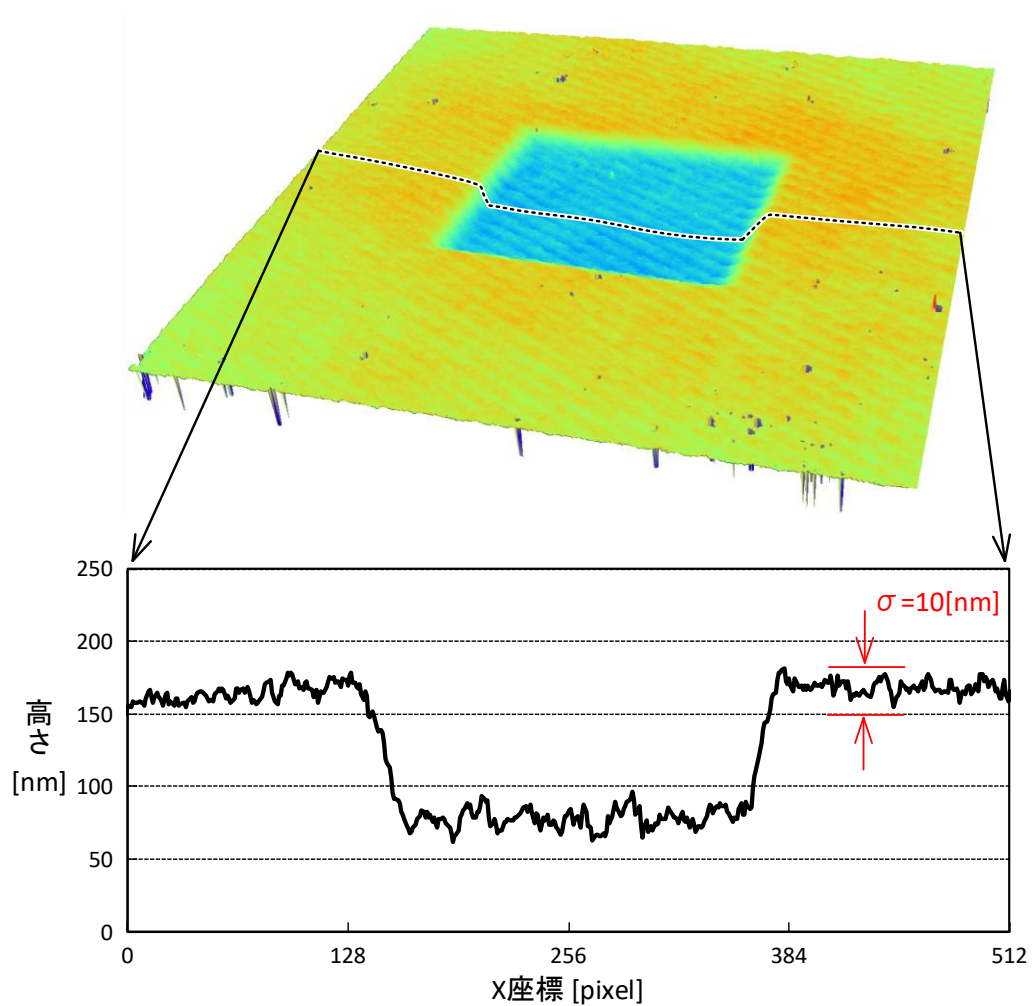
図4.36 信頼値の最も低い計測結果 ($R_{ZNCC} = 0.356$)



(a) 振幅画像



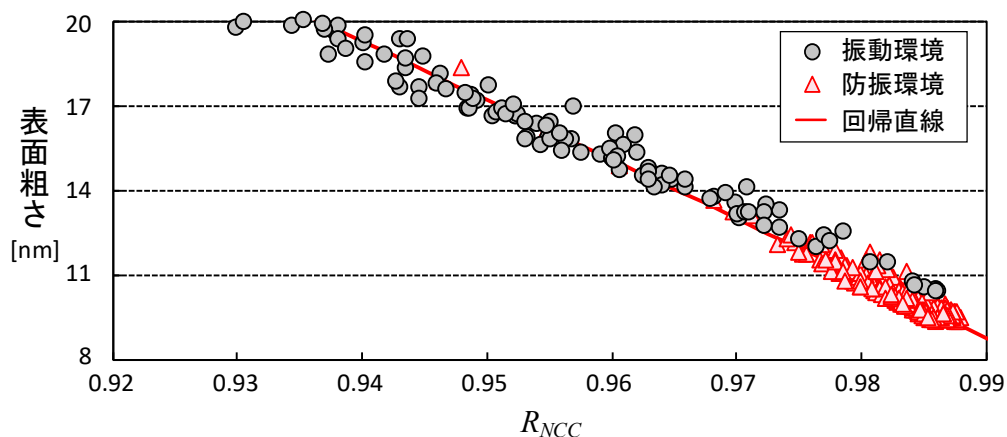
(b) 位相画像（空間キャリア補正後）



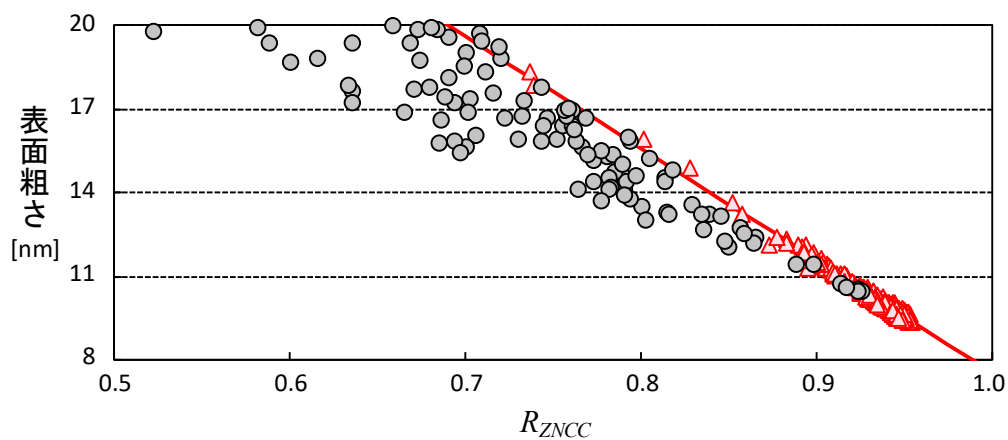
(c) 三次元形状と断面図

図4.37 信頼値の最も高い計測結果 ($R_{ZNCC} = 0.923$)

本評価実験では、提案手法を用いた場合でもNCCとZNCCによる2つの手法について合わせて比較した。以上の実験結果を踏まえて、この2つの手法のどちらの方が優位であるかについて考察する。提案手法のNCCとZNCCで得られた防振・振動環境の散布図を合わせた上で、表面粗さ20[nm]以下について拡大した図を図4.38に示す。



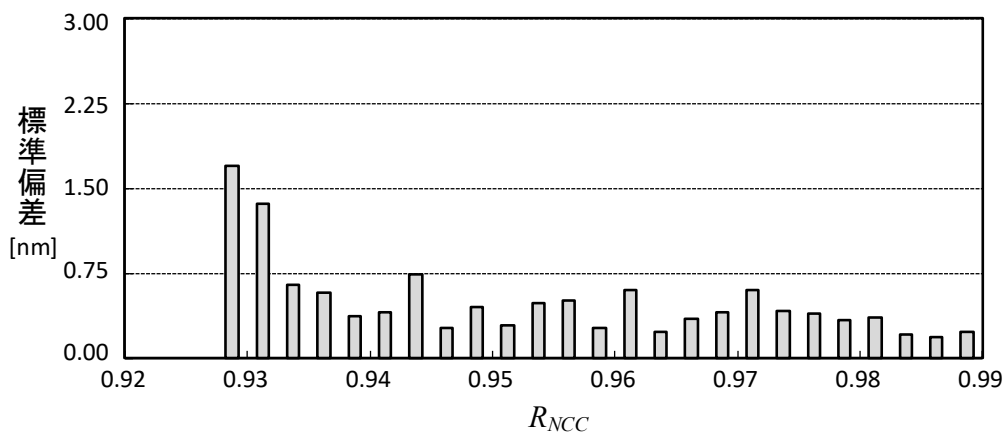
(a) R_{NCC} の分布



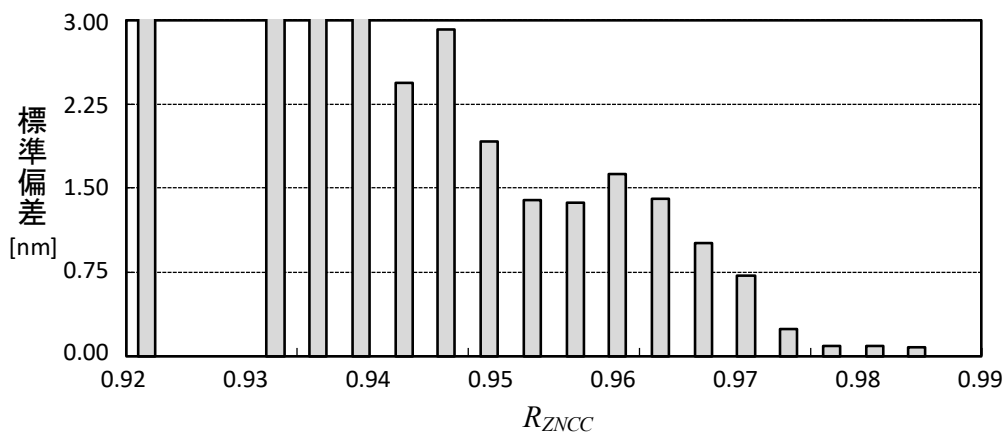
(b) R_{ZNCC} の分布

図4.38 防振・振動環境下の回帰直線（表面粗さ20[nm]以下）

さらに、防振環境で推定した回帰直線に対する区間ごとの標準偏差を図4.39に示す。



(a) R_{NCC} の分布



(b) R_{ZNCC} の分布

図4.39 回帰直線との標準偏差

標準偏差の算出に、NCCの場合は0.025、ZNCCの場合は0.025の区間ごとに回帰直線と表面粗さの差から求めた。標準偏差を比較した結果、表面粗さ20[nm]以下の計測誤差が小さい範囲において2つの手法に大きく差が見られたため、その端にのみ示した。ここで求めた回帰直線に対する標準偏差が小さいほど、計測誤差と信頼値がより線形な相関関係であり、高精度な信頼性評価手法であると言える。表面粗さ11[nm]以下の計測誤差が小さな計測結果では、ZNCCを用いた場合に精度が高い。一方、計測誤差が大きくなるにつれて、NCCを用いた信頼値の相関関係が高くなり優位になることがわかる。この結果より、要求精度が高い計測の場合にはZNCCを用いて評価する手法が適しており、それほど計測精度が要求されない場合にはNCCの方が優位な評価手法であると言える。

4.5.7 計算時間

各位信頼性評価手法の処理時間を比較した。従来手法1と3は、撮影画像の枚数分に比例した計算量であるため、撮影画像の枚数が計算時間に影響する。本実験では、位相シフト法に64枚の干渉縞画像を用いた場合の処理時間を評価した。そして提案手法は、従来手法と異なり物体光のみの画像を撮影する必要があるため、計算機の計算時間以外にも画像1枚分の撮影時間が存在する。そこで、画像1枚の撮影時間を含めた処理時間の比較を表4.22に示す。また、評価に使用した計算機の仕様を表4.23に示す。提案手法は、従来手法と異なり画像1枚を余分に撮影する必要があるが、計算はテンプレートマッチングと同一の処理であるため、計算時間は非常に高速である。そのため、撮影時間と計算時間を合わせた処理時間は、他の手法と比較した中でも高速であることがわかる。

表4.22 各手法の平均処理時間

手法	撮影時間[ms]	平均計算時間[ms]	平均処理時間[ms]
従来手法 1 (\bar{S})	-	308.3	308.3
従来手法 2 ($\bar{\gamma}$)		7.8	7.8
従来手法 3 (\overline{SNR})		47472.0	47472.0
提案手法 1 (R_{NCC})	56	2.9	58.9
提案手法 2 (R_{ZNCC})		3.8	59.8

表4.23 計算機の仕様

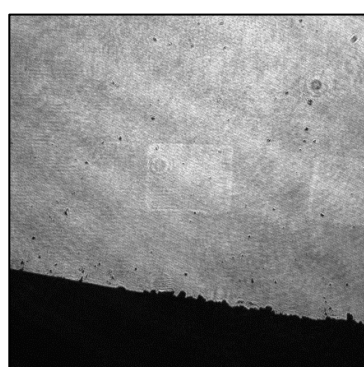
項目	詳細
CPU	Intel Core i7 3.30 [GHz]
RAM	16 [GB]

4.5.8 考察

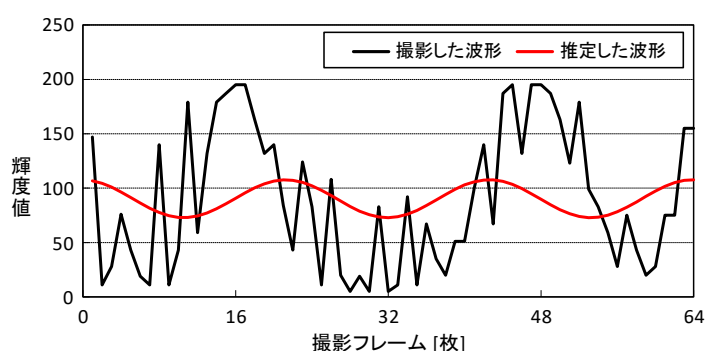
今回、従来手法は画素毎の指標であるにも関わらず画像単位 of 指標として扱うため、各画素の信頼値を画像全体で平均した値を比較対象として用いた。そこで、画素毎の信頼値に対応する計測データがどういう輝度変化であるかを示

して、従来手法の平均値を振動により発生する計測結果全体の誤差の指標とした結果について手法ごとに考察する。

まず、観測した波形と推定した波形との誤差を基にした従来手法1の信頼値 \bar{S} が表面粗さと相関がない要因を考察するため、表面粗さ σ と信頼値 S が逆転している例を図4.40、図4.41に示す。図4.40、図4.41に示した波形を見ると、3周期分の変調ではなく、2または2.5周期分の変調がされていることがわかる。これは防振台を用いた環境下の計測結果でも考察したように、計測環境の振動が位相変調に重ね合わさるためであると考えられる。図4.41の計測データでは、初期フレームから2周期分までは推定した波形との一致度が高い。しかし、図4.40の計測データでは推定した波形が全く一致していないにも関わらず、図4.41の信頼値 S の方が高く、形状の表面粗さが逆転するという結果が得られた。従来手法1の信頼性評価関数 S は、ある単一の周波数で変調されているという前提を基に誤差を算出するため、その変調信号を除去するとノイズしか残らないという評価関数である。そのため上記に示した例のように他の周波数に変調信号がシフトすることを考慮していない。その結果として、計測誤差に対して相関が低く、振動環境下の実験結果では明らかに無相関という結果が得られたと考えられる。この特性を考えると、3周期分の輝度変化で変調された計測データについては、信頼値 \bar{S} により計測誤差を判定できる可能性があるため、表面粗さに対して相関関係が高いと考えられる。従来手法1は、周波数のズレに対する微弱性により、Zygo社において用いられているQPSIアルゴリズムでは、位相誤差が $\pi/2$ 未満というスペックであると考えられる。

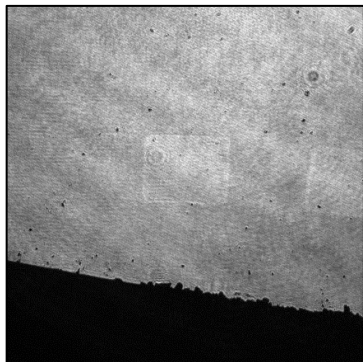


(a) 信頼値 S の分布

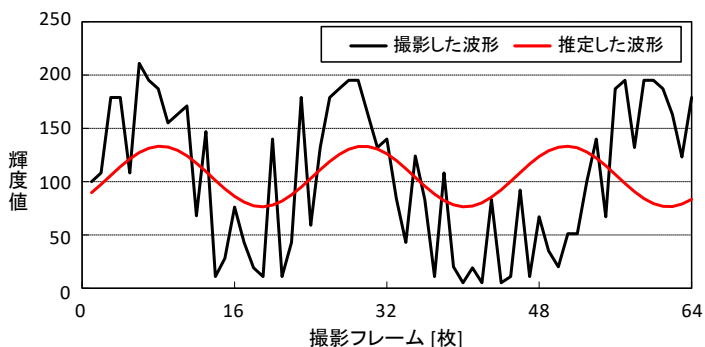


(b) 中心座標の輝度変化と推定結果 $S = 499.6$

図4.40 従来手法1 (\bar{S}) における画素毎の分布 $\sigma = 17.8$ [nm] (340 [frame])



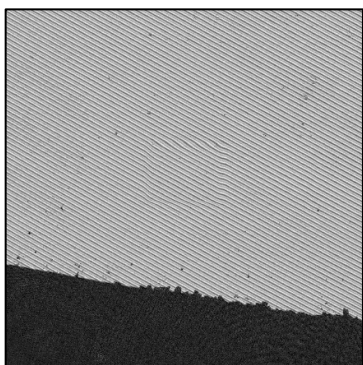
(a) 信頼値 S の分布



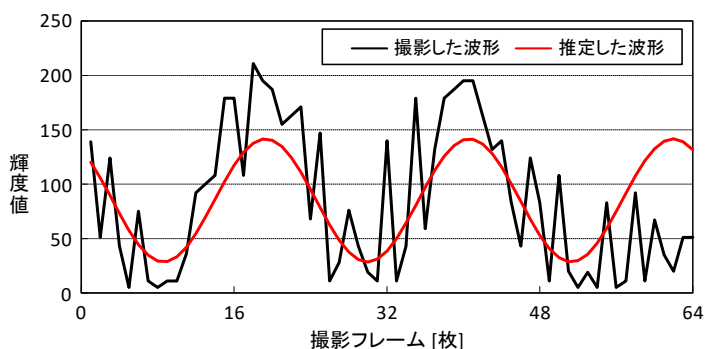
(b) 中心座標の輝度変化と推定結果 $S = 512.7$

図4.41 従来手法1 (\bar{S}) における画素毎の分布 $\sigma = 16.0[\text{nm}]$ (352 [frame])

次に、従来手法2の信頼値である変調 γ についても考察するために、表面粗さ σ が同等であり、かつ変調 γ が大きく異なる計測データを図4.42、図4.43に示す。図4.42、図4.43を比較すると、推定した波形の初期位相はおおよそ正しく観測した波形に一致していることがわかる。しかし、図4.42の計測データでは観測した波形と推定した波形の終端部分において約0.5周期分一致していないのに対して、図4.43の計測データでは約1周期分一致していないことが見て取れる。このように初期位相を同じくらいの精度で推定できている場合でも、全体の波形の一致度が異なるため、推定波形の振幅が低下して、信頼値 γ が異なると考えられる。

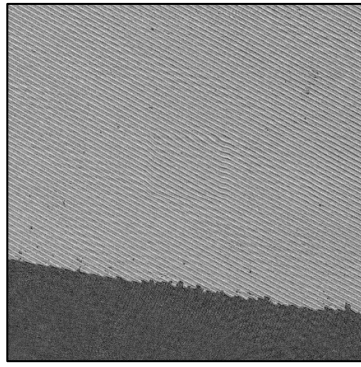


(a) 信頼値 γ の分布

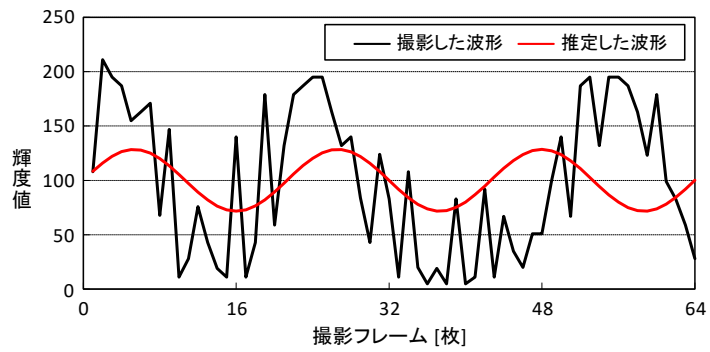


(b) 中心座標の輝度変化と推定結果 $\gamma = 0.642$

図4.42 従来手法2 ($\bar{\gamma}$) における画素毎の分布 $\sigma = 12.1 [\text{nm}]$ (340 [frame])



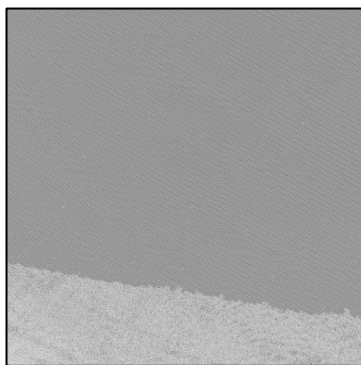
(a) 信頼値 γ の分布



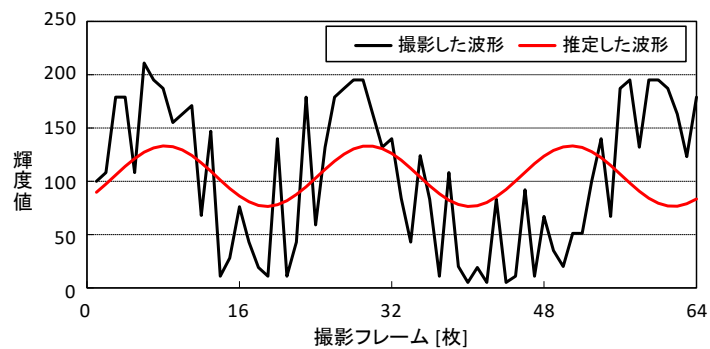
(b) 中心座標の輝度変化と推定結果 $\gamma = 0.281$

図4.43 従来手法2 ($\bar{\gamma}$) における画素毎の分布 $\sigma = 12.1[\text{nm}]$ (356 [frame])

続いて、従来手法3の信頼値 \overline{SNR} について考察するため、位相変調周波数の振幅が同等な例を図4.44、図4.45に示す。また、図4.44(b)、図4.45(b)に示した波形のパワースペクトルを図4.46に示す。この手法が提案された従来研究では、光干渉計を用いた装置ではなく、大きな光源であるプロジェクタを用いたパターン投影計測に適用された手法である。今回の防振台を用いた環境下では、位相変調周波数よりも低い周波数のパワーが大きく、位相変調が重ね合わさるノイズ成分が存在することがパワースペクトルから見て取れる。そのため、今回の実験条件のように高周波成分しか考慮していない場合には、正しく位相シフト波形を推定できていないにも関わらず信頼値が低いという結果が得られたと考えられる。これより今回の実験環境に対して信頼性を評価するためには、防振台固有の周波数とS/N比をとる形が理想であると考えられる。しかし高周波成分にノイズ成分が存在する振動環境下の実験においても有効性が確認できないように、どの周波数帯に振動の周波数が存在するかが未知の環境下では有効でなく、汎用的に適用可能な手法で無いと考えられる。

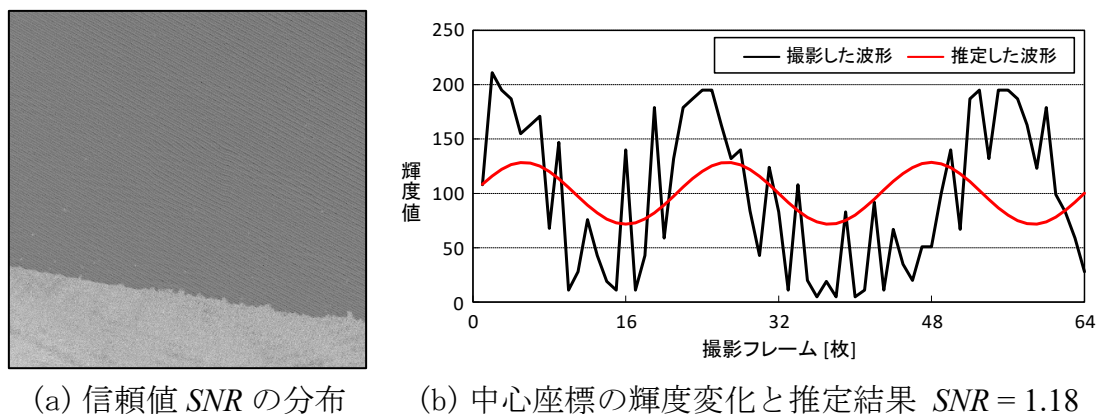


(a) 信頼値 SNR の分布



(b) 中心座標の輝度変化と推定結果 $SNR = 1.27$

図4.44 従来手法3 (\overline{SNR}) における画素毎の分布 $\sigma = 17.8 [\text{nm}]$ (352 [frame])



(a) 信頼値 SNR の分布 (b) 中心座標の輝度変化と推定結果 $SNR = 1.18$

図4.45 従来手法3 (\overline{SNR}) における画素毎の分布 $\sigma = 16.0[\text{nm}]$ (364 [frame])

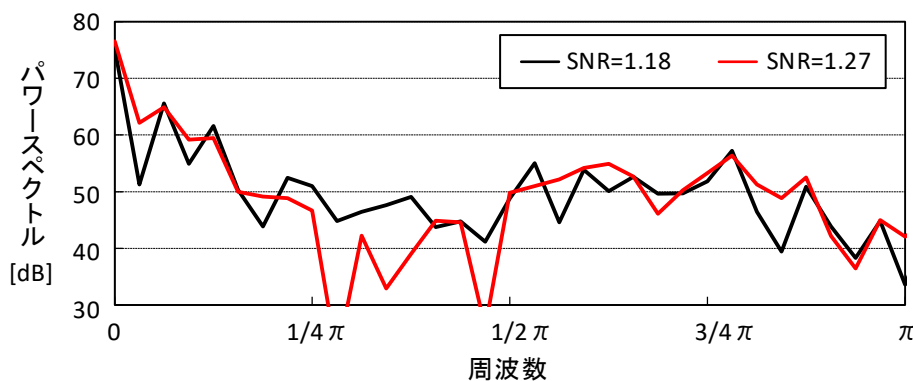


図4.46 図4.44(b), 図4.45(b)のパワースペクトルの比較

従来手法と提案手法により得られる信頼値の違いについて考察する．従来手法は，観測した波形から位相シフト法により位相変調の波形を推定して，その観測した波形を基に画素単位で信頼値を算出する．そのため信頼値は時間軸の尺度であり，観測した波形以外の情報は用いていない手法であることがわかる．これに対して，提案手法は振幅画像と非干渉状態の画像との相関値を信頼値として用いる．振幅画像は，画素毎に位相シフト法を用いることで算出されるため，時間軸の尺度である．これに対して非干渉状態の画像との比較は，2次元の撮影画像であるため，空間軸での尺度であるといえる．これら2つの尺度から相関を基に得るため時空間軸に統合した尺度であり，非干渉状態の画像は同一物体のテクスチャ情報を表しており，普遍のものである．そのため提案する尺度は，非干渉状態の画像を既知の情報として，位相シフト法で推定した波面全体をフィッティングした結果の類似度であると捉えられる．この既知の情報を用

いていることと、時空間軸の尺度であることの2つの理由により提案手法は、従来手法と比較してより良く位相の計測精度を評価できたと考えられる。

今回の評価実験では、平面物体に対する表面粗さのみに対して信頼値との相関関係を調べた。しかし、平面物体以外の形状を持つ物体に対する提案手法の有効性の検証をしていない。今後、他の形状を持つ物体に対しても計測誤差に相当する指標を定めた評価実験を経て、提案手法の信頼値が表す意味について深く考察する必要がある。また、これらの位相信頼性評価手法は、今回のような干渉計を用いたナノオーダの計測だけでなく、広く位相シフト法を使う場面の計測に応じて適用できる。しかし、プロジェクタなどを用いたミクロンオーダの計測に関しては、振動による計測装置・物体のずれがあまりないため、画素毎に信頼性の低い点を除去する従来手法の方が有効であると考えられ、位相シフト法の場面に応じた検証を行う必要がある。

4.6 提案手法に基づく振動補正の検討

本節では、振動環境における安定計測の実現に向けて、提案する信頼性評価関数を用いた振動の補正方法および検討結果について述べる。

4.6.1 補正方法

補正方法を説明するにあたり、位相シフト法において振動が加えられたときの光強度について干渉光の物理モデル（式(2.8)）を基に考える。 k フレーム目において振動の影響により発生する参照位相のズレを ε_k 、既知の情報として与える参照位相 δ_k とすると、実際に与えられる参照位相は $\delta_k + \varepsilon_k$ となる。このときに観測される光強度について、2.4節と同じ記号を用いて表現すると、式(4.6)のように表せる。

$$\begin{aligned} I_k(x) &= b(x) + a(x) \cos(\phi(x) + \delta_k + \varepsilon_k) \\ &= p_0(x) + p_1(x) \cos(\delta_k + \varepsilon_k) + p_2(x) \sin(\delta_k + \varepsilon_k) \end{aligned} \quad (4.6)$$

このときに通常の位相シフト法では参照位相 δ_k を既知の情報として与えるため、補正においては誤差 $\varepsilon_k = 0$ を初期値とする補正パラメータとして考える。参照位相のズレ ε_k を補正することで真の参照位相に近づけ、振動の影響を補正する。そのため、目的関数として提案手法の信頼値 R_{NCC} , R_{ZNCC} を定め、これらを最大化することで振動の補正する。本検討では、パラメータ ε_k を基に最急上昇法を用いて、目的関数を最大化する。信頼値 R_{NCC} , R_{ZNCC} では、 R_{NCC} の方が振動環境で有効性が高く、 R_{ZNCC} と比べて微分計算が少ない。そのため、式(4.7)に示す R_{NCC} より更新式を導出する。

$$R_{NCC} = \frac{\mathbf{b} \cdot \mathbf{a}}{|\mathbf{b}| |\mathbf{a}|} = \frac{\sum_{x=0}^{X-1} b(x)a(x)}{\sqrt{\left[\sum_{x=0}^{X-1} b(x)^2 \right] \left[\sum_{x=0}^{X-1} a(x)^2 \right]}} \quad (4.7)$$

$\psi_k = \delta_k + \varepsilon_k$ において R_{NCC} を偏微分すると、連鎖律を用いて式(4.8)～(4.14)のように表せる。

$$\frac{\partial R_{NCC}}{\partial \psi_k} = \frac{1}{|\mathbf{b}|} \frac{(\mathbf{b} \cdot \mathbf{a}) \frac{\partial |\mathbf{a}|}{\partial \psi_k} - \frac{\partial (\mathbf{b} \cdot \mathbf{a})}{\partial \psi_k} |\mathbf{a}|}{|\mathbf{a}|^2} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial |\mathbf{a}|}{\partial \psi_k} &= \frac{\partial}{\partial \psi_k} \sqrt{\sum_{x=0}^{X-1} a(x)^2} \\ &= \frac{1}{2} \left(\sum_{x=0}^{X-1} a(x)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\sum_{x=0}^{X-1} 2a(x) \frac{\partial a(x)}{\partial \psi_k} \right) \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial (\mathbf{b} \cdot \mathbf{a})}{\partial \psi_k} = \sum_{x=0}^{X-1} b(x) \frac{\partial a(x)}{\partial \psi_k} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial a(x)}{\partial \psi_k} &= \frac{\partial}{\partial \psi_k} \sqrt{p_1^2(x) + p_2^2(x)} \\ &= \frac{1}{2} (p_1^2(x) + p_2^2(x))^{-\frac{1}{2}} \left(2p_1(x) \frac{\partial p_1(x)}{\partial \psi_k} + 2p_2(x) \frac{\partial p_2(x)}{\partial \psi_k} \right) \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \psi_k} \begin{pmatrix} p_0(x, y) \\ p_1(x, y) \\ p_2(x, y) \end{pmatrix} &= \frac{\partial}{\partial \psi_k} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \\ &= -\mathbf{A}^{-1} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \psi_k} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{A}^{-1} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \psi_k} \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \psi_k} = \begin{pmatrix} 0 & -\sin(\psi_k) & \cos(\psi_k) \\ -\sin(\psi_k) & -2\sin(2\psi_k) & \cos(2\psi_k) \\ \cos(\psi_k) & \cos(2\psi_k) & 2\sin(2\psi_k) \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \psi_k} = \begin{pmatrix} 0 \\ -I_k(x, y) \sin(\psi_k) \\ I_k(x, y) \cos(\psi_k) \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

上記の式を基に，学習率 α として式(4.15)のようにパラメータ ψ_k を最急上昇法で更新し， R_{NCC} を最大化する．以降では，“ $:=$ ”は左辺への代入を表す．

$$\psi_k := \psi_k + \alpha \frac{\partial R_{NCC}}{\partial \psi_k} \quad (4.15)$$

4.6.2 評価実験

評価実験には，4.5.6項で述べた振動環境下における実験と同一の計測データを用いる．前項で述べた補正方法を適用するにあたり，パラメータとして学習率 $\alpha = 0.9$ とし，全イテレーションで一定とした．さらに，この目的関数では画像全体で相関を求めるため，画素ごとに勾配を求める必要がある．そのため全画素(1,024×1,024[pixel])に対してイテレーションごとに行う勾配の計算量が，膨大である．そこで，勾配の演算を近似的に，画像全体の1[%]をランダムサンプリングした画素のみで勾配を求めることにより，演算量を削減する．以上の条件で，イテレーション回数を100回として，補正による表面粗さの変化により評価した．補正適用前後の表面粗さの分布を図4.47に示す．

図4.47に示す分布では，赤点線より左上にあるサンプルは補正により表面粗さが減少している，つまり補正により位相推定の結果が改善したことを表す．反対に右下にあれば，補正により悪化したことを表す．全てのサンプルに対して補正を適用した結果，表面粗さが10[nm]程度まで低減できており，補正が有効に働くことを確認できる．この表面粗さ10[nm]は，4.5.4項において計測装置の精度を示したものに近く，上限に近い精度であることを意味する．

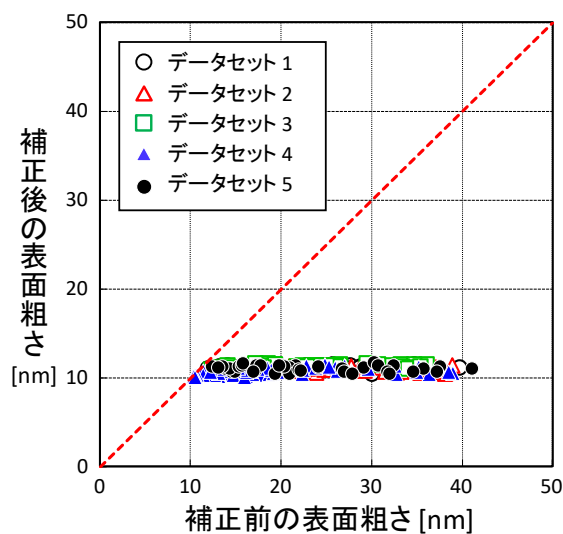
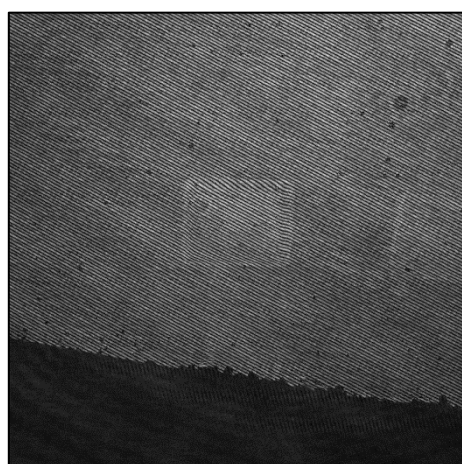
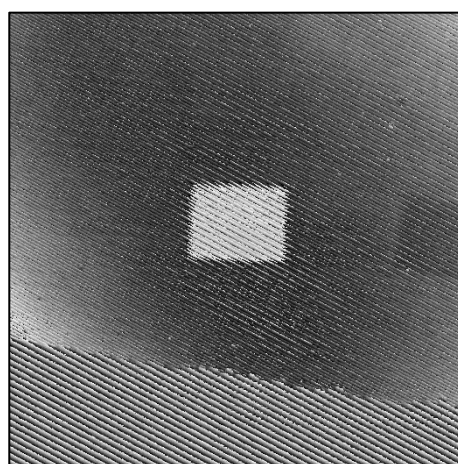


図4. 47 補正適用前後の表面粗さの分布

振動の影響により計測精度が悪化したデータの中で、信頼値 R_{NCC} が最も小さいサンプル（図4. 48）に適用した処理結果として、イテレーションごとにおける振幅と空間キャリア補正後の位相を図4. 49に示す．さらに、イテレーションごとの形状の断面の変化についても図4. 50に示す．結果として、初期値では振幅・位相画像ともに周期的なリップル誤差が多く含まれているのに対して、イテレーションを経るにつれて少なくなっていくことを確認できる．形状の断面を見ても、初期値では周期的なノイズ成分が大きく、段差80[nm]の部分でノイズに埋もれている．これに対して100イテレーションでは、ノイズは小さくなり段差のS/N比が向上したことがわかる．

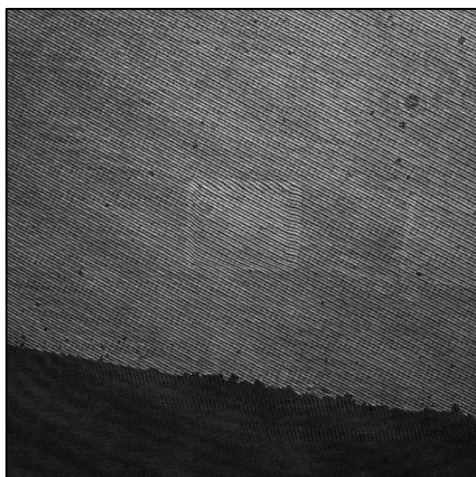


(a) 振幅

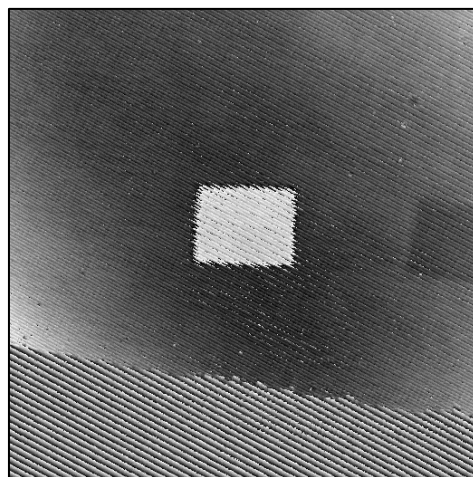


(b) 位相

図 4. 48 信頼値 R_{NCC} が最も低い計測結果（初期値解）

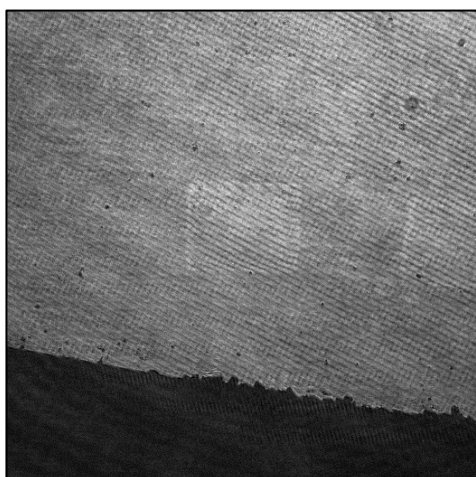


(a-1) 振幅

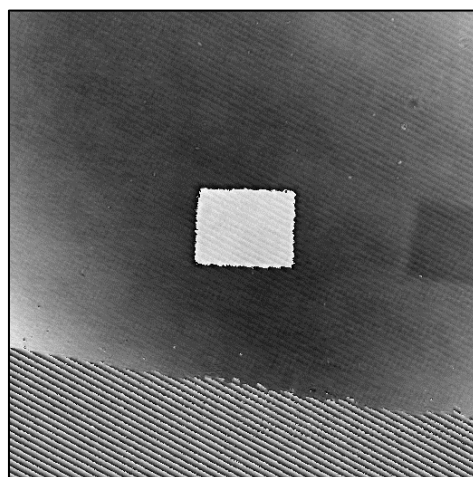


(a-2) 位相

(a) イテレーション : 10

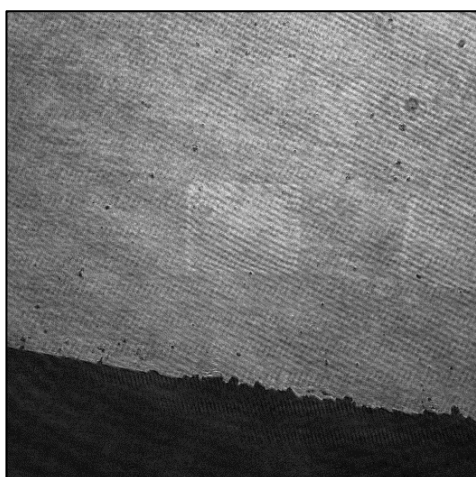


(b-1) 振幅

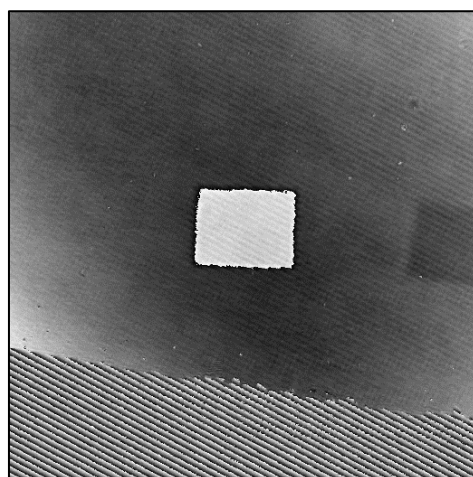


(b-2) 位相

(b) イテレーション : 50



(c-1) 振幅



(c-2) 位相

(c) イテレーション : 100

図 4.49 補正の適用による振幅・位相の変化

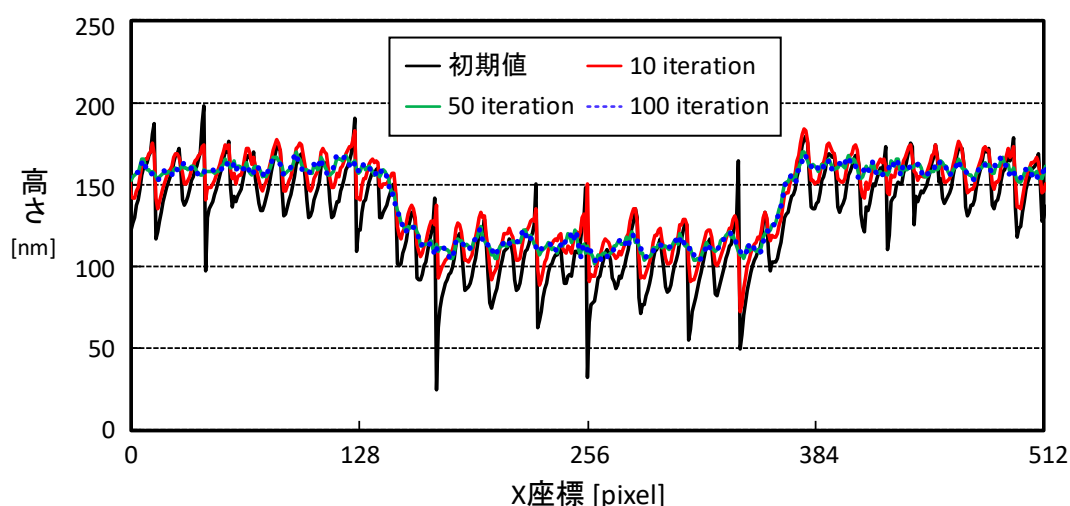


図4.50 イテレーションごとの形状の断面

また、100イテレーションのときにおける参照位相 ψ_k ，補正量 ε_k を図4.51に示す．計測時には線形に位相変調したため，初期値では直線となるのに対して，補正を加えることにより直線状の位相を $-0.5 \sim 0.5$ [rad]の範囲内で補正したことがわかる．さらに，イテレーションごとの信頼値と表面粗さの変化を図4.52に示す．結果より，補正を適用することで，信頼値 R_{NCC} は単調増加，表面粗さが単調減少することを確認した．4.5節の実験において示したように，信頼値 R_{NCC} と表面粗さは線形に近い相関関係にあるため，どちらも同じ変化率で更新されていることを確認できる．

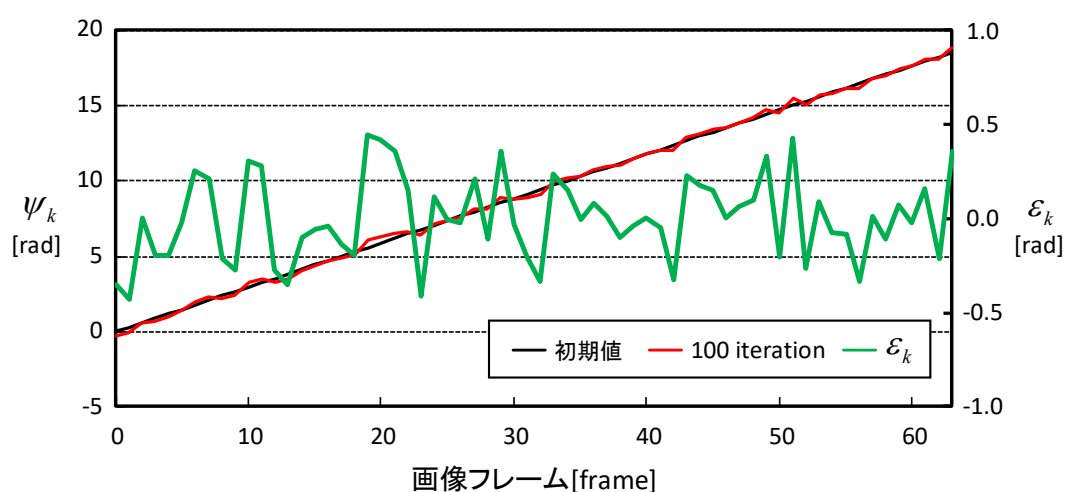


図4.51 補正による参照位相 ψ_k ， ε_k の変化

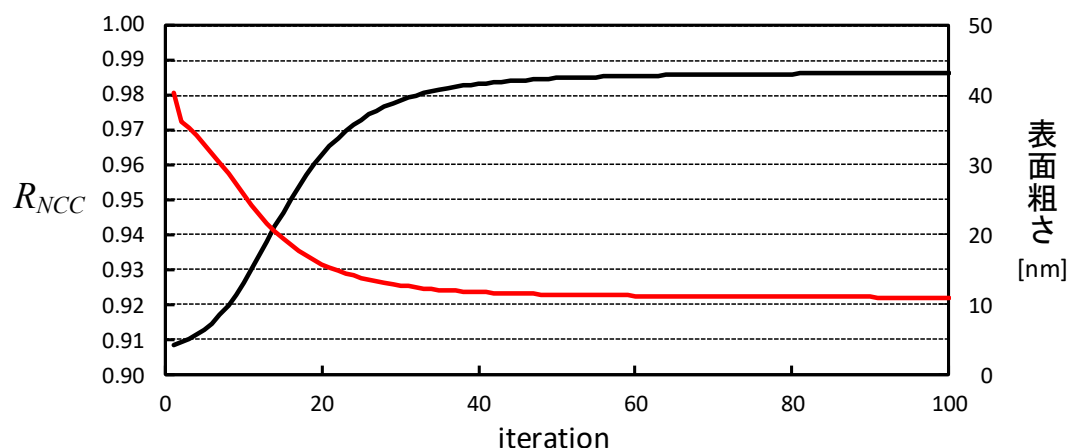


図4.52 補正による R_{NCC} の変化

以上の結果より，提案手法の信頼値を基に振動による計測誤差を補正できることを示した．収束した場合には，どの計測結果についても計測精度の上限に近い表面粗さ10[nm]程度まで計測誤差を低減できる．

4.6.3 計算時間

補正手法では画素ごとに勾配を求める必要があるため，実験ではランダムサンプリングした1[%]を勾配計算に用いた．ランダムサンプリングの割合を変化させたときの補正（1イテレーション分）に要する平均処理時間を表4.24，使用した計算機の仕様を表4.25に示す．

結果より，サンプリング1[%]で100イテレーションするためには，およそ87[sec]の計算時間を要することを確認した．導出式から画素数に対して勾配の和をとるように，画素数に比例して計算時間が増えていくことを結果からも確認した．この結果は，撮影から三次元形状への復元までを含めた計測時間に対して，補正処理に非常に長い時間を要することを示している．位相シフト法は，線形な行列演算であるため，解析は短時間で済む．そのため，補正に要する時間は大きな欠点であると言える．

表4.24 1イテレーションに要する平均処理時間

サンプリングの割合[%]	平均処理時間[ms]
1	870.5
10	8469.2
100	81813.8

表4.25 計算機の仕様

項目	詳細
CPU	Intel Core i7 4.00 [GHz]
RAM	32 [GB]

4.6.4 考察

提案手法を用いた補正方法では、画素ごとに勾配を求める必要があるため、1イテレーションの演算にも膨大な時間を要する。さらに、パラメータ（参照位相）の更新に最急上昇法を用いたため、収束するまでのイテレーション回数が多という欠点も存在する。勾配ベースで高速に収束する更新方法には、2次の収束を持つニュートン法などがあり、これらは少ないイテレーション回数で収束する可能性がある。しかし目的関数が相関関数であるため、ヘッセ行列などの計算で2次微分の計算をする場合には膨大な時間を要し、収束までの合計計算時間としては差が出ないことが容易に考えられる。また収束性についても、目的関数が凸関数でないことから不確かである。他の手段として、近年Deep Neural Networkでは学習率の更新方法を工夫することで収束を早める、RMSPropやAdamなどの手法がしばしば用いられる。これらを使用したときに、収束に必要なイテレーション回数を減らし、計算時間を短縮できる可能性がある。

今回用いたサンプルでは、勾配計算を近似的に1[%]の画素のみランダムにサンプリングすることで計算を高速化した。結果としては、1[%]のサンプリングでも補正の効果を十分に得られることを確認した。多種多様なサンプルや条件下においてロバスト性を検証する必要があるが、今回の結果で全てのサンプルについて計測誤差を低減できており、単純なサンプリングで計算量のある程度削減しても問題ないと考えられる。

また本実験では、位相シフト法に用いる画像枚数を64枚としたが、使用枚数を減らすほど更新する参照位相のパラメータを減らせるため、高速化を見込める。しかしこれについては、1つの計測結果の補正に要する時間と、複数回計測して誤差が少ない計測結果の採用に要する時間のどちらが早いかにについて、考える必要がある。これは計測環境に依存するが、多くの場合は後者の方が有効であると考えられる。そのため、誤差の少ない計測結果を選択した上で、許容できる誤差まで信頼値を基に補正することが、最も実用的な活用方法であると考えられる。これは提案手法の信頼値が、表面粗さという誤差に直接関連する指標であることが、大きな利点として働く。

続いて、関連する補正手法との立ち位置について整理する。本検討では、平均光強度 b を別で撮影するため、既知になることを条件としていた。QPSIなどの他の補正方法では、これも未知の条件で補正を行うため、比較する際には考慮する必要がある。しかし、この平均光強度 b については、振動環境下では、撮影フレーム中の最大・最小輝度値の差を採用する手法がいくつか存在する^[95]。そのため、平均光強度 b が未知の環境においても、ある程度補正する効果はあると考えられる。

また本研究では、室内の静止した環境を対象に実験・評価を実施した。しかし、実際の生産現場などの検査工程に利用する場合には、XY方向の振動を無視できない状況も考えられる。さらに本計測システムではテレセントリックレンズを用いたため、XY方向の空間分解能は $3.1[\mu\text{m}/\text{pixel}]$ とそれほど高くない。これに対して、対物レンズなどを用いた場合には200倍程度までXY方向の分解能を向上できるため、XY方向の振動が大きく影響する可能性がある。現状ではXY方向の振動に対して決定的に対応できる手法は存在せず、今後XY方向に対応可能な補正する手法へ発展していくことが望まれる。

4.7 むすび

本章では、位相シフト干渉法において、静止物体を前提とすることに起因する計測精度の低下に関する問題について、その計測精度を評価する手法を提案した。具体的には、位相シフト干渉計測により算出される振幅画像と物体光の撮影画像との相関値を位相の信頼性を評価する尺度として用いることで、画像

単位で計測データ全体の信頼性を評価する手法である。本手法は画素ごとに信頼性を評価する従来手法と比較して、計測誤差に対して相関の高い評価値を得られる。そのため、提案手法により得られる評価値を基に、振動による計測誤差の少ない計測結果を選択可能であることを示した。

位相シフト法における計測誤差の発生要因について考察を行い、計測された位相値の信頼性を評価する従来研究について述べるとともに、画像単位で位相値の信頼性を評価する手法を提案した。計測装置についても、提案手法を容易に実現可能な光学系を設計・構築した。

評価実験では、ナノオーダの精度を持つ段差基準器を用いて本研究の計測システムの精度評価および従来手法と提案手法を比較した。計測装置としての計測精度評価では、フーリエ変換位相シフト法において撮影枚数が計測精度に大きく依存するため、使用する撮影枚数を変動させて評価した。2048枚撮影したときの計測結果を基にして、32枚～1024枚まで2倍ずつ撮影枚数を変動して、基準器の断面の平均距離と標準偏差より計測精度を検証した。100回分の計測結果から分布を比較した結果、本研究の実験環境では256枚程度で安定して計測が可能であり、システムの計測精度は1024枚の撮影画像を用いたとき平均距離5.8[nm]、標準偏差7.1[nm]であることを確認した。そして、位相信頼性評価手法について、従来の画素毎に信頼性を評価する手法と画像単位で評価する提案手法との比較実験を防振台の有無も交えて非振動・振動環境下で実験を実施した。実験結果より、従来手法を平均した信頼値と比較して提案手法の有効性が示された。提案手法の信頼値は、計測誤差に対して一定の計測誤差以下ではおおよそ線形な相関関係であることを確認した。また、従来手法と提案手法の処理時間を比較した。提案手法は、従来手法と比較して画像1枚分の撮影時間を要するが、計算コストが低いことを示した。

本研究では、位相シフト干渉法を用いた計測の信頼性を評価する手法を提案した。提案した評価値は、精密工業製品の検査工程において有用性の高い尺度に成り得ると考えられる。

第5章 ランダム位相シフトにおける 二波長ロバスト計測

本章では，光干渉計測において振動が存在し，参照位相がランダムに変化する環境に対しても計測可能な手法について述べる．そして，リサーチ曲線を用いた従来手法について整理し，二波長計測における不安定性を議論する．さらに，実環境で二波長計測を行う場合にも適用可能なロバスト計測法を提案し，その有効性を示す．

5.1 まえがき

前章においても述べたように，QPSIのような振動環境における計測にも対応した位相シフト干渉計が実用化されている^[22]．この手法に関連する研究は，振動のように参照位相がランダムな環境（以降，ランダム位相）においても位相シフト計測を実現するため，1990年頃から徐々に発展が進んできた．これらの研究の中で，干渉縞の撮影画像枚数が少ない場合においても精度良く位相推定が可能な手法として，誤差最小化に基づいた手法をWangらが2000年頃に提案した．この手法は，Advanced Iterative Algorithm（AIA）と呼ばれるイテレーションにより誤差を最小化する手法である^[82]．このイテレーションにより誤差を最小化する手法の発展として，2014年にはQPSIアルゴリズムが提案された．しかし，これらの手法は参照位相の初期値を設定する必要があり，初期値への依存性が高い．さらに，イテレーションにより誤差を最小化するものの，アルゴリズムの収束性については保証されていないことが大きな問題としてある．

一方，これらの手法に対して，近年リサーチ曲線の特性をを用いた計測手法がいくつか提案されている^{[20][23][96]}．これらの手法は，イテレーションにより誤差を最小化する手法とは異なり，参照位相の初期値を設定する必要がなく，参照位相が未知でも位相を推定することができる．さらに，イテレーションの必要がなく，解の収束性も保証されている．本研究では，リサーチ曲線の手法を用いた関連手法の中で二波長計測を実現したものに関して，計測の不安定性について議論する．そして，計測が不安定となる原因のノイズを除去することで，ロバストに計測可能な手法を提案する．

5.2 従来研究

本節では，ランダム位相シフト環境における計測手法として，代表的な従来研究について述べる．

5.2.1 PCA による部分空間法を用いた一波長計測手法

WangらがAIAによる計測手法^[82]を提案して以降，ランダム位相環境における計測にはイテレーションにより誤差を最小化する手法が徐々に発展してきた^[22]．しかし，これらの手法には理論的に収束性の保証がなく，初期値への依存性が高いという問題がある．これに対して，VargasらによりPCAを用いた新しい計測手法が提案された^[23]．この手法は，画素間のリサージュ曲線に基づいて計測を行う．全ての画素において参照位相が未知量シフトする，つまり光線に対して垂直方向にのみ位相がシフトすると仮定すると，画素間の位相差は常に同じになる．これは，ある画素 x_1, x_2 について任意の時刻 t で位相差 $\theta(x_1, x_2)$ が定数であるとして，式(5.1)で表現できる．ここで， λ は波長を表す．この仮定の上には，波長 λ の光の位相を走査すると任意の画素間の光強度が図5.1に示すような楕円曲線を描くことが成り立つ．ただし，位相差 θ が 0 または π である場合には線分となり，位相差 θ が $\pi/2$ である場合は真円となる．

$$\begin{aligned} I(x_1, t) &= b(x_1) + a(x_1) \cos\left(\phi(x_1) + 2\pi \frac{1}{\lambda} t\right) \\ I(x_2, t) &= b(x_2) + a(x_2) \cos\left(\phi(x_2) + 2\pi \frac{1}{\lambda} t\right) \\ &= b(x_2) + a(x_2) \cos\left(\phi(x_1) + 2\pi \frac{1}{\lambda} t + \theta(x_1, x_2)\right) \end{aligned} \quad (5.1)$$

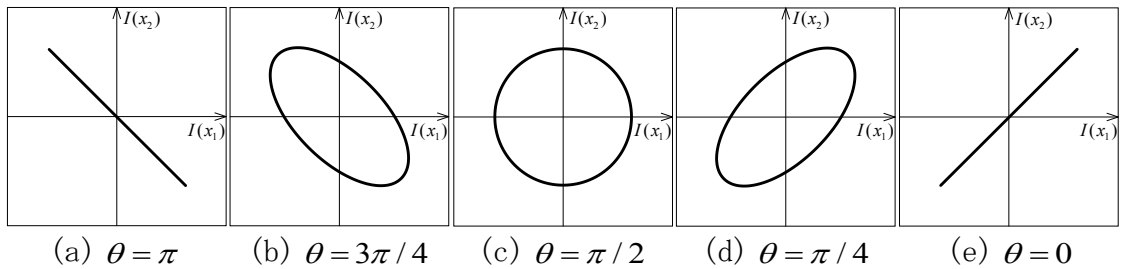


図5.1 一波長において画素間の光強度が描くリサージュ曲線

この光強度変化について、全ての計測点で1つの多様体として捉えると、たった2次元の楕円で多様体を表現できることが言える．そのため、図5.2に示すようにPCAに従ったステップで位相を求められる．図5.2は画素数の次元があるが、便宜上3次元の図で説明する．まず、データの中心化を行い、楕円曲線の部分空間を求める．そして、部分空間の第1,2主成分 d_1, d_2 で楕円曲線を求めて直交化し、計測点ごとに逆正接を計算して位相を求められる．

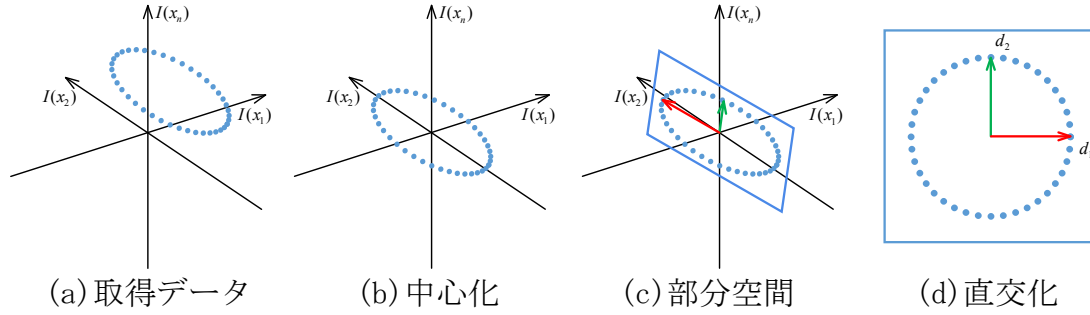


図5.2 PCAによる部分空間法

また画素数の軸ではなく、転置した時間軸では極座標系として扱うことができる．これは、ある画素 t_1, t_2 について任意の画素 x で位相差が $\theta(t_1, t_2)$ であるとみなすことに当たる．この場合にPCAで求める第1,2主成分の固有ベクトルは、各時刻 t における参照位相の正接・余弦のベクトルとなる．

ここで時間軸の場合について、具体的な計算方法を説明する．以降では、式(2.8)の線形方程式を式(5.2), (5.3)のように行列・ベクトル表記する． M は撮影枚数、 $\mathbf{1}$ は長さ M の全ての要素が1の列ベクトルを表す．

$$\begin{cases} \mathbf{i}(x) = [I_0(x), I_1(x), \dots, I_M(x)]^T \\ \mathbf{c} = [\cos(\delta_0), \cos(\delta_1), \dots, \cos(\delta_M)]^T \\ \mathbf{s} = [\sin(\delta_0), \sin(\delta_1), \dots, \sin(\delta_M)]^T \end{cases} \quad (5.2)$$

$$\mathbf{i}(x) = p_0(x)\mathbf{1} + p_1(x)\mathbf{c} + p_2(x)\mathbf{s} \quad (5.3)$$

PCAを適用する前に、ベクトル \mathbf{i} の平均値 \bar{I} を引いて中心化を行い、式(5.4)のようにデータ行列 \mathbf{D} に変形する．これは、定数項 p_0 を除く操作にあたる．

$$\mathbf{D} = [\mathbf{i}(0) - \bar{I}(0)\mathbf{1}, \mathbf{i}(1) - \bar{I}(1)\mathbf{1}, \dots, \mathbf{i}(M) - \bar{I}(M)\mathbf{1}]^T \quad (5.4)$$

データ行列 \mathbf{D} に対してSVDを適用することで，特異値行列 $\mathbf{\Sigma}$ ，左特異ベクトル \mathbf{U} ，右特異ベクトル \mathbf{V} を求める（式(5.5)）．

$$\mathbf{D} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (5.5)$$

これにより得られる行列 \mathbf{V} が位相を求める成分に相当する．ここで，SVDによる部分空間への射影を式(5.6)で表現する． \mathbf{P} は射影行列を表し， $\tilde{\mathbf{U}}$ は $M \times 2$ 行列の左特異ベクトル，特異値の大きい上位2次元に対応するベクトルを表す． $\tilde{\mathbf{\Sigma}}$ は 2×2 の対角行列であり，特異値の上位2次元の要素を持つ．射影行列 \mathbf{P} をデータ行列 \mathbf{D} に乗算して，2次元の部分空間へ射影した成分 $\tilde{\mathbf{V}}$ を得る．

$$\mathbf{PD} = \tilde{\mathbf{\Sigma}}^{-1}\tilde{\mathbf{U}}^T\mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T = \tilde{\mathbf{V}}^T \quad (5.6)$$

位相を求めるには， $\tilde{\mathbf{V}}$ の各2次元の要素について逆正接関数を用いればよい．また，射影行列 \mathbf{P} を求めるには，行列 $\mathbf{U}, \mathbf{\Sigma}$ が求まれば良いため，固有値分解でも解けることがわかる．

$$\mathbf{DD}^T = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T\mathbf{V}\mathbf{\Sigma}\mathbf{U}^T = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}^2\mathbf{U}^T \quad (5.7)$$

さらにVargasらは，この手法を拡張したQCAと呼ぶ手法も提案している^[97]．この手法は，ランダム位相シフトでは位相全体のシフト方向が未知であるため，位相が反転する問題を解決する手法である．また，PCAによる解法を高精度化する手法として，ノイズなどの影響を考慮し，隣接画素を用いて次元を増やす手法がYatabeらにより提案されている^[98]．

5.2.2 楕円当てはめを用いた高精度一波長計測手法

前項で述べたPCAによる手法よりも高精度な手法として，Yatabeらが超精度最小二乗法^{[99]-[101]}による楕円当てはめを用いた計測手法^[24]を提案している．この研究では，PCAによる解法が撮像範囲全体での位相分布の偏りに依存して，位相推定精度が低下することを指摘した．PCAの手法では，PCA前に取得データを画素ごとに平均値を引くことで中心化を行う．しかし，位相に偏りがある

場合、つまり楕円の一部（円弧）しかサンプリングされない場合には、中心化後の原点がリサージュ曲線の中心座標とならない。つまり、PCAの手法では位相が一様分布であることを暗黙に仮定している。

PCAを用いた解法の方で、楕円当てはめによる位相推定法がAlbertazziらにより提案された^{[102][103]}。そしてYatabeらが、楕円当てはめによる計測法では、位相分布に偏りがある場合にも高精度に抽出できることを示した。具体的には、中心化でリサージュ曲線の中心座標に補正されないデータにおいても、楕円当てはめを行うことで楕円中心に再度中心化して、その誤差を補正することができる。この楕円推定法には、Kanataniらが提案した超精度最小二乗法^{[99]–[101]}を採用することで、高精度化を果たした。Yatabeらは、この手法を用いた位相推定法の性能として、ガウシアンノイズなどを含めたシミュレーション実験により、現状でState of the artの位相推定精度であることを示した。また、計算時にイテレーションがない準超精度最小二乗法でも性能が十分であることも示された。

この手法について、具体的な解法を説明する。部分空間を求めるステップまではPCAと同一であり、射影した部分空間で楕円当てはめを行う。このときに当てはめる楕円の方程式は、式(5.8)で表せる。 x, y はSVDで求めた第1,2主成分、 $\alpha_i \{i=1\sim 6\}$ は楕円のパラメータ、 β は任意の値の基準長である。

$$\alpha_1 x^2 + 2\alpha_2 xy + \alpha_3 y^2 + 2\beta(\alpha_4 x + \alpha_5 y) + \beta^2 \alpha_6 = 0 \quad (5.8)$$

上記の式に楕円当てはめを行い、求めた楕円のパラメータを用いて、位相 ϕ を式(5.9)～(5.13)で求められる。この手法の概念図を図5.3に示す。

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{\alpha_1 + \alpha_3 - \kappa}(\tilde{x} - \tau \tilde{y})}{\sqrt{\alpha_1 + \alpha_3 + \kappa}(\tilde{y} + \tau \tilde{x})} \right) \quad (5.9)$$

$$\tilde{x} = \frac{x - \beta(\alpha_3 \alpha_4 - \alpha_2 \alpha_5)}{\alpha_2^2 - \alpha_1 \alpha_3} \quad (5.10)$$

$$\tilde{y} = \frac{y - \beta(\alpha_1 \alpha_5 - \alpha_2 \alpha_4)}{\alpha_2^2 - \alpha_1 \alpha_3} \quad (5.11)$$

$$\kappa = \sqrt{4\alpha_2^2 + (\alpha_1 - \alpha_3)^2} \quad (5.12)$$

$$\tau = \frac{\alpha_1 - \alpha_3 + \kappa}{2\alpha_2} \quad (5.13)$$

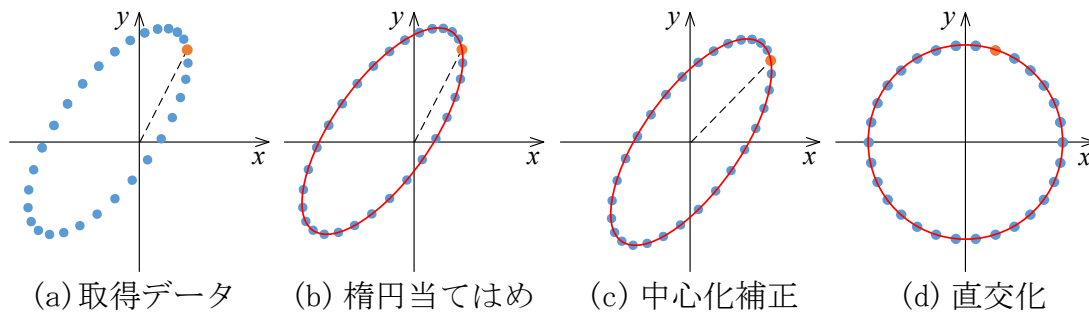
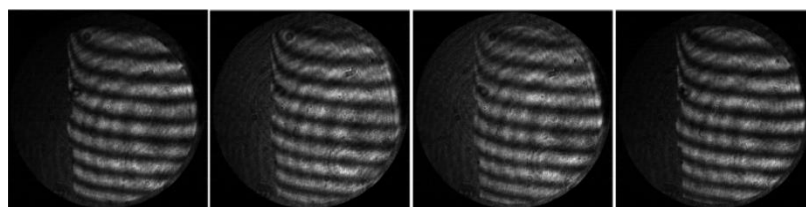


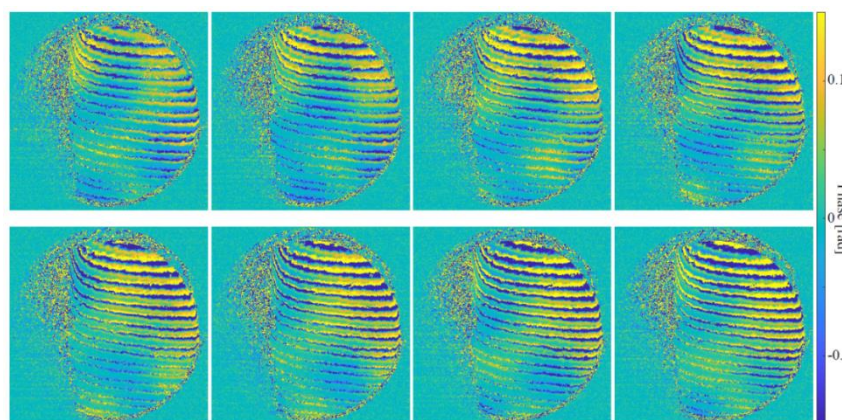
図5.3 楕円当てはめによる位相推定

5.2.3 部分空間の寄与率を用いたロバスト計測手法

上記までに述べたランダム位相シフトにおける一波長の計測手法は非常に有用である．しかし，これらの手法を実際の計測に適用すると，正しく位相推定できない場合があることをYatabeらは指摘した^[25]．この位相推定できない要因として，干渉していない領域を含んでPCAや楕円当てはめによる手法を適用すると，正しい物体光の位相を得られないことが示されている．以降では，この干渉していない領域をoutlierと呼称する．Yatabeらの実験による実際の計測失敗例として，図5.4に示す音場の計測結果が示された．



(a) 撮影データ



(b) 計測失敗例

図5.4 一波長計測における音場の計測例（outlierによる計測失敗）^[25]

この例では、図5.4(a)の画像左端に干渉していない領域が含まれている．この領域を含めて推定すると、音による全体的な空気の密度変化を捉えるはずが、図5.4(b)の位相分布となる．このように、実環境の計測においてoutlierの影響を考慮する重要性を提言した．

そこで、この研究ではoutlierを除外して部分空間を求めることで、outlierに影響されない計測手法を提案している．この手法では、一波長の多様体が楕円になることに基づいて、2次元の部分空間のみで表現できることを利用する．

この手法について、具体的な解法を説明する．この手法では、5.2.2項で述べた射影行列 \mathbf{P} に加えて、直交補空間を用いる．直交補空間への射影行列 \mathbf{P}_\perp は、式(5.14)により求める． $\tilde{\Sigma}$ は $M \times (M-2)$ 行列の特異値の上位2次元を除いた特異ベクトル、 $\tilde{\mathbf{U}}$ は $(M-2) \times (M-2)$ の対角行列であり、特異値の上位2次元を除いた特異値を要素に持つ．

$$\mathbf{P}_\perp = \tilde{\Sigma}^{-1} \tilde{\mathbf{U}}^T \quad (5.14)$$

一波長計測は、2次元の部分空間のみで表現できるため、ノイズが少ない場合は、直交補空間へ射影すると式(5.15)が成り立つ．

$$\mathbf{P}_\perp \mathbf{i} \approx 0 \quad (5.15)$$

式(5.15)が成り立たない、つまり部分空間上で2次元より大きい次元の寄与率が高い画素はノイズであるとみなす．そのため、2次元までと3次元以上の寄与率との比をoutlier判定のS/N比としてSNRを定義する（式(5.16)）．ここで、 $\|\cdot\|_2$ はユークリッド距離を表す．outlierを判定する条件の不等式としては、閾値 Υ により式(5.17)を用いて判定する．

$$\text{SNR}(x) = \frac{\|\mathbf{P}\mathbf{i}(x)\|_2^2}{\|\mathbf{P}_\perp \mathbf{i}(x)\|_2^2} \quad (5.16)$$

$$\text{SNR}(x) < \Upsilon \max_x \{\text{SNR}(x)\} \quad (5.17)$$

このように、S/N比が低い画素はoutlierであると判定して、自動的にoutlierの画素を除外することで、ロバストに位相推定を行う．図5.4の位相推定に失敗し

たサンプルに対して，この手法を用いられた結果を図5.5に示す．このように，**outlier**を除外することでロバストに計測できることを示した．図5.6に，この判定法の概念図を示す．

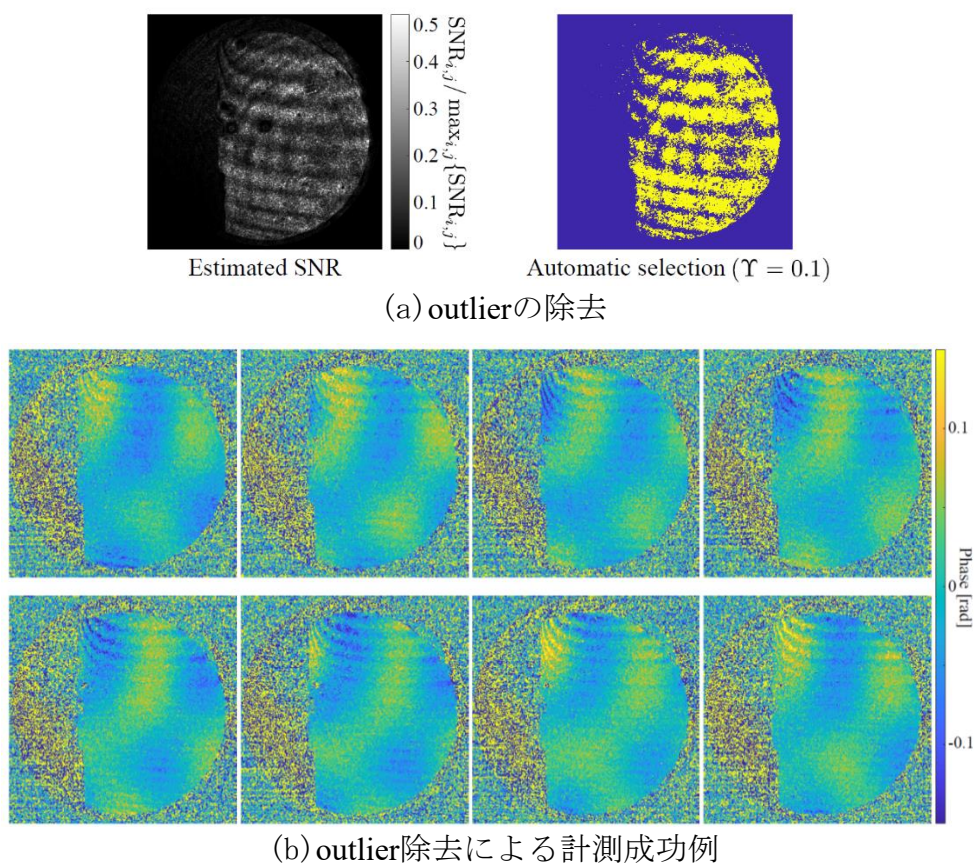


図5.5 一波長計測における音場の計測例（outlier除去による計測成功） [25]

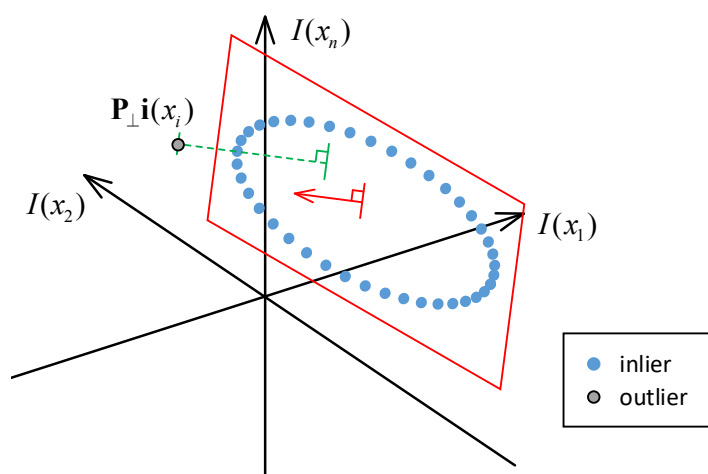


図5.6 outlierの判定法

5.2.4 ICA を用いた二波長計測手法

PCAを用いた手法は、一波長に対して容易に計測可能であるが、二波長に対しては単純には適用できない^[104]。これに対して、二波長計測における同様のアプローチとして、ICAを用いた計測手法がLiらにより提案された^[26]。この手法では、ICAを用いることでランダム位相シフト環境においても二波長計測を実現した。ICAには、fastICA^{[105][106]}を用いることで位相の実部・虚部に相当する独立成分を高速に求めることができる^[107]。

ここで、具体的な解法について説明する。まず、二波長の位相シフトで観測される光強度は、式(5.18)のように表せる。2つの光源波長を λ_1, λ_2 として、各波長に対応する振幅を $a_{\lambda_1}, a_{\lambda_2}$ 、物体位相を $\phi_{\lambda_1}, \phi_{\lambda_2}$ 、 k フレーム目における参照位相を $\delta_{\lambda_1 k}, \delta_{\lambda_2 k}$ とする。

$$\begin{aligned} I_k(x) &= b(x) + a_{\lambda_1}(x) \cos(\phi_{\lambda_1}(x) + \delta_{\lambda_1 k}) + a_{\lambda_2}(x) \cos(\phi_{\lambda_2}(x) + \delta_{\lambda_2 k}) \\ &= b(x) + a_{\lambda_1}(x) \cos(\phi_{\lambda_1}(x)) \cos(\delta_{\lambda_1 k}) - a_{\lambda_1}(x) \sin(\phi_{\lambda_1}(x)) \sin(\delta_{\lambda_1 k}) \\ &\quad + a_{\lambda_2}(x) \cos(\phi_{\lambda_2}(x)) \cos(\delta_{\lambda_2 k}) - a_{\lambda_2}(x) \sin(\phi_{\lambda_2}(x)) \sin(\delta_{\lambda_2 k}) \end{aligned} \quad (5.18)$$

式(5.18)で表せる二波長の光強度変化が示す多様体は、図5.7に示すリサーージュ曲線を描く。ここで、青線は λ_1 、赤線は λ_2 、緑線は合成波長 Λ の多様体を表す。これらの楕円平面をICAにより独立成分として求めている。

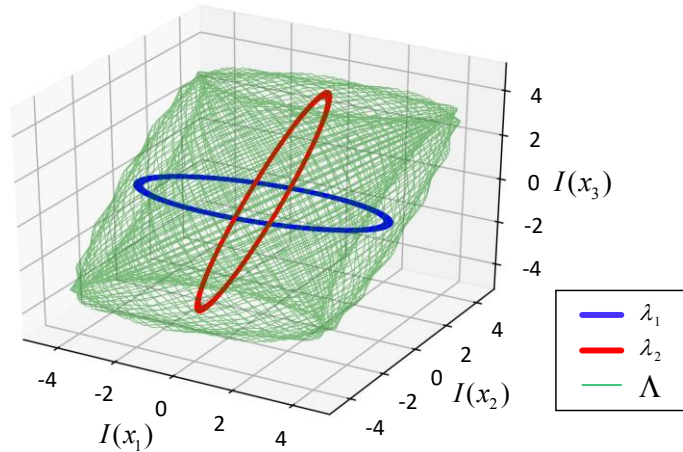


図5.7 二波長の多様体

ここで、式(5.18)の各項とその係数を式(5.19)に置き換え、式(5.20)で表現して解法を説明する． $\mathbf{c}_{\lambda_1}, \mathbf{s}_{\lambda_1}, \mathbf{c}_{\lambda_2}, \mathbf{s}_{\lambda_2}$ は、各波長に対応する参照位相の余弦・正弦関数のベクトル \mathbf{c}, \mathbf{s} である．

$$\begin{cases} \varphi_{c\lambda_1}(x) = a_{\lambda_1}(x) \cos(\phi_{\lambda_1}(x)) \\ \varphi_{s\lambda_1}(x) = -a_{\lambda_1}(x) \sin(\phi_{\lambda_1}(x)) \\ \varphi_{c\lambda_2}(x) = a_{\lambda_2}(x) \cos(\phi_{\lambda_2}(x)) \\ \varphi_{s\lambda_2}(x) = -a_{\lambda_2}(x) \sin(\phi_{\lambda_2}(x)) \end{cases} \quad (5.19)$$

$$\mathbf{i}(x) = b(x)\mathbf{1} + \varphi_{c\lambda_1}(x)\mathbf{c}_{\lambda_1} + \varphi_{s\lambda_1}(x)\mathbf{s}_{\lambda_1} + \varphi_{c\lambda_2}(x)\mathbf{c}_{\lambda_2} + \varphi_{s\lambda_2}(x)\mathbf{s}_{\lambda_2} \quad (5.20)$$

この観測される光強度を式(5.4)と同様にデータ行列 \mathbf{D} で表現する．PCAと同様に、式(5.18)の各項を実部・虚部の係数、平均光強度として考えると、5つの成分で表現されることがわかる．以降では、基本的なfastICAに従って解を得る．

まずICAを適用する際には、独立成分数と同じ次元にPCAで次元削減する前処理が行われる．そのため、PCAで5次元に次元削減され、この前処理は式(5.21)で計算できる． \mathbf{Q} は白色化行列、添字の“-1/2”は行列の要素ごとに平方根の逆数を取ることを表す． \mathbf{X} の各行ベクトルを \mathbf{d} と表す．

$$\mathbf{X} = \mathbf{Q}\mathbf{D} = \mathbf{\Sigma}^{-1/2}\mathbf{V}^T\mathbf{D} \quad (5.21)$$

$$\mathbf{X} = [\mathbf{d}(0), \mathbf{d}(1), \dots, \mathbf{d}(N)]^T \quad (5.22)$$

一般的なfastICAでは次元削減された主成分 \mathbf{X} を基に、ネグエントロピーを近似したkurtosisの最大化または最小化により、分離行列 \mathbf{W} を求める．分離行列 \mathbf{W} をベクトル \mathbf{w} で $\mathbf{W} = (\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_n)^T$ のように表現すると、更新式は期待値 E を用いて、式(5.23)のように表せる．ここで、 g は非線形関数、 g' は g の微分を表す．さらに式(5.23)で更新した後、 $\|\mathbf{w}\|=1$ に正規化するため、式(5.24)が適用される．これを繰り返して更新することで、 \mathbf{w} を得る．収束条件として、更新前後でベクトル \mathbf{w} の差の絶対値が十分小さくなると、更新を終了する．

$$\mathbf{w} := E\{\mathbf{X}g(\mathbf{w}^T\mathbf{X})\} - E\{g'(\mathbf{w}^T\mathbf{X})\}\mathbf{w} \quad (5.23)$$

$$\mathbf{w} := \frac{\mathbf{w}}{\|\mathbf{w}\|} \quad (5.24)$$

ここで、kurtosisの最大化または最小化を行うにあたり、求めるべき目的の独立成分について考える．目的の独立成分は正弦・余弦関数であることが既知なため、確率分布が劣ガウス分布（sub-gaussian）であることがわかる．そのため、式(5.23)の更新式における非線形関数 g には3次関数（ $g(x) = x^3$ ）が用いられ、分離行列 \mathbf{W} を式(5.25)の更新式により求める．

$$\mathbf{w} := E\{\mathbf{X}(\mathbf{w}^T \mathbf{X})^3\} - 3\mathbf{w} \quad (5.25)$$

fastICAには、全てのベクトル $\mathbf{w}_i \{i=1, 2, \dots, n\}$ をまとめて直交化するSymmetric ICAと、逐次的に直交化するDeflationary ICAの2種類存在する．Liらの手法では、Deflationary ICAによる解法が用いられているため、上位の独立成分から順に求める．収束した後に分離行列 \mathbf{W} を用いて、式(5.26)によりデータ行列 \mathbf{D} を独立成分 \mathbf{S} に分離することで、独立成分を得る．

$$\mathbf{S} = \mathbf{W}\mathbf{D} \quad (5.26)$$

これにより得られた5次元の独立成分は、式(5.18)の各項に対応する成分として得られる．これらの対応する成分を基に、式(5.27)により各波長に対応する位相を求められ、その結果として合成波長 Λ の位相 ϕ_Λ も求められる．ここで、 h は光路差を表し、距離に変換できる．

$$\phi_{\lambda_1}(x) = \tan^{-1}\left(\frac{-\varphi_{s\lambda_1}(x)}{\varphi_{c\lambda_1}(x)}\right), \phi_{\lambda_2}(x) = \tan^{-1}\left(\frac{-\varphi_{s\lambda_2}(x)}{\varphi_{c\lambda_2}(x)}\right) \quad (5.27)$$

$$\phi_\Lambda(x) = \phi_{\lambda_1}(x) - \phi_{\lambda_2}(x) = 2\pi h(x) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) = \frac{2\pi h(x)}{\Lambda} \quad (5.28)$$

上記に示したように、ICAを適用するだけで効率的に合成波長の位相を求められることを示した．ただし、この研究ではシミュレーション実験によりガウシアンノイズが加算されたときの計測精度評価や、単純な形状の実物体である泡

の屈折率の計測結果は報告されているが、その他の要因による計測の安定性については議論されていない。

5.3 ICAによる二波長計測法の問題点

前節では、ランダム位相シフトにおける計測手法に関する従来研究について、整理して述べた。これらの従来研究を踏まえて、本研究では 5.2.3項でYatabeらが一波長の計測で実計測におけるoutlierの問題を指摘したように、二波長の計測においても同様の問題発生する可能性があると考えた。

実際にoutlierを含むように計測した場合と、outlierを含まないように計測した場合で比較した結果を図5.8に示す。outlierを含まない場合には、図5.8(a)に赤枠で示す領域のみを用いて、分離行列 \mathbf{W} を求めた。

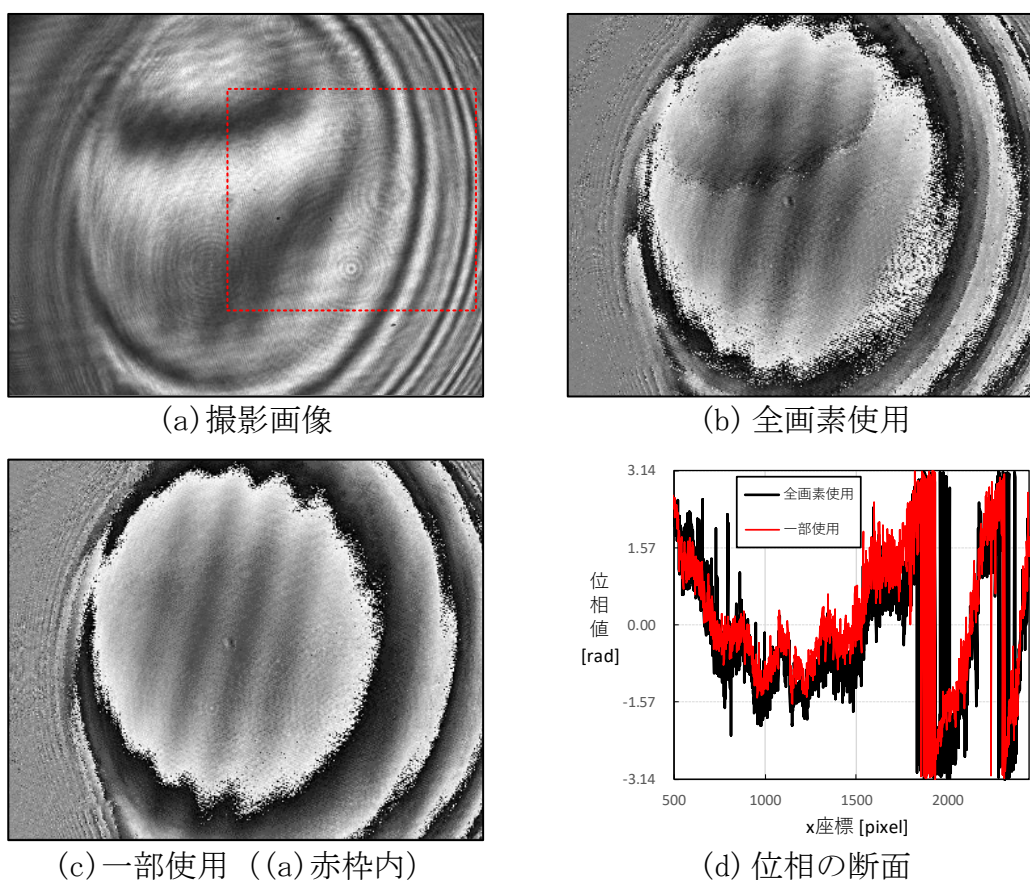


図5.8 二波長計測におけるoutlierを含むことによる計測失敗例

計測結果を示すように、二波長においてもYatabeらが指摘したoutlierの問題は、共通して存在することが確認された。Yatabeらの手法では、ランダム位相で観測された一波長の干渉縞画像列が、2次元の部分空間でのみ表現されるという特性を利用している。これに対して、二波長を用いた場合のリサージュ曲線は、単純な楕円ではない複雑な軌跡を描くが、一波長につき部分空間では2次元の楕円で表現される。そのため、多波長においても限られた部分空間で表現でき、部分空間の寄与率を用いて同様に判定できると考えられる。本研究では、この部分空間の寄与率に基づく特性を用いて、二波長計測においてもロバストな計測手法を提案し、計測の安定化を実現する。

5.4 提案手法

本研究では、二波長計測においてもoutlierを判定することで、ロバストに計測可能な手法を提案する。提案手法において、計測可能な干渉している画素とoutlierの画素を判定する基準には、リサージュ曲線の特性に基づいた指標として、式(5.29)のように定義する。ただし、ICAで正しく位相が求まることを前提とするため、物体位相・参照位相は一様分布を仮定する。

$$D(x) = \|\mathbf{d}(x)\| = \sqrt{\sum_{i=1}^5 d_i^2(x)} \quad (5.29)$$

5.2.4節において述べたように、fastICAでは前処理としてPCA白色化を行い、分離する独立成分数と同じ次元数を削減する。二波長計測では、5次元の独立成分を用いるため、PCAでも同様に固有値の高い上位5次元に次元削減する。提案手法では、前処理のPCA白色化で得た中間の結果である5次元の主成分に着目することを表している。この信頼値 D を基準とすることに関して、計測可能な場合とoutlierである場合の2パターンについて具体的な特性を説明する。

まず、outlierが干渉していない画素である場合には、それらの観測される光強度は、平均光強度 b の成分のみであり、定数で表現される。そのため、PCA前処理の中心化処理において、部分空間上の原点(0)になることがわかる。これは、sub-gaussianではなく、ガウス分布や優ガウス分布(super-gaussian)に近い分布

であると言える．実際には，センサノイズなどが発生するため，完全に原点には一致しない．しかし，それらの標準偏差を考慮した範囲で，平均は0に近い値となる．したがって，outlierの計測点は中心化後に原点付近に存在するため，光強度のベクトル \mathbf{i} に対して式(5.30)が成り立つ．そのため，主成分 \mathbf{d} のL2ノルムは0に近い．

$$\|\mathbf{i} - \bar{l}\mathbf{1}\| \simeq 0 \quad (5.30)$$

これに対して，物体光からの反射が得られて干渉する（outlierではない）領域では，必ず実部・虚部の成分が存在する．主成分 \mathbf{d} のL2ノルムについて考えるため，まずは共分散行列について考える．共分散行列の (i, j) 成分の要素 σ_{ij} は，式(5.31)で求められる．ただし， $c_{\lambda_1 i} = \cos(\delta_{\lambda_1 i})$ ， $s_{\lambda_1 i} = \sin(\delta_{\lambda_1 i})$ ， $c_{\lambda_2 i} = \cos(\delta_{\lambda_2 i})$ ， $s_{\lambda_2 i} = \sin(\delta_{\lambda_2 i})$ である．

$$\sigma_{ij} = \sum_{x=0}^N \left(\varphi_{c\lambda_1}(x)c_{\lambda_1 i} + \varphi_{s\lambda_1}(x)s_{\lambda_1 i} + \varphi_{c\lambda_2}(x)c_{\lambda_2 i} + \varphi_{s\lambda_2}(x)s_{\lambda_2 i} \right) \left(\varphi_{c\lambda_1}(x)c_{\lambda_1 j} + \varphi_{s\lambda_1}(x)s_{\lambda_1 j} + \varphi_{c\lambda_2}(x)c_{\lambda_2 j} + \varphi_{s\lambda_2}(x)s_{\lambda_2 j} \right) \quad (5.31)$$

ここで，PCAの解法と同様に物体位相が一様に分布すると仮定すれば，位相の異なる三角関数の相関は0であるため，式(5.32)が成り立つ．

$$\begin{aligned} \sum_{x=0}^N \varphi_{c\lambda_1}(x)\varphi_{s\lambda_1}(x) &= \sum_{x=0}^N a_{\lambda_1}^2 \cos(\phi_{\lambda_1}(x))\sin(\phi_{\lambda_1}(x)) \simeq 0 \\ \sum_{x=0}^N \varphi_{c\lambda_2}(x)\varphi_{s\lambda_2}(x) &= \sum_{x=0}^N a_{\lambda_2}^2 \cos(\phi_{\lambda_2}(x))\sin(\phi_{\lambda_2}(x)) \simeq 0 \\ \sum_{x=0}^N \varphi_{c\lambda_1}(x)\varphi_{c\lambda_2}(x) &= \sum_{x=0}^N a_{\lambda_1}a_{\lambda_2} \cos(\phi_{\lambda_1}(x))\cos(\phi_{\lambda_2}(x)) \simeq 0 \\ \sum_{x=0}^N \varphi_{s\lambda_1}(x)\varphi_{s\lambda_2}(x) &= \sum_{x=0}^N a_{\lambda_1}a_{\lambda_2} \sin(\phi_{\lambda_1}(x))\sin(\phi_{\lambda_2}(x)) \simeq 0 \end{aligned} \quad (5.32)$$

したがって，共分散行列 Σ は式(5.33)となる．

$$\begin{aligned} \Sigma &= \sum_{x=0}^N \left\{ \varphi_{c\lambda_1}^2(x) \right\} \mathbf{c}_{\lambda_1} \mathbf{c}_{\lambda_1}^T + \sum_{x=0}^N \left\{ \varphi_{s\lambda_1}^2(x) \right\} \mathbf{s}_{\lambda_1} \mathbf{s}_{\lambda_1}^T \\ &\quad + \sum_{x=0}^N \left\{ \varphi_{c\lambda_2}^2(x) \right\} \mathbf{c}_{\lambda_2} \mathbf{c}_{\lambda_2}^T + \sum_{x=0}^N \left\{ \varphi_{s\lambda_2}^2(x) \right\} \mathbf{s}_{\lambda_2} \mathbf{s}_{\lambda_2}^T \end{aligned} \quad (5.33)$$

さらに参照位相が一様分布である場合には、任意の波長 λ_i について式(5.34)が成り立つ。そのため、中心化の誤差が無いことを仮定すると、ベクトル \mathbf{i} に対しては式(5.35)が成り立つ。これを踏まえて、主成分 \mathbf{d} についてはユニタリ行列 \mathbf{U}^T のノルムが1であるため、式(5.36)が成り立つ。

$$\begin{aligned}\mathbf{c}_{\lambda_i}^T \mathbf{c}_{\lambda_i} &= \sum_{k=0}^M \cos^2(\delta_i) = \sum_{k=0}^M \frac{1 + \cos(2\delta_k)}{2} \simeq \frac{M}{2} \\ \mathbf{s}_{\lambda_i}^T \mathbf{s}_{\lambda_i} &= \sum_{k=0}^M \sin^2(\delta_i) = \sum_{k=0}^M \frac{1 - \cos(2\delta_k)}{2} \simeq \frac{M}{2}\end{aligned}\quad (5.34)$$

$$\begin{aligned}\|\mathbf{i}(x) - \bar{I}\mathbf{1}\| &\geq \sqrt{\varphi_{c\lambda_1}^2(x) \mathbf{c}_{\lambda_1}^T \mathbf{c}_{\lambda_1} + \varphi_{s\lambda_1}^2(x) \mathbf{s}_{\lambda_1}^T \mathbf{s}_{\lambda_1} + \varphi_{c\lambda_2}^2(x) \mathbf{c}_{\lambda_2}^T \mathbf{c}_{\lambda_2} + \varphi_{s\lambda_2}^2(x) \mathbf{s}_{\lambda_2}^T \mathbf{s}_{\lambda_2}} \\ &\simeq \sqrt{\varphi_{c\lambda_1}^2(x) \frac{M}{2} + \varphi_{s\lambda_1}^2(x) \frac{M}{2} + \varphi_{c\lambda_2}^2(x) \frac{M}{2} + \varphi_{s\lambda_2}^2(x) \frac{M}{2}} \\ &= \sqrt{\frac{M}{2} \{a_{\lambda_1}^2 (\cos^2(\phi_{\lambda_1}) + \sin^2(\phi_{\lambda_1})) + a_{\lambda_2}^2 (\cos^2(\phi_{\lambda_2}) + \sin^2(\phi_{\lambda_2}))\}} \\ &= \sqrt{\frac{a_{\lambda_1}^2 + a_{\lambda_2}^2}{2}} M\end{aligned}\quad (5.35)$$

$$\|\mathbf{d}\| = \|\Sigma^{-1/2} \mathbf{U}^T (\mathbf{i} - \bar{I}\mathbf{1})\| \geq \|\Sigma^{-1/2}\| \sqrt{\frac{a_{\lambda_1}^2 + a_{\lambda_2}^2}{2}} M \quad (5.36)$$

式(5.38)より、outlierでない各計測点 x では、主成分 \mathbf{d} のL2ノルム、つまりユークリッド距離は一定以上の値を持つことが示された。したがって、提案手法では、閾値 Υ により式(5.37)の不等式でoutlierを判定する。ベクトル \mathbf{i} に逆行列 $\|\Sigma^{-1/2}\|$ を乗算した主成分 \mathbf{d} を用いることで、全体の値のスケールについて標準偏差が1に正規化される。そのため、全体的な振幅の値に依存せず、閾値 Υ を決定できる。

$$D < \Upsilon \quad (5.37)$$

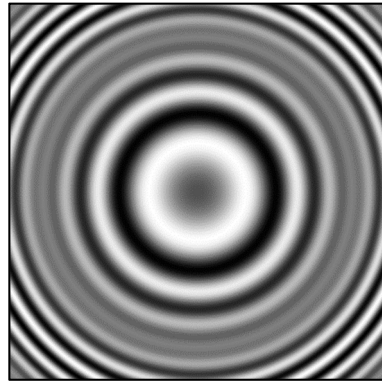
以上のとおりにoutlierの画素を選択した後に、選択した画素に対して従来手法と同様に、fastICAにより位相を求める。

この手法の利点としては、Yatabeらの手法ではSVDで高次元まで求める必要があるが、その必要がなく計算量がかからないことが挙げられる。

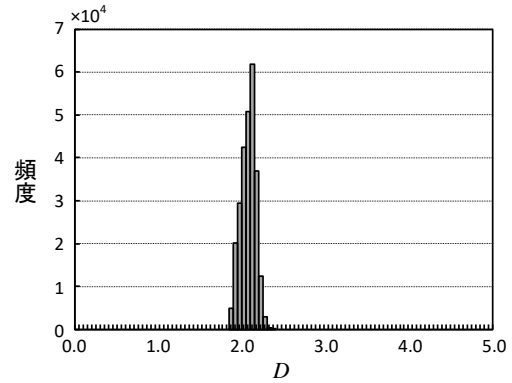
5.5 シミュレーション実験

本節では，シミュレーション実験を通して，提案手法について妥当性を検証し，さらに閾値 Υ について考察する．

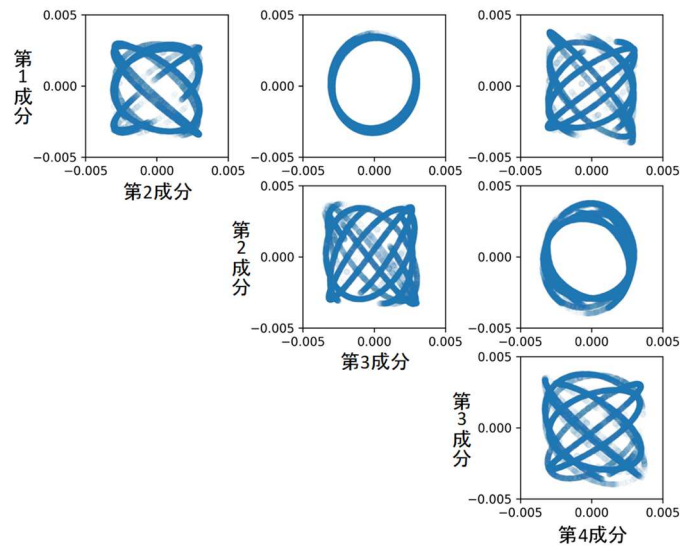
本検討におけるシミュレーションデータの位相分布 ϕ_λ は，画像中心を原点に持つ座標系 (u,v) において $\phi_\lambda(u,v)=r(u^2+v^2)$ の凸関数に従うとして，ノイズが無い干渉縞を生成した．位相分布の係数 $r=5$ ，式(5.18)で $b=128$ ， $a_{\lambda_1}=40$ ， $a_{\lambda_2}=40$ として生成した干渉縞を図5.9(a)に示す．シミュレーションデータでは，干渉縞画像20枚分を解析に使用した．シミュレーションデータに対して，fastICAによる従来手法を適用して，提案手法の信頼値 D を求めた結果を図5.9(b)(c)に示す．



(a) シミュレーションデータ



(b) 信頼値 D のヒストグラム



(c) 各独立成分

図5.9 シミュレーション結果（ノイズ無）

全画素の振幅が一定値である場合には，式(5.32)で示したように信頼値 D が一定の値に近いことを確認できる．信頼値 D は，共分散行列 $\|\Sigma\|$ で正規化されるため，画像全体で振幅が全て同じ場合には，常に $D=2.0$ に近い値となる．また，ICA後の独立成分を確認すると，独立成分（第1成分，第3成分），（第2成分，第4成分）の組み合わせが，各波長に対応する成分であり，円周上に分布する．

続いて，ノイズとoutlierを含んだ場合における提案手法の例を示す．正規分布 $\mathcal{N}(\mu=0, \sigma=10)$ に従う正規乱数ノイズと，outlierを含むように生成したデータに対して適用した結果を図5.10に示す．さらに，提案手法の有無による独立成分の解析結果を図5.11に示す．

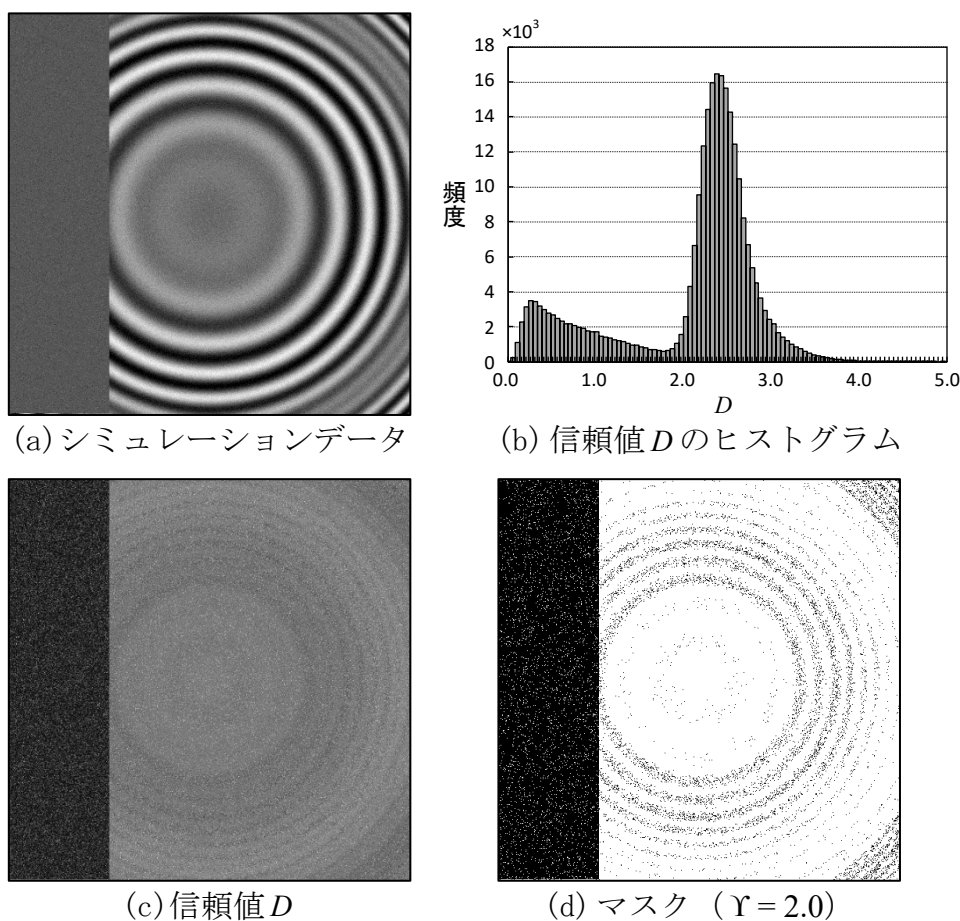
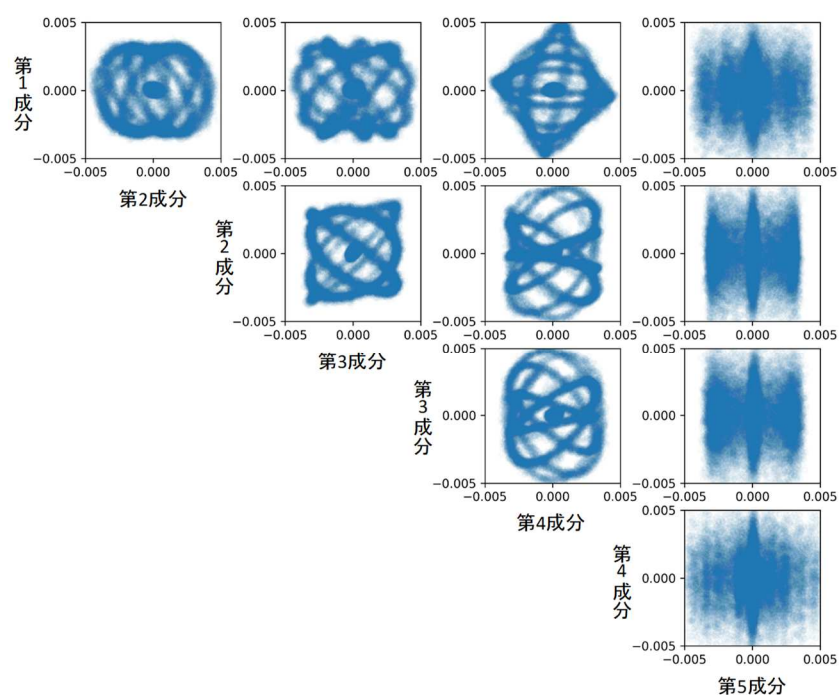
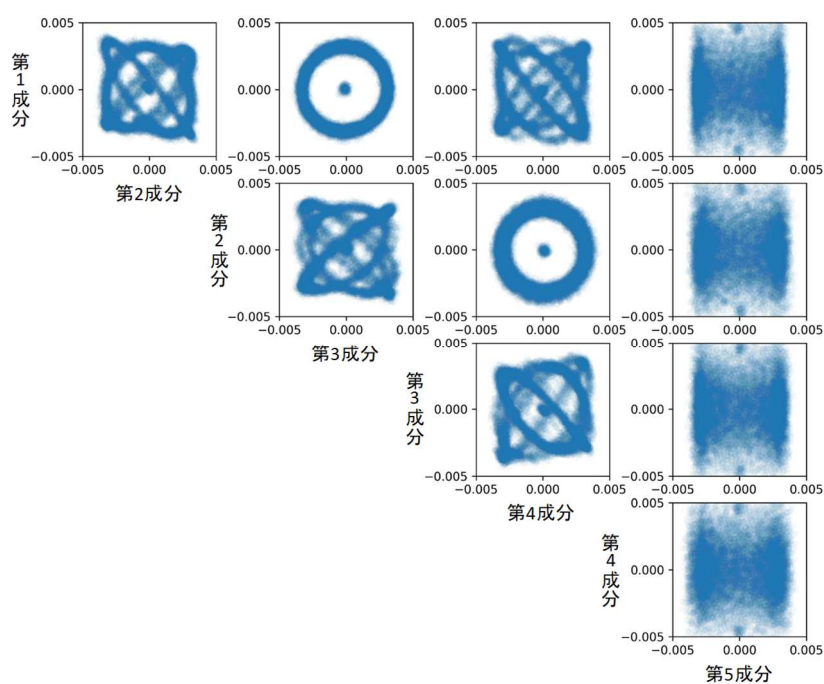


図5.10 シミュレーション結果（ガウスノイズ + outlier有）



(a) 各独立成分 (マスクなし)



(b) 各独立成分 (マスクあり)

図5.11 シミュレーション結果の独立成分 (ガウスノイズ+outlier有)

ここで, outlierの特性について考える. カメラのセンサノイズなどにより標準偏差 σ のガウス性ノイズが加わった上で, 中心化の誤差 ϵ が発生することを仮

定する．この場合でノイズについてL2ノルムを求めると，正規分布の二乗和であるため，カイ二乗分布となる．したがって，outlierは単峰性の分布であるとみなせる．図5.11(b)のヒストグラムを確認しても，信頼値 D の低い分布についてはカイ二乗分布に近いことを確認できる．そのため，outlierの判定に用いる閾値 Υ は，計測可能な領域が正規分布などの単峰性の分布である場合には，大津の二値判別法やモード法などで自動的に決定できる．

Yatabeらの手法では，ノイズとの比に基づいて判定するため，ノイズの寄与率に依存して値の範囲が変化し，閾値を変更する必要がある．これに対して，提案手法では主成分を用いるため，振幅の値をスケールしている．そのため，二波長の振幅の比が既知である場合には，理論値が求まる．

5.6 評価実験

本節では，実環境で実物体に対して，従来・提案手法で計測を行い，それぞれの手法の比較結果について報告する．それらの結果について考察し，提案手法の有効性を示す．

5.6.1 実験条件

本実験では，図5.12に示す二波長の計測装置（図5.13：光学系）を用いて行う．使用したカメラ，光源，自動ステージなどの仕様を表5.1～表5.5に示す．

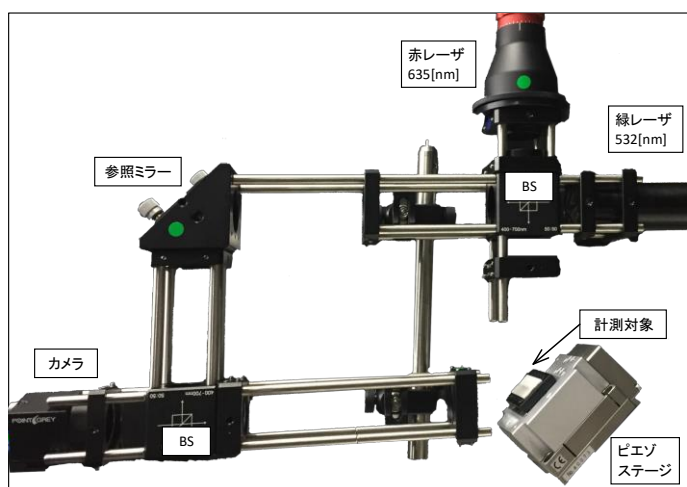


図5.12 計測装置

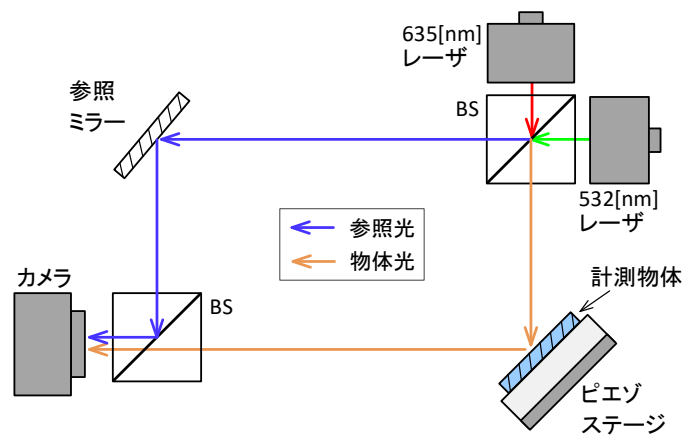


図5.13 光学系

表5.1 カメラ仕様


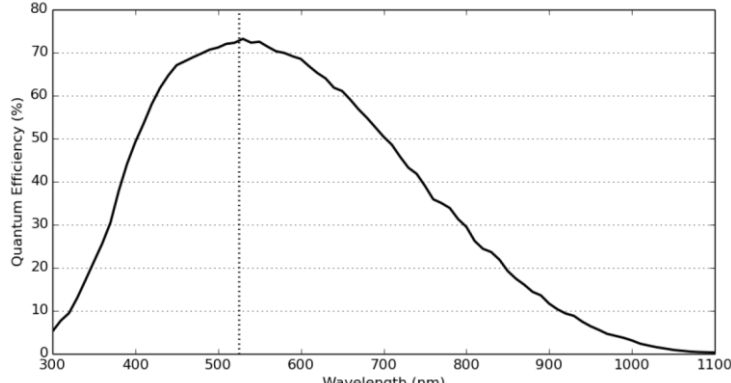
メーカー	FLIR																						
型番	BFS-U3-51S5M																						
撮像素子	Sony IMX250																						
解像度[pixel]	2448×2048																						
素子サイズ[μm]	3.45																						
外観																							
分光特性	 <table border="1"> <caption>Quantum Efficiency Data (Estimated)</caption> <thead> <tr> <th>Wavelength (nm)</th> <th>Quantum Efficiency (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>300</td><td>5</td></tr> <tr><td>400</td><td>45</td></tr> <tr><td>500</td><td>70</td></tr> <tr><td>520</td><td>75</td></tr> <tr><td>600</td><td>65</td></tr> <tr><td>700</td><td>45</td></tr> <tr><td>800</td><td>25</td></tr> <tr><td>900</td><td>10</td></tr> <tr><td>1000</td><td>5</td></tr> <tr><td>1100</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	Wavelength (nm)	Quantum Efficiency (%)	300	5	400	45	500	70	520	75	600	65	700	45	800	25	900	10	1000	5	1100	0
Wavelength (nm)	Quantum Efficiency (%)																						
300	5																						
400	45																						
500	70																						
520	75																						
600	65																						
700	45																						
800	25																						
900	10																						
1000	5																						
1100	0																						

表5.2 ピエゾステージ仕様


メーカー	シグマ光機
型番	SFS-H60XYZ(CL)
繰り返し位置決め精度[μm]	<0.1
理論分解能（オープン時）[nm]	1
分解能（クローズ時）[nm]	10
外観	

表5.3 赤レーザー仕様

項目	詳細
メーカー	Thorlabs
型番	CPS635R
中心波長[nm]	635（1.2mW）
波長偏差[nm]	630-645
外観	

表5.4 無偏光ビームスプリッタ仕様



項目	詳細
メーカー	Thorlabs
型番	CCM1-BS013/M
適応波長[nm]	400-700
反射光偏差[deg]	90 ± 20 [arcmin]
外観	

表5.5 ビームエキスパンダ仕様

項目	詳細
メーカー	Thorlabs
型番	GBE05-A
適応波長[nm]	400-700
ビーム倍率[倍]	5
外観	

表5.6 段差マスタ仕様

項目	詳細
メーカー	ミットヨ
型番	516-498
隣接段差[μm]	1
隣接段差との許容差[μm]	± 0.2
外観	

光源のレーザには、緑（波長532[nm]）と赤（635[nm]）を用いた．緑レーザについては4.5節と同様である．本実験で位相推定に使用する画像は、一律で20枚とした．振動を模擬したランダム位相を生成するため、ピエゾステージにより合成波長である3.28[μm]までの高さを一様乱数で変化させることで、ランダム位相を生成する．計測対象には1[μm]の段差マスク（表5.6）を用いて、outlierの割合を変化させて撮影する．outlierの割合は約25, 50, 75[%]となるように、3つの条件で実施した．

ただし、合成波長の1/4に相当する範囲までしか計測出来ないため、1[μm]の段差では位相連結において必ず位相が 2π ずれる．そのため、位相連結時に画像半分の領域に位相を 2π 加算して補正することとした．

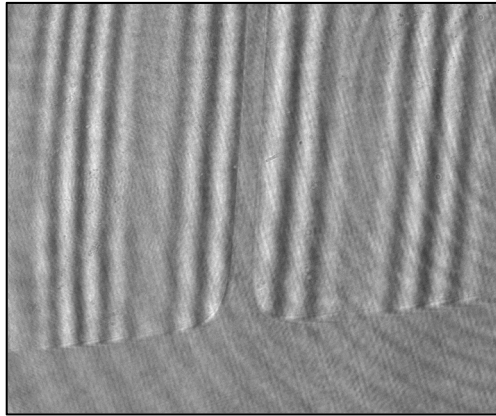
5.6.2 実験結果

本項では、以上の実験条件に基づいた実験結果を示す．ただし、前項で述べた実験条件に加えて、計測後の後処理を適用した．まず、1画素ごとのノイズを抑制するため、信頼値 D の分布に窓サイズ 7×7 、 $\sigma = 2.0$ のガウシアンフィルタを適用してから、閾値 r によるマスクを作成した．さらに、従来手法では計測不能領域に関するマスクが無い場合、ノイズの影響で位相連結処理に必ず失敗する．そこで、提案手法で得られたマスクを位相連結に用いた．さらに、以上の前処理を加えて、提案手法の閾値 Y を大津の二値判別法により自動的に決定することとした．

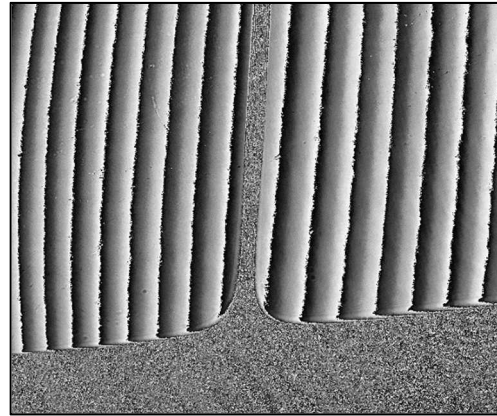
本評価実験で得られた結果を図5.14～図5.25に示す．各outlierの割合における従来手法、提案手法の結果をそれぞれ比較するため、fastICAの処理結果、位相分布、三次元形状の比較をそれぞれ示す．ただし、計測が失敗する場合には、Z座標の範囲が大きくなりすぎるため、三次元形状の表示ではスケールと範囲を統一した．

以降に結果を示すように、従来手法のみではoutlierを含む場合に計測に失敗し、本来の形状を全く計測できていないことを確認できる．これに対して、提案手法を適用することで、outlierの影響を受けず、fastICAにより各波長に対応する成分を抽出できていることを確認できる．outlierのマスク画像についても、段差マスクの計測可能な領域に正しくマスクを作成できていることを確認できる．

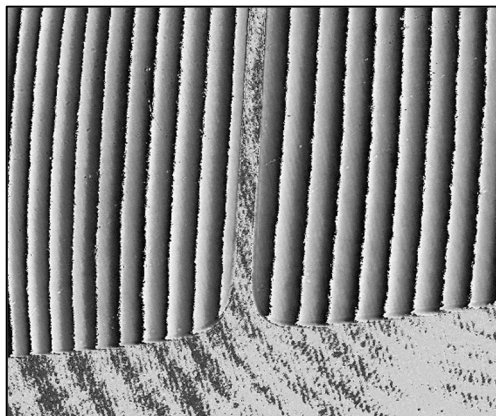
(1) outlier 領域の画像全体に占める割合が約 25[%]の場合



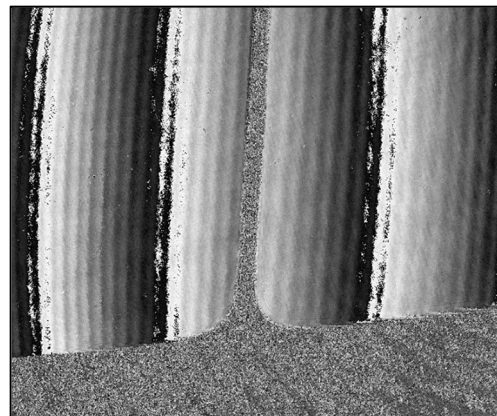
(a) 撮影画像



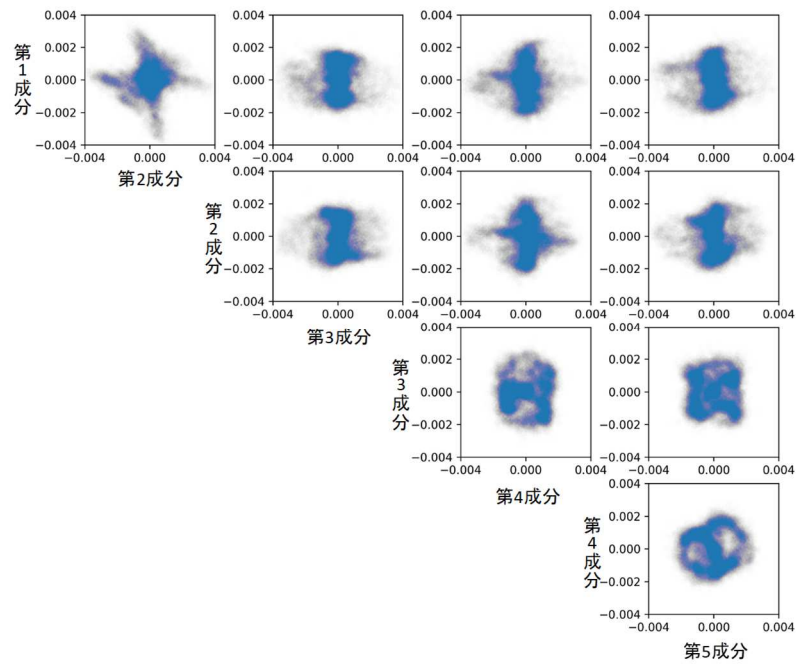
(b) λ_1 の位相



(c) λ_2 の位相

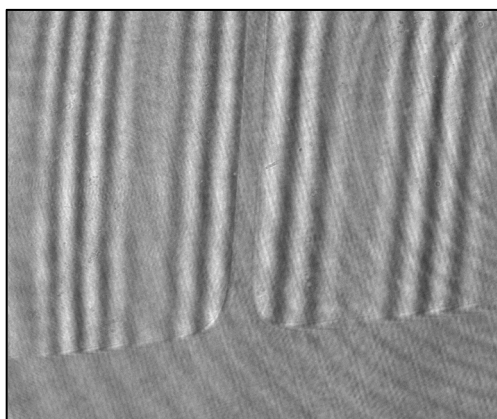


(d) 合成波長 Λ の位相

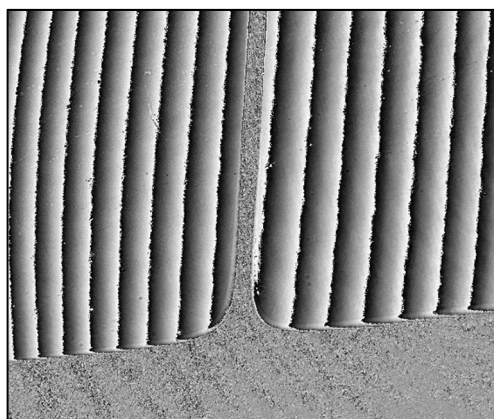


(e) 各独立成分

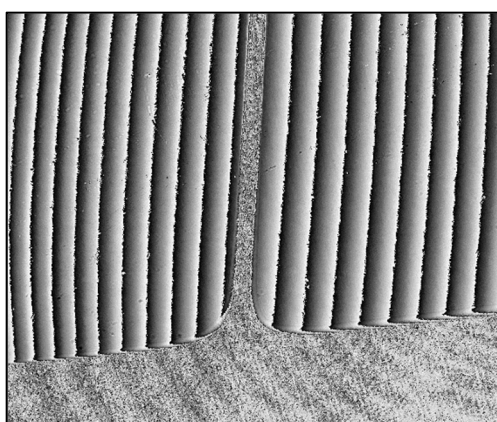
図5.14 従来手法の計測結果 (outlier 25[%])



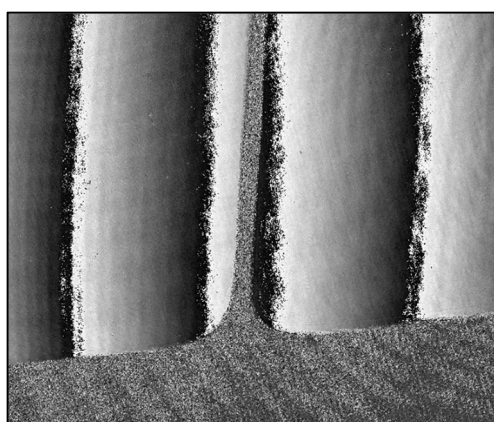
(a) 撮影画像



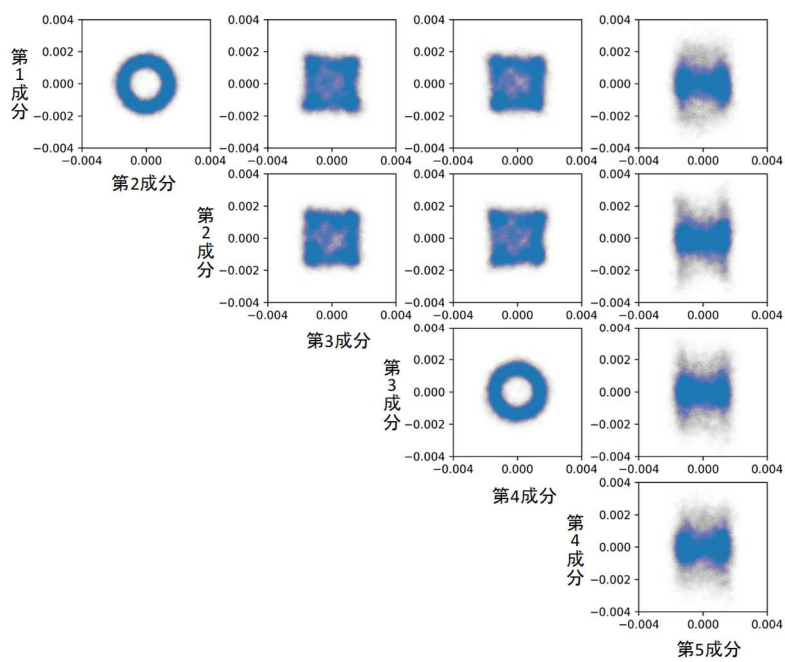
(b) λ_1 の位相



(c) λ_2 の位相

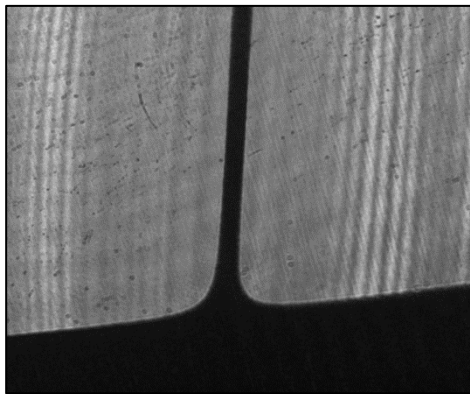


(d) 合成波長 Λ の位相

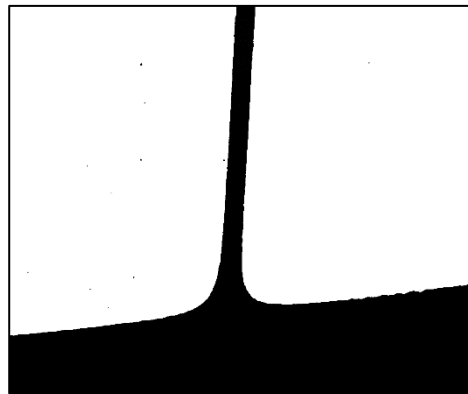


(e) 各独立成分 (マスク領域のみ)

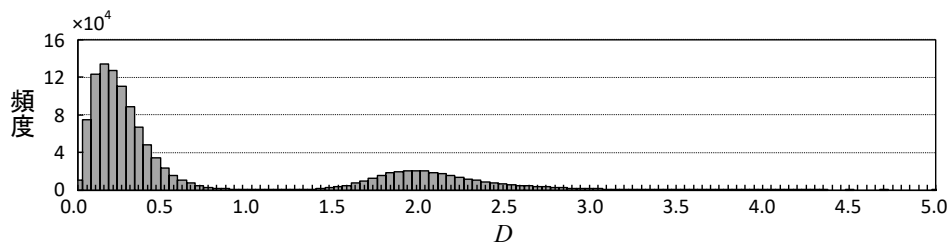
図5.15 提案手法の計測結果 (outlier 25[%])



(a) 信頼値 D の分布

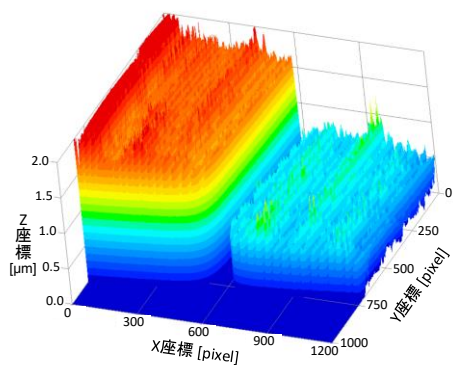


(b) マスク

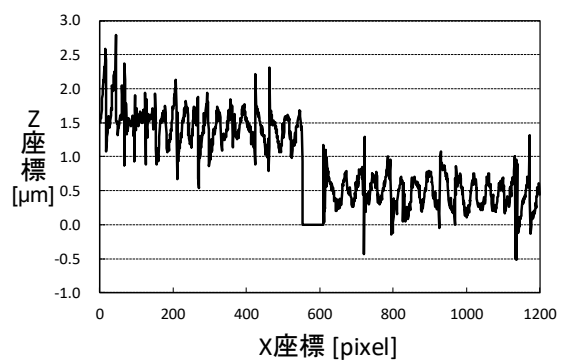


(c) (a)のヒストグラム

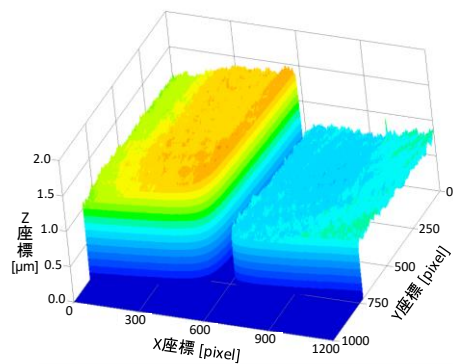
図5.16 提案手法の処理結果 (outlier 25[%])



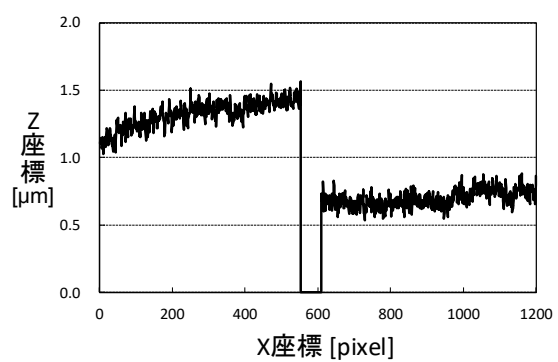
(a) 従来手法の三次元形状



(b) (a)の断面図 (Y=500[pixel])



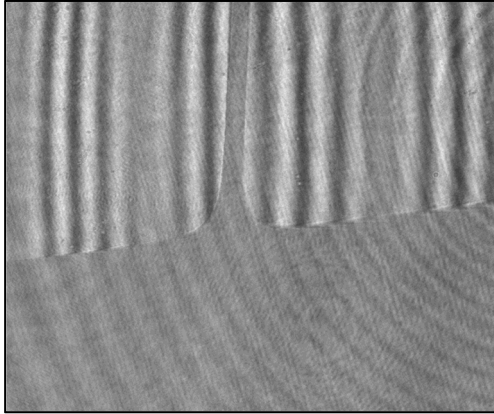
(c) 提案手法の三次元形状



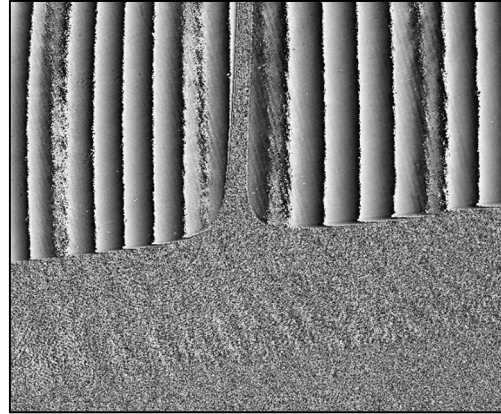
(d) (c)の断面図 (Y=500[pixel])

図5.17 従来・提案手法の三次元形状の比較 (outlier 25[%])

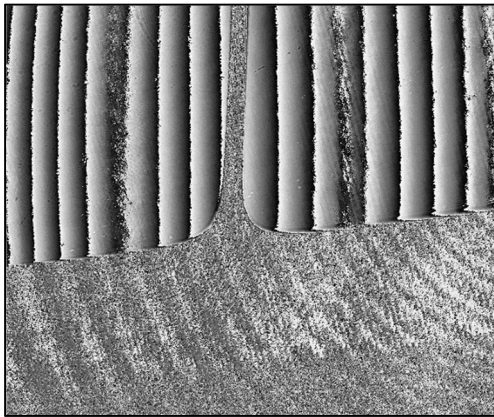
(2) outlier 領域の画像全体に占める割合が約 50[%]の場合



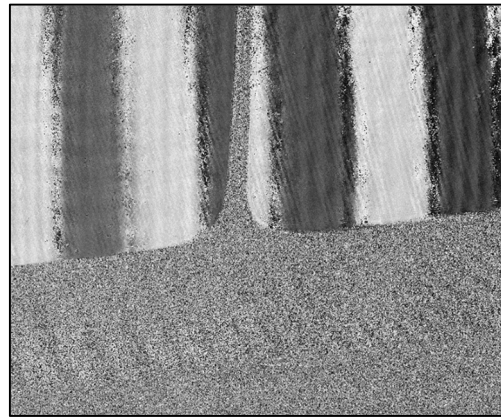
(a) 撮影画像



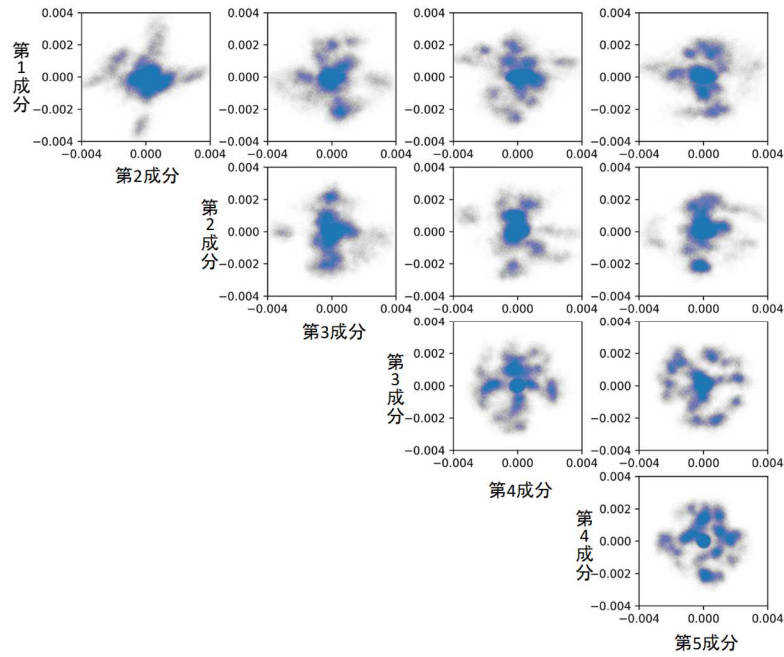
(b) λ_1 の位相



(c) λ_2 の位相

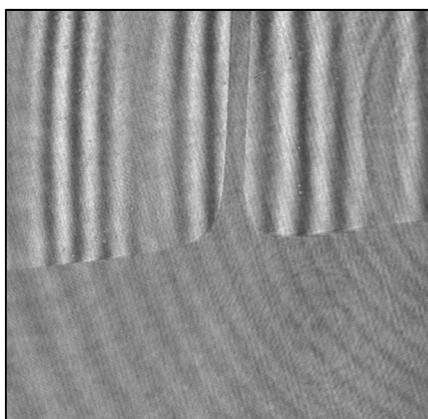


(d) 合成波長 Λ の位相

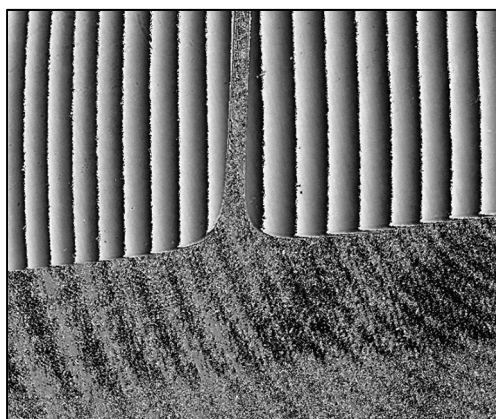


(e) 各独立成分

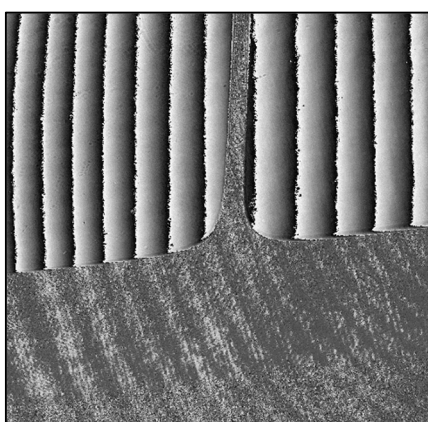
図5.18 従来手法の計測結果 (outlier 50[%])



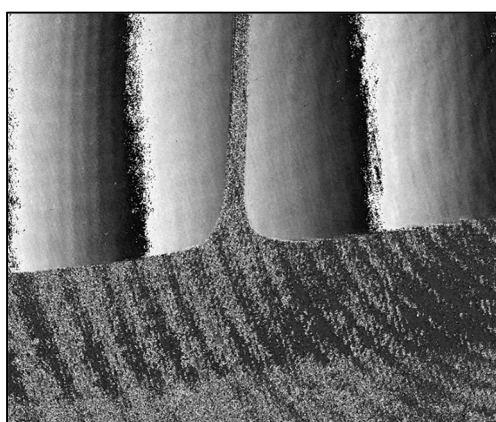
(a) 撮影画像



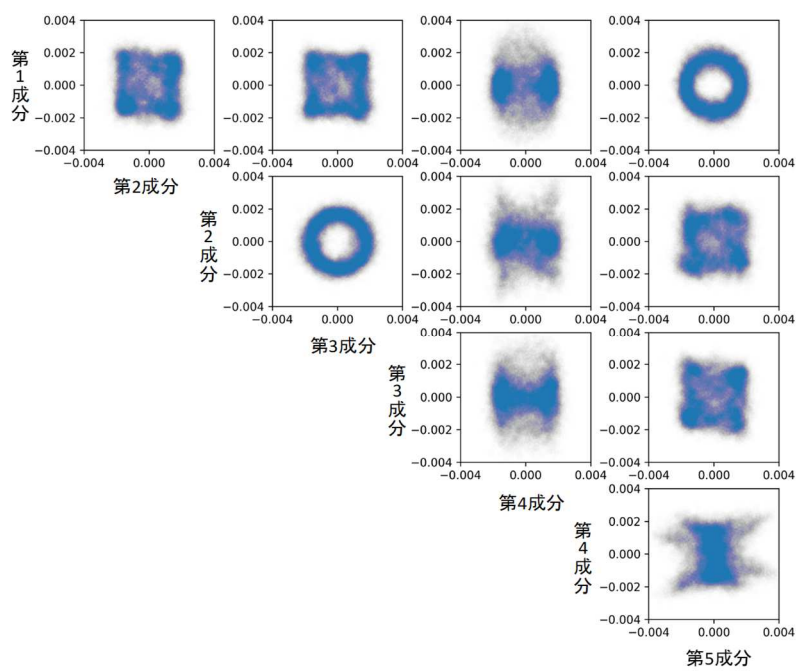
(b) λ_1 の位相



(c) λ_2 の位相

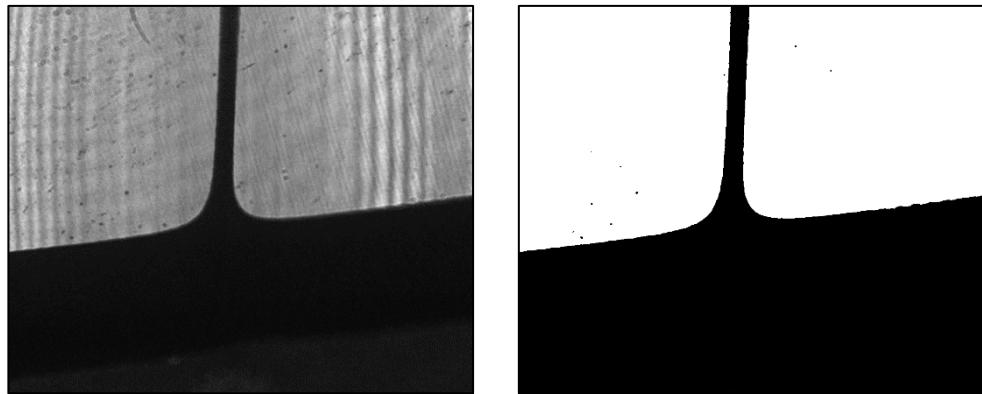


(d) 合成波長 Λ の位相



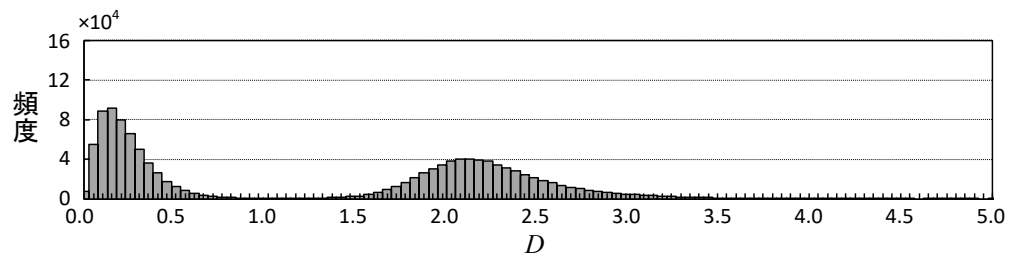
(e) 各独立成分 (マスク領域のみ)

図5.19 提案手法の計測結果 (outlier 50[%])



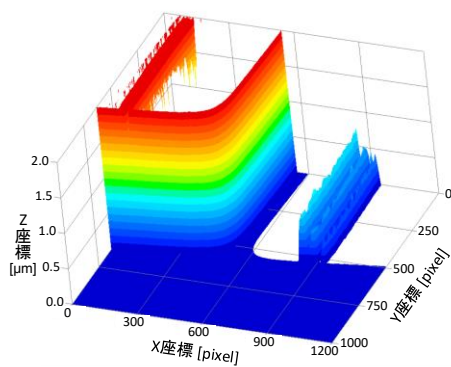
(a) 信頼値 D の分布

(b) マスク

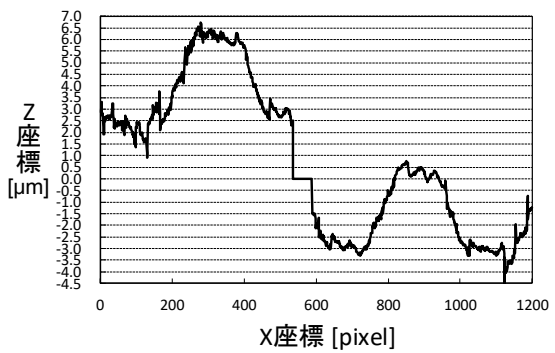


(c) (a) のヒストグラム

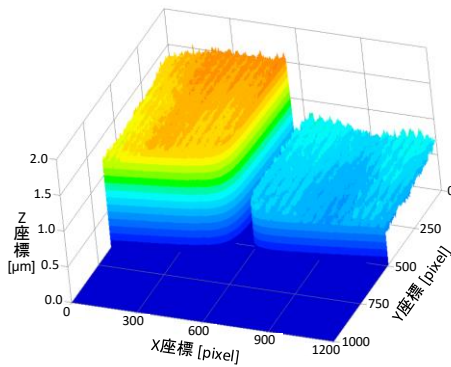
図5.20 提案手法の処理結果 (outlier 50[%])



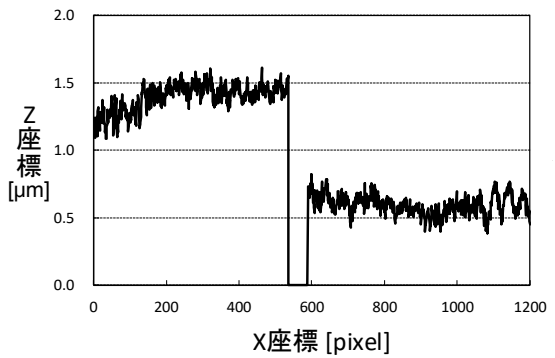
(a) 従来手法の三次元形状



(b) (a) の断面図 (Y=250[pixel])



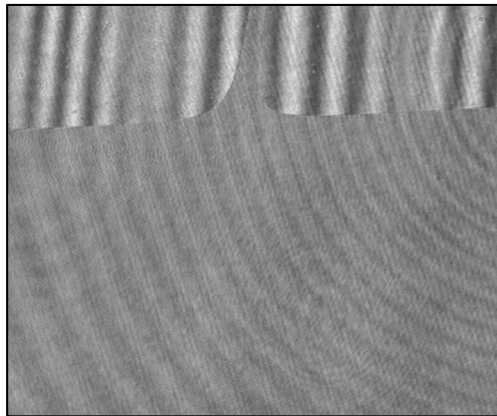
(c) 提案手法の三次元形状



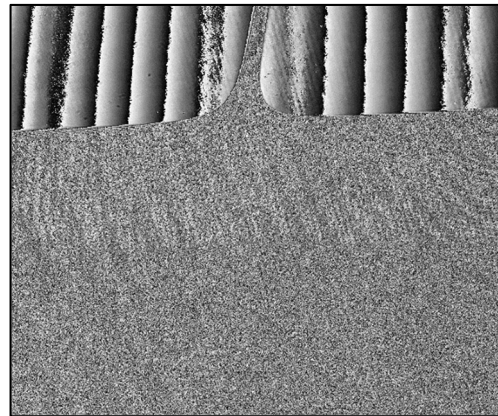
(d) (c) の断面図 (Y=250[pixel])

図5.21 従来・提案手法の三次元形状の比較 (outlier 50[%])

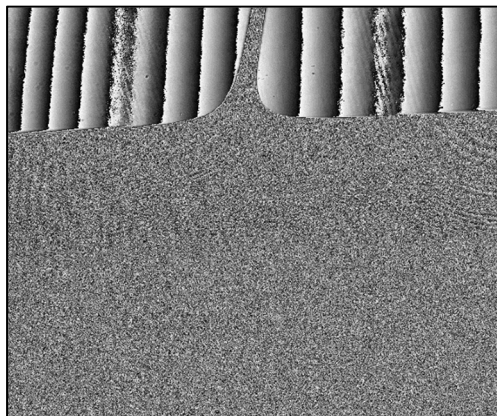
(3) outlier 領域の画像全体に占める割合が約 75[%]の場合



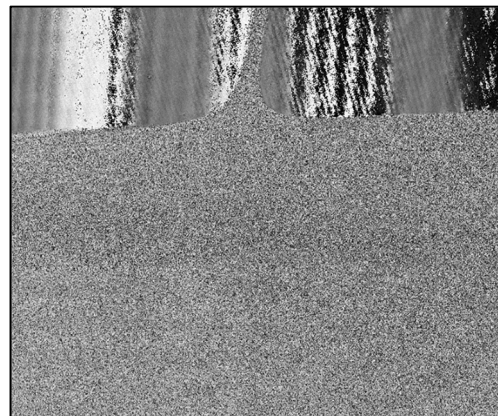
(a) 撮影画像



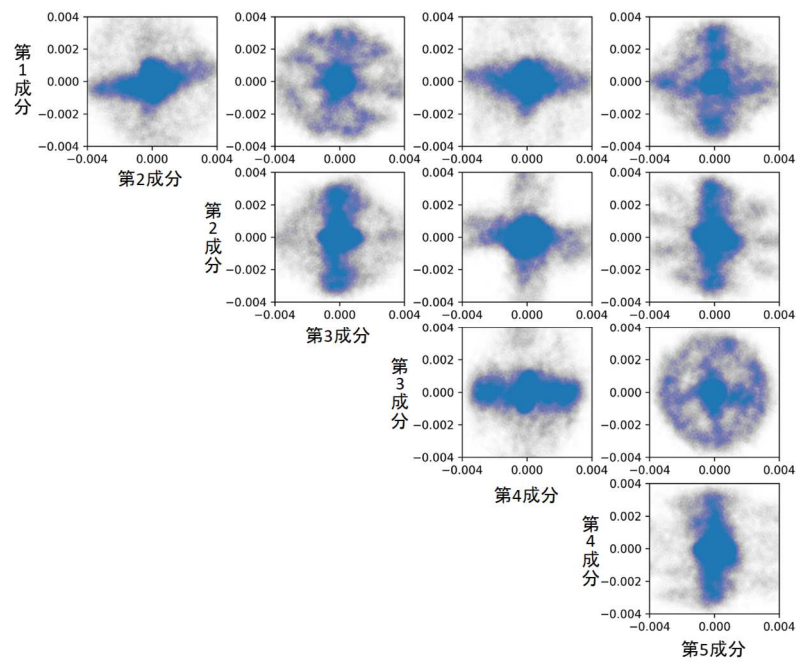
(b) λ_1 の位相



(c) λ_2 の位相

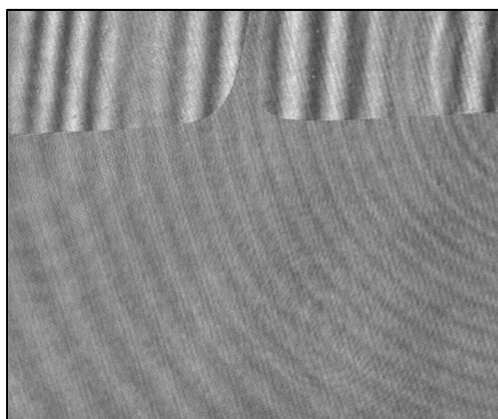


(d) 合成波長 Λ の位相

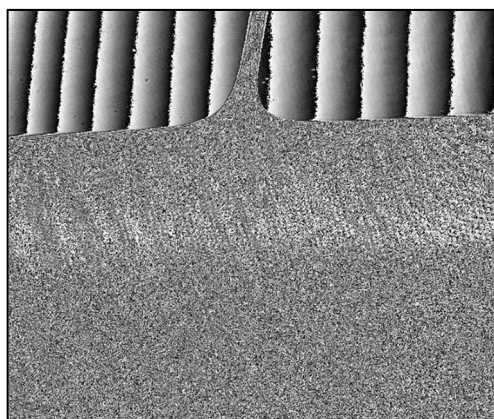


(e) 各独立成分

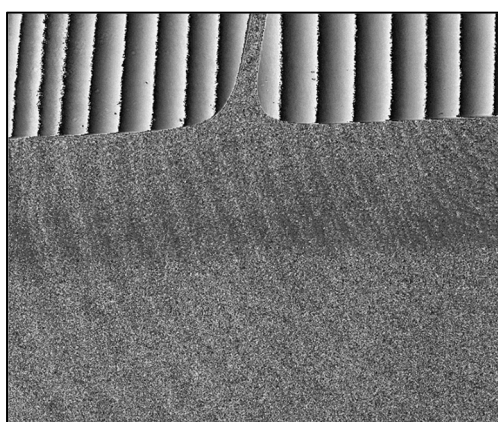
図5.22 従来手法の処理結果 (outlier 75[%])



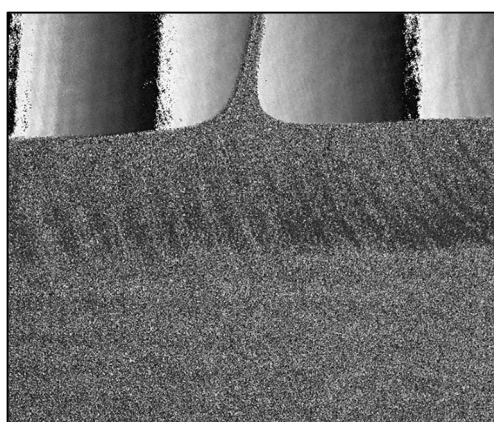
(a) 撮影画像



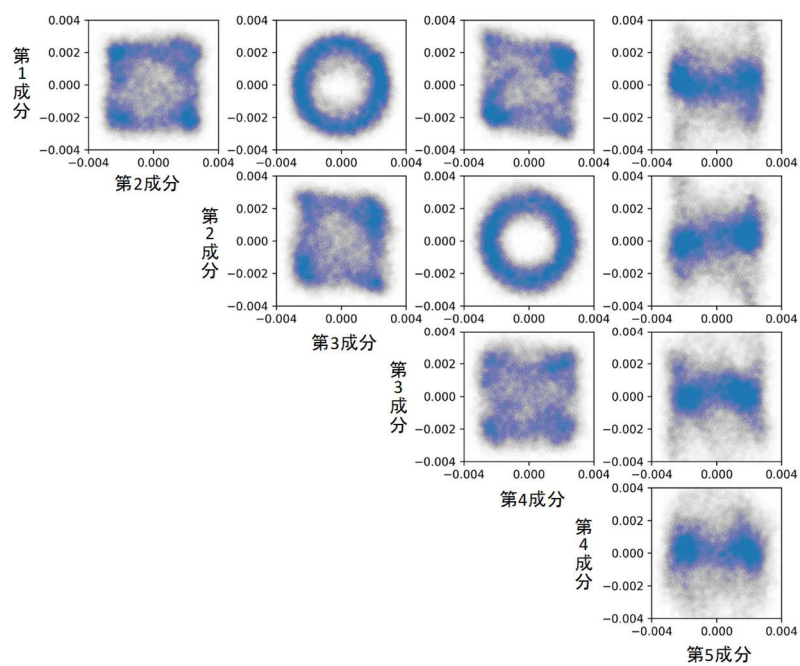
(b) λ_1 の位相



(c) λ_2 の位相

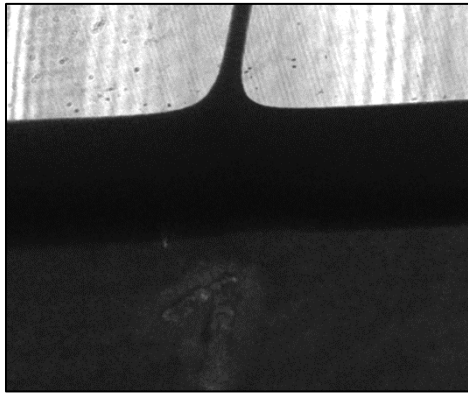


(d) 合成波長 Λ の位相



(e) 各独立成分（マスク領域のみ）

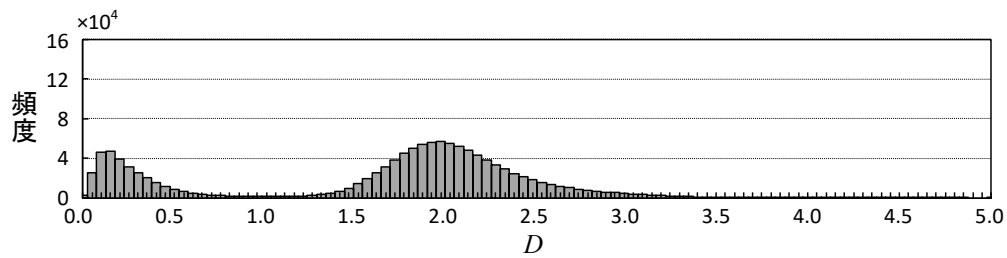
図5.23 提案手法の計測結果（outlier 75[%]）



(a) 信頼値 D の分布

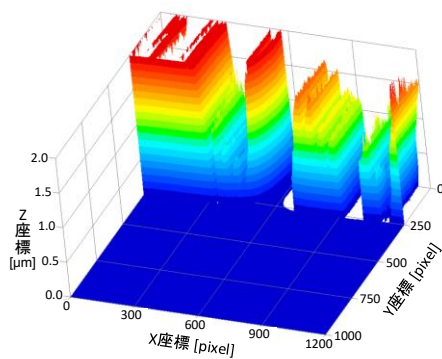


(b) マスク

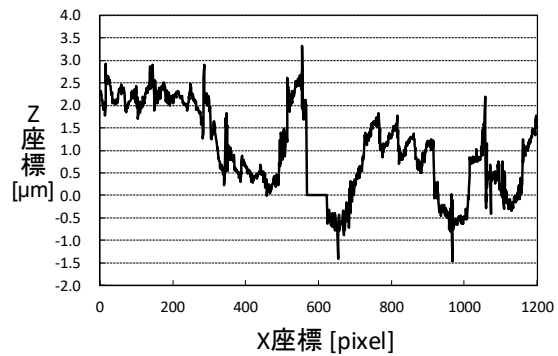


(c) (a) のヒストグラム

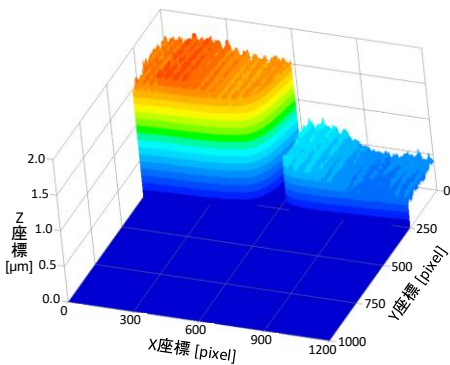
図5.24 提案手法の処理結果 (outlier 75[%])



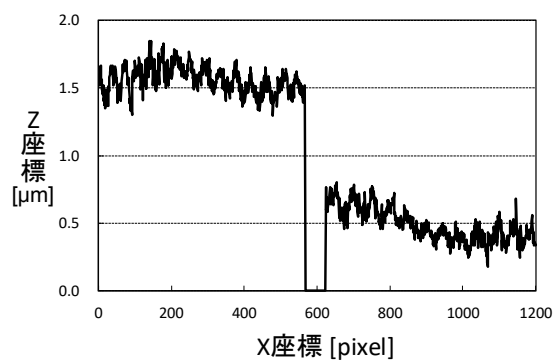
(a) 従来手法の三次元形状



(b) (a) の断面図 (Y=100[pixel])



(c) 提案手法の三次元形状

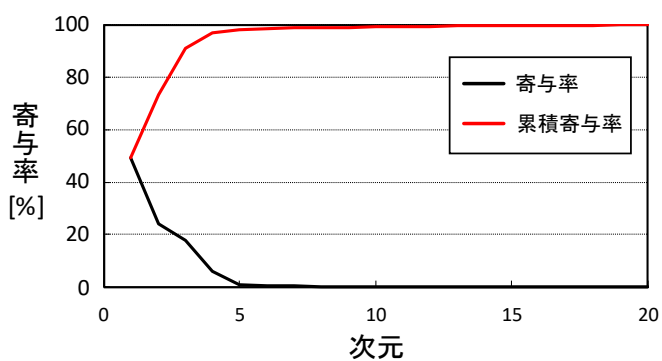


(d) (c) の断面図 (Y=100[pixel])

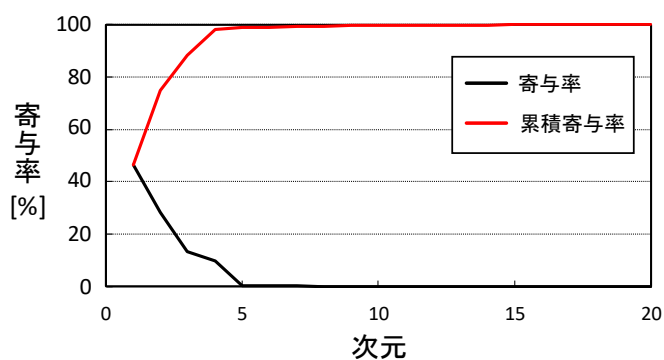
図5.25 従来・提案手法の三次元形状の比較 (outlier 75[%])

5.6.3 考察

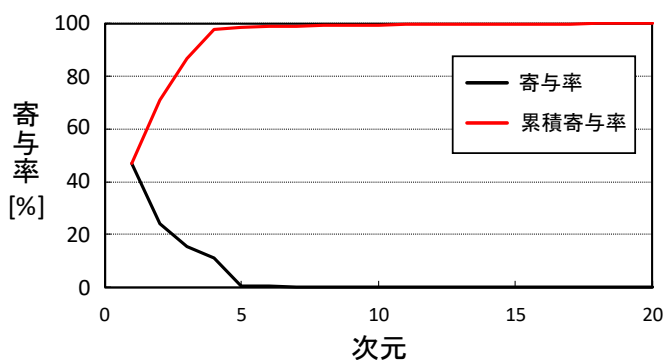
まずは, outlierなどのノイズを含んだ実環境での計測について, 提案手法の妥当性を考察する. 提案手法では, 全画素で求めた部分空間でoutlierを判定するため, 全体の光強度変調の分散が正しい位相変調を表すことを前提としていると言える. この判定法について, outlierの割合を変化させて計測したときの固有値の観点から考察する. 実験条件である各outlierにおける寄与率を図5.26に示す.



(a) outlier 75[%]



(b) outlier 50[%]



(c) outlier 25[%]

図5.26 各outlierの割合における寄与率

結果より、どのoutlierの割合においても、ほとんど寄与率が変化せず全体の部分空間で判定しても問題ないと考えられる。この結果より、outlierの光強度変調は、全体から見れば非常に小さいものであると言える。

次にoutlierの判定法について考察する。大津の二値判別法で閾値を決定したことにより、outlierとそうでない領域を分ける二値判別問題を解き、容易に閾値を自動で決定できることを示した。しかし、今回は段差マスタがセラミックの単一素材でできているため、反射光の強度が全体でおおよそ一様であり、振幅も一定に近い値である。これに対して、電子部品などの複数素材が混合したような複雑な物体を計測する際には、振幅が一様分布ではないため、閾値による計測安定をさらに考慮する必要がある。提案手法では、画像全体の固有値で値を正規化するため、ある程度の計測可能な面積が既知の場合には、p-tile法などにより固定の閾値を設けても良いと考えられる。

ここで、一波長でロバスト計測を実現したYatabeらの手法についても考察する。この手法では、ランダム位相で観測された干渉縞画像列が、2次元の部分空間でのみ表現されるという特性を利用している。しかし、提案手法でoutlierが原点近くに分布するという特性を示したように、除外すべきoutlierの特性自体を考慮していない。そのため、Yatabeらの手法ではノイズの割合に依存してS/N比が大きく変わり、outlierの判定閾値も変動する。これに対して、提案手法では信号成分である振幅の値に応じて変化し、シミュレーション実験でも示したように、特に振幅の比が同じである場合には $D=2$ に近くなる。

今後は、さらに多波長へ拡張していくことが望まれるが、三波長以上では各波長のノイズ・強度バラツキなどが大きく計測精度に影響することが指摘されている。そのため、fastICAの分離可能な波長数や波長差についても理論的に検証する必要がある。

5.7 むすび

本章では、前章においても問題点としていた「振動による位相シフト計測の不安定性」について、それらを解決しうる関連研究について述べた。さらに、それらの研究を踏まえ、振動がランダムであり参照位相が未知の実環境においても、二波長の位相シフト干渉計測を実現するロバストな計測手法を提案した。

具体的には、物体光からの反射を得られず、干渉しない領域を含むような計測シーンにおいて、それらを自動的に除外し、fastICAによる計測を適用することでロバストな計測を実現した。

評価実験では、outlierの割合を変化させて計測を行い、従来手法と比較して計測の安定性が高いことを示した。

今後の課題としては、ICAでは成分の順序が決定しないパーミュテーション問題が挙げられる。この問題については、従来手法でも実部・虚部に対応する成分の決定方法を述べていないが、実際の計測では非常に重要な点である。このパーミュテーション問題については、カクテルパーティー問題を長年扱っている音声分離の知見が生かされていくと予想される。今後も位相シフト干渉計測に取り入れることで、振動環境に限らず汎用的な環境でナノオーダの計測を実現し、製品の外観検査などの実利用へ応用していきたい。

第6章 結論

本稿では、位相シフト法を用いた三次元形状計測に着目し、「航空機に対する外観検査」、「振動による計測精度への影響の評価および計測手法」の2点について論じた。

まず、FA化があまり進んでいない航空機の分野に対する自動検査システムとして、小型三次元計測器とロボットアームを組み合わせた航空機用ファスナの自動外観検査システムを提案した。構築した検査システムでは、位相シフト法により計測を行い、得られた画像・三次元形状に対する画像・三次元点群処理を用いた検査手法について提案した。計測時の撮影画像と得られた三次元形状から、装着状態の良否判定に必要なファスナの傾きと深さを算出して検査する。具体的にはSnakesを用いたファスナの画像検出・切り出し手法、RANSACを用いたロバストな平面・円推定によるファスナの傾きと深さの計測手法を提案した。接触式測定器による結果と比較してシステムの検査精度を評価した結果、信頼区間 5σ で考慮しても、直径12[mm]ファスナでは深さ42.8[μm]、傾き0.269[deg]、10[mm]ファスナでは深さ42.3[μm]、傾き0.185[deg]以内の誤差で検査可能であることを示した。これは、現状の検査に要求される精度を満たしており、統計的な誤差を考慮した場合においても、半自動検査を実現できることを示唆した。さらに検査時間については、ファスナ1個あたり5.6 [sec]を達成しており、工数削減に寄与することを示した。

次に位相シフト法を用いた計測において、計測時の振動が計測精度の低下を招く問題に対し、計測結果に生じるリップル誤差と高い相関を持つ評価手法を提案した。防振・振動環境の両方において、ナノオーダの精度を持つ基準器を用い、位相シフト法による計測の各評価手法を評価した。基準器の平面部が完全に平坦であると仮定して、リップル形状の計測誤差を表面粗さとして定義し、表面粗さと評価尺度との相関関係を求めた。結果として、提案手法では最高で相関係数-0.940、決定係数0.883という最も高い相関関係を持つことを示した。提案手法では、リップル誤差と線形に近い相関を持つため、評価尺度を基にリップル誤差を容易に求められる。また、提案する評価関数に最急上昇法を用いた補正方法についても、検討結果を示した。イテレーションごとに振動の影響を受けた参照位相を更新することで補正を行い、計測結果を改善できることを示した。

最後に、振動環境においても二波長位相シフト計測をロバストに実現する手法を提案した．二波長計測ではICAを用いて計測されるが、ノイズ要因の計測安定性については議論されていなかった．これに対して、一波長計測におけるノイズ要因の問題を当てはめ、干渉しない領域を含むようなノイズがある場合に同様の問題があることを示した．さらに、その要因であるノイズに対して、それらを自動的に除外し、従来のICAによる計測を適用することでロバストな計測を可能にした．ノイズの割合が動的に変化する場合においてもノイズを除去可能であり、実環境で実物体への適用を実現した．

謝辞

本研究を行うにあたり，終始懇切丁寧なご指導を頂きました名古屋工業大学 梅崎太造教授に謹んで感謝いたします。

本論文の審査をしていただくとともに，有益なご意見をいただきました佐藤淳教授，本谷秀堅教授にお礼申し上げます。

また，本研究を行うにあたりご協力頂いた，田口亮准教授をはじめとする梅崎・田口研究室関係者各氏に深謝いたします。研究に対して様々なご協力を頂いた中部大学 保黒政大教授，服部公央亮講師，合同会社3Dragons 堀米秀嘉氏に感謝いたします。

本研究の一部は，経済産業省戦略的基盤技術高度化支援事業「航空機主翼組み立てにおけるファスナ装着状態の革新的な検査技術の開発」の補助金助成を受けたものであり，(株)エアロ，あいち産業科学技術総合センターの皆様にも感謝いたします。

また，計測実験用のSi製基準器をご作成頂いた名古屋工業大学 江龍修教授に深謝いたします。修士課程において貴重な意見を頂きました元名古屋工業大学 中村隆教授にも感謝いたします。

参考文献

- [1] 吉澤徹, 最新光三次元計測. 朝倉書店, 2006.
- [2] 塚原博之, “生産分野における3次元計測技術,” *雑誌FUJITSU*, vol. 56, no. 6, pp. 565–572, 2005.
- [3] 肥塚哲男, “FA用マシンビジョンにおけるパターン計測と実応用,” 計測と制御, vol. 53, no. 7, pp. 557–562, 2014.
- [4] S. K. Nayar and Y. Nakagawa, “Shape from focus,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 16, no. 8, pp. 824–831, 1994.
- [5] M. Minsky, “Memoir on inventing the confocal scanning microscope,” *Scanning*, vol. 10, no. 4, pp. 128–138, 1988.
- [6] J. . Posdamer and M. . Altschuler, “Surface measurement by space-encoded projected beam systems,” *Comput. Graph. Image Process.*, vol. 18, no. 1, pp. 1–17, Jan. 1982.
- [7] 佐藤宏介 and 井口征士, “空間コード化による距離画像入力,” *電子情報通信学会論文誌 D*, vol. J68–D, no. 3, pp. 369–375, 1985.
- [8] D. Malacara, *Optical Shop Testing*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [9] F. Twyman, “Interferometers for the experimental study of optical systems from the point of view of the wave theory,” *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, vol. 35, no. 205, pp. 49–58, 1918.
- [10] 山田朝治 and 横関俊介, モアレ縞・干渉縞応用計測法. コロナ社, 1996.
- [11] 海上泰生, “航空機産業にみられる部品供給構造の特異性,” 日本政策金融公庫論集, vol. 11, pp. 21–46, 2011.
- [12] 海上泰生, “航空機産業における部品供給構造と参入環境の実態,” 日本公庫総研レポート, 2011.
- [13] 山本匡毅, “日本における航空機産業の動向と新規参入に向けた展開,” 機械経済研究, no. 42, pp. 43–57, 2009.
- [14] 徳村龍一, “航空機における部品・材料の非破壊検査技術の適用,” 月刊トライポロジー, vol. 26, no. 3, pp. 42–44, Mar-2012.
- [15] R. Bogue, “The growing use of robots by the aerospace industry,” *Ind. Robot An Int. J.*, p. IR-08-2018-0160, Oct. 2018.
- [16] 山本和男, “航空機における複合材利用と新たな雷害対策技術,” *電気学会論文誌 B*, vol. 133, no. 9, pp. 690–693, 2013.
- [17] B. Lepetit, I. Revel, G. Peres, L. Andrivet, and F. Flourens, “In-strike dynamical measurements of contact resistances,” in *2010 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 2010, vol. 2010, pp. 1–4.
- [18] S. Evans *et al.*, “An introduction to a new aerospace lightning direct effects research programme and the significance of Zone 2A waveform components on sparking joints,” in *2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 2016, pp. 1–6.

- [19] K. Creath, "Comparison Of Phase-Measurement Algorithms," in *Surface Characterization and Testing*, 1987, vol. 680, pp. 19–28.
- [20] K. Kinnstaetter, A. W. Lohmann, J. Schwider, and N. Streibl, "Accuracy of phase shifting interferometry," *Appl. Opt.*, vol. 27, no. 24, pp. 5082–5089, Dec. 1988.
- [21] A. Babaei, M. Saadatseresht, and J. Kofman, "Exponential fringe pattern projection approach to gamma-independent phase computation without calibration for gamma nonlinearity in 3D optical metrology," *Opt. Express*, vol. 25, no. 21, pp. 24927–24938, Oct. 2017.
- [22] L. L. Deck, "Model-based phase shifting interferometry," *Appl. Opt.*, vol. 53, no. 21, pp. 4628–4636, 2014.
- [23] J. Vargas, J. A. Quiroga, and T. Belenguer, "Phase-shifting interferometry based on principal component analysis," *Opt. Lett.*, vol. 36, no. 8, pp. 1326–1328, Apr. 2011.
- [24] K. Yatabe, K. Ishikawa, and Y. Oikawa, "Simple, flexible, and accurate phase retrieval method for generalized phase-shifting interferometry," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 34, no. 1, p. 87, Jan. 2017.
- [25] K. Yatabe, K. Ishikawa, and Y. Oikawa, "Hyper ellipse fitting in subspace method for phase-shifting interferometry: practical implementation with automatic pixel selection," *Opt. Express*, vol. 25, no. 23, p. 29401, Nov. 2017.
- [26] J. Li *et al.*, "Simultaneous phase-shifting dual-wavelength interferometry based on independent component analysis," *Appl. Opt.*, vol. 56, no. 13, pp. 3673–3678, May 2017.
- [27] 佐藤宏介 and 横矢直和, "測定手法の種類と基本原理-能動的手法を中心として-," *計測と制御*, vol. 34, no. 6, pp. 435–439, 1995.
- [28] 吉澤徹, *三次元工学2 光三次元・産業への応用*. アドコム・メディア株式会社, 2008.
- [29] J. Sell and P. O'Connor, "The Xbox One System on a Chip and Kinect Sensor," *IEEE Micro*, vol. 34, no. 2, pp. 44–53, Mar. 2014.
- [30] G. Q. Xiao, T. R. Corle, and G. S. Kino, "Real-time confocal scanning optical microscope," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 53, no. 8, pp. 716–718, Aug. 1988.
- [31] 石原満宏 and 佐々木博美, "非走査マルチビーム共焦点撮像系による高速三次元計測," *精密工学会誌*, vol. 64, no. 7, pp. 1022–1028, 1998.
- [32] E. Hase *et al.*, "Scan-less confocal phase imaging based on dual-comb microscopy," *Opt. Opt.*, vol. 5, no. 5, pp. 634–643, 2018.
- [33] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, vol. 136, no. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [34] A. A. Michelson, "On the Correction of Optical Surfaces," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 4, no. 7, pp. 210–212, 1918.
- [35] J. Schwider, R. Burow, K.-E. Elssner, J. Grzanna, R. Spolaczyk, and K. Merkel, "Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources," *Appl. Opt.*, vol. 22, no. 21, pp. 3421–3432, 1983.
- [36] J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White, and D. J. Brangaccio, "Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses," *Appl. Opt.*, vol. 13, no. 11, pp. 2693–2703, 1974.

- [37] J. E. Greivenkamp, "Generalized Data Reduction For Heterodyne Interferometry," *Opt. Eng.*, vol. 23, no. 4, pp. 350–352, 1984.
- [38] M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 72, no. 1, pp. 156–160, 1982.
- [39] Y. Morimoto and M. Fujisawa, "Fringe pattern analysis by a phase-shifting method using Fourier transform," *Opt. Eng.*, vol. 33, no. 11, pp. 3709–3714, Nov. 1994.
- [40] R. Mumtaz, M. Mumtaz, A. B. Mansoor, and H. Masood, "Computer Aided Visual Inspection of Aircraft Surfaces," *Int. J. Image Process.*, vol. 6, no. 1, pp. 38–53, 2012.
- [41] I. Jandejsek *et al.*, "X-ray inspection of composite materials for aircraft structures using detectors of Medipix type," *J. Instrum.*, vol. 9, no. 05, pp. C05062–C05062, 2014.
- [42] M. Mumtaz, A. Bin Mansoor, and H. Masood, "A New Approach to Aircraft Surface Inspection Based on Directional Energies of Texture," in *2010 20th International Conference on Pattern Recognition*, 2010, pp. 4404–4407.
- [43] H. Wang, Z. Xiong, A. M. Finn, and Z. Chaudhry, "A context-driven approach to image-based crack detection," *Mach. Vis. Appl.*, vol. 27, no. 7, pp. 1103–1114, 2016.
- [44] M. Siegel and P. Gunatilake, "Remote Enhanced Visual Inspection of Aircraft by a Mobile Robot," *IEEE Work. Emerg. Technol. Intell. Meas. Visual Syst. Instrum. Meas.*, pp. 1–10, 1998.
- [45] Y. Deng, X. Liu, Y. Fan, Z. Zeng, L. Udpa, and W. Shih, "Characterization of Magneto-Optic Imaging Data for Aircraft Inspection," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 10, pp. 3228–3230, Oct. 2006.
- [46] M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos, "Snakes: Active contour models," *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 1, no. 4, pp. 321–331, Jan. 1988.
- [47] M. a Fischler and R. C. Bolles, "Random sample consensus: Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography," *Commun. ACM*, vol. 24, no. 6, pp. 381–395, 1981.
- [48] 森本吉春, 松井徹, and 藤垣元治, "光干渉縞や投影格子の波形の位相を用いた三次元形状・変形計測," *情報処理学会論文誌*, vol. 47, no. SIG 5, pp. 10–19, 2006.
- [49] 傳田壮志, 大橋健, and 江島俊朗, "位相シフト法を用いた高速な3次元計測手法の提案," *電子情報通信学会技術研究報告*, vol. 99, no. 515, pp. 43–50, 1999.
- [50] 塚本壮輔, 古賀和利, and 三池秀敏, "階層化位相シフト法による高精度な奥行き計測," *電子情報通信学会論文誌D-II*, vol. J83–D–II, no. 9, pp. 1962–1965, 2000.
- [51] 塚本壮輔, 呉本堯, 古賀和利, and 三池秀敏, "階層化位相シフト法による高性能レンジファインダの実現," *画像電子学会誌*, vol. 30, no. 4, pp. 388–396, 2001.
- [52] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 22, no. 11, pp. 1330–1334, 2000.

- [53] 藤垣元治 and 森本吉春, “全空間テーブル化手法による格子投影3次元形状計測,” 実験力学, vol. 8, no. 4, pp. 402–408, 2008.
- [54] V. Caselles, F. Catté, T. Coll, and F. Dibos, “A geometric model for active contours in image processing,” *Numer. Math.*, vol. 66, no. 1, pp. 1–31, Dec. 1993.
- [55] R. Malladi, J. A. Sethian, and B. C. Vemuri, “Shape modeling with front propagation: a level set approach,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 17, no. 2, pp. 158–175, 1995.
- [56] Y. Y. Boykov and M.-P. Jolly, “Interactive graph cuts for optimal boundary & region segmentation of objects in N-D images,” in *Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001*, 2001, vol. 1, no. July, pp. 105–112.
- [57] Y. Boykov and G. Funka-Lea, “Graph Cuts and Efficient N-D Image Segmentation,” *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 70, no. 2, pp. 109–131, Nov. 2006.
- [58] 永橋知行, 藤吉弘亘, and 金出武雄, “Image segmentation using iterated graph cuts based on multi-scale smoothing,” 情報処理学会論文誌 コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), vol. 1, no. 2, pp. 10–20, 2008.
- [59] 大槻真左文 and 北川克一, “半導体・液晶プロセスにおける光干渉計測の応用,” 計測と制御, vol. 50, no. 2, pp. 132–137, 2011.
- [60] K. Kitagawa, “Thin-film thickness profile measurement by three-wavelength interference color analysis,” *Appl. Opt.*, vol. 52, no. 10, pp. 1998–2007, Apr. 2013.
- [61] K. Creath, “Phase-shifting speckle interferometry,” *Appl. Opt.*, vol. 24, no. 18, pp. 3053–3058, 1985.
- [62] K. Creath, “Phase-Shifting Holographic Interferometry,” in *Springer Series in Optical Sciences*, vol. 68, 1994, pp. 109–150.
- [63] R. Crane, “Interference phase measurement,” *Appl. Opt.*, vol. 8, no. 3, pp. 538–542, 1969.
- [64] B. O and W. F, “Digital Holography – Computer Generated Holograms,” in *Progress in Optics*, vol. 28, 1990, pp. 1–86.
- [65] J. C. Wyant, “White Light Extended Source Shearing Interferometer,” *Appl. Opt.*, vol. 13, no. 1, pp. 200–202, 1974.
- [66] K. Kitagawa, “Surface and thickness profile measurement of a transparent film by three-wavelength vertical scanning interferometry,” *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 14, pp. 4172–4175, Jul. 2014.
- [67] M. E. Pawłowski, Y. Sakano, Y. Miyamoto, and M. Takeda, “Phase-crossing algorithm for white-light fringes analysis,” *Opt. Commun.*, vol. 260, no. 1, pp. 68–72, Apr. 2006.
- [68] 武田光夫, “サブフリンジ干渉計測基礎論,” 光学, vol. 13, no. 1, pp. 55–65, 1984.
- [69] 武田光夫 and 稲秀樹, “高速フーリエ変換による立体計測と干渉計測,” 光学, vol. 10, no. 6, pp. 476–480, 1981.
- [70] G. Popescu, Y. Park, R. R. Dasari, K. Badizadegan, and M. S. Feld, “Coherence properties of red blood cell membrane motions,” *Phys. Rev. E*, vol. 76, no. 3, p. 031902, Sep. 2007.

- [71] K. Kim, K. S. Kim, H. Park, J. C. Ye, and Y. Park, "Real-time visualization of 3-D dynamic microscopic objects using optical diffraction tomography," *Opt. Express*, vol. 21, no. 26, pp. 32269–32278, Dec. 2013.
- [72] P. Carré, "Installation et utilisation du comparateur photoélectrique et interférentiel du Bureau International des Poids et Mesures," *Metrologia*, vol. 2, pp. 13–23, 1966.
- [73] J. Schwider, "New compensating four-phase algorithm for phase-shift interferometry," *Opt. Eng.*, vol. 32, no. 8, pp. 1883–1885, 1993.
- [74] J. C. Wyant, "Use of an ac heterodyne lateral shear interferometer with real-time wavefront correction systems," *Appl. Opt.*, vol. 14, no. 11, pp. 2622–2626, Nov. 1975.
- [75] 安達正明, 佐部田龍佳, and 丹羽康人, "振動下で撮影された光干渉像を用いた高精度3次元形状計測," 精密工学会誌, vol. 78, no. 12, pp. 1076–1081, 2012.
- [76] P. de Groot, "Phase-shift calibration errors in interferometers with spherical Fizeau cavities," *Appl. Opt.*, vol. 34, no. 16, pp. 2856–2863, Jun. 1995.
- [77] P. J. de Groot, "Vibration in phase-shifting interferometry," *J. Opt. Soc. Am. A Opt. Image Sci. Vis.*, vol. 12, no. 2, pp. 354–365, 1995.
- [78] L. L. Deck, "Suppressing phase errors from vibration in phase-shifting interferometry," *Appl. Opt.*, vol. 48, no. 20, pp. 3948–3960, 2009.
- [79] L. Deck, "Vibration-resistant phase-shifting interferometry," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 34, pp. 6655–6662, 1996.
- [80] S. Ri, "Phase reliability evaluation in phase-shifting method using Fourier transform for shape measurement," *Opt. Eng.*, vol. 44, no. 8, p. 083601, Aug. 2005.
- [81] P. J. de Groot and L. L. Deck, "Numerical simulations of vibration in phase-shifting interferometry," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 13, pp. 2172–2178, May 1996.
- [82] Z. Wang and B. Han, "Advanced iterative algorithm for phase extraction of randomly phase-shifted interferograms," *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 14, pp. 1671–1673, 2004.
- [83] Z. Wang and B. Han, "Advanced iterative algorithm for randomly phase-shifted interferograms with intra- and inter-frame intensity variations," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 45, no. 2, pp. 274–280, 2007.
- [84] 野坂健一郎, 荒木秀和, and 中原智治, "位相シフト法インライン3次元外観検査システム," パナソニック電工技報, vol. 57, no. 3, pp. 29–34, 2009.
- [85] J. Schwider, "Detection of undersampling from measured phase-shifting data," *Opt. Lett.*, vol. 19, no. 3, pp. 231–233, 1994.
- [86] C. P. Brophy, "Effect of intensity error correlation on the computed phase of phase-shifting interferometry," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 7, no. 4, pp. 537–541, 1990.
- [87] Gustafsson, Agard, and Sedat, "I5M: 3D widefield light microscopy with better than 100 nm axial resolution," *J. Microsc.*, vol. 195, no. 1, pp. 10–16, Jul. 1999.
- [88] K. J. Gåsvik, *Optical Metrology*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2002.

- [89] Q. Yu, 田口亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, and 梅崎太造, “位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測システムの開発,” *電気学会論文誌C*, vol. 99, no. 1, pp. 3–11, 2016.
- [90] L. Y. Chen and D. W. Lynch, “Scanning ellipsometer by rotating polarizer and analyzer,” *Appl. Opt.*, vol. 26, no. 24, pp. 5221–5228, 1987.
- [91] Y. Barseghyan and H. Sarukhanyan, “Laplacian Based LF Quality Map for Phase Reconstruction,” in *Computer Science and Information Technologies*, 2009, no. 4, pp. 2–5.
- [92] D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, *Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software*, vol. 4. Wiley New York, 1998.
- [93] D. Malacara, M. Carpio-Valadez, and J. J. Sanchez-Mondragon, “Wavefront fitting with discrete orthogonal polynomials in a unit radius circle,” *Opt. Eng.*, vol. 29, no. 6, pp. 672–675, 1990.
- [94] M. Ares and S. Royo, “Comparison of cubic B-spline and Zernike-fitting techniques in complex wavefront reconstruction,” *Appl. Opt.*, vol. 45, no. 27, pp. 6954–6964, 2006.
- [95] J. Wang and I. Grant, “Electronic speckle interferometry, phase-mapping, and nondestructive testing techniques applied to real-time, thermal loading,” *Appl. Opt.*, vol. 34, no. 19, pp. 3620–3627, Jul. 1995.
- [96] C. T. Farrell and M. A. Player, “Phase-step insensitive algorithms for phase-shifting interferometry,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 6, pp. 648–654, Jun. 1994.
- [97] J. Vargas and C. O. S. Sorzano, “Quadrature Component Analysis for interferometry,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 51, no. 5, pp. 637–641, May 2013.
- [98] K. Yatabe, K. Ishikawa, and Y. Oikawa, “Improving principal component analysis based phase extraction method for phase-shifting interferometry by integrating spatial information,” *Opt. Express*, vol. 24, no. 20, pp. 22881–22891, 2016.
- [99] K. Kanatani and P. Rangarajan, “Hyper least squares fitting of circles and ellipses,” *Comput. Stat. Data Anal.*, vol. 55, no. 6, pp. 2197–2208, Jun. 2011.
- [100] K. Kanatani, P. Rangarajan, Y. Sugaya, and H. Niitsuma, “HyperLS for Parameter Estimation in Geometric Fitting,” *IPSJ Trans. Comput. Vis. Appl.*, vol. 3, pp. 80–94, 2011.
- [101] K. Kanatani, A. Al-Sharadqah, N. Chernov, and Y. Sugaya, “Hyper-renormalization: Non-minimization approach for geometric estimation,” *IPSJ Trans. Comput. Vis. Appl.*, vol. 6, pp. 143–159, 2014.
- [102] A. Albertazzi Jr., A. Fantin, M. Benedet, D. Willemann, and A. Maia, “Performance evaluation of a phase retrieval algorithm from sequences of interferograms with unknown phase shifts using generalized N-dimensional Lissajous figures,” *Interferom. XVII Tech. Anal.*, vol. 9203, p. 92030O, 2014.
- [103] A. Albertazzi, M. R. Viotti, C. L. N. Veiga, and A. V. Fantin, “A non-linear piezoelectric actuator calibration using N-dimensional Lissajous figure,” *Interferom. XVIII*, vol. 9960, p. 99600L, 2016.
- [104] W. Zhang, X. Lu, C. Luo, L. Zhong, and J. Vargas, “Principal component analysis based simultaneous dual-wavelength phase-shifting interferometry,” *Opt. Commun.*, vol. 341, pp. 276–283, 2015.

- [105] A. Hyvärinen and E. Oja, "A Fast Fixed-Point Algorithm for Independent Component Analysis," *Neural Comput.*, vol. 9, no. 7, pp. 1483–1492, Oct. 1997.
- [106] A. Hyvärinen, "Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis," *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 10, no. 3, pp. 626–634, May 1999.
- [107] A. Hyvärinen, J. Karhunen, and E. Oja, *Independent Component Analysis*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2001.

研究業績一覧

学術論文（査読あり） 主：2，副：1

- [1] 鷺見典克, 田口亮, 服部公央亮, 保黒政大, 梅崎太造, “三次元計測を用いた航空機用ファスナの自動外観検査システム”, 精密工学会誌, Vol.81, No.12, pp.1140-1145, 2015.
- [2] 鷺見典克, 服部公央亮, 田口亮, 保黒政大, 梅崎太造, 堀米秀嘉, “位相シフト法における位相信頼性評価手法”, 精密工学会誌, Vol.82, No.12, pp.1078-1084, 2016.
- [3] 西郷知泰, 服部公央亮, 堀米秀嘉, 鷺見典克, 保黒政大, 田口亮, 梅崎太造, “ホログラフィック光学素子を用いた光沢物体の表面法線方向の角度測定”, 精密工学会誌, (掲載決定), 2018.

国際会議（査読あり） 主：2，副：0

- [4] Norikatsu Sumi, Koosuke Hattori, Masahiro Hoguro, Ryo Taguchi, Taizo Umezaki, Hideyoshi Horimai, “Phase Reliability Evaluation Method using Correlation Between Amplitude and Object Image”, Frontier of Computer Vision, pp.187-190, 2016.
- [5] Norikatsu Sumi, Koosuke Hattori, Ryo Taguchi, Masahiro Hoguro, Taizo Umezaki, Hideyoshi Horimai, “Phase reliability evaluation method using correlation function”, OSA Imaging and Applied Optics Congress 2016 (3D, Ao, AIO, COSI, DH, IS, LACSEA, MATH), JW4A.48, 2016.

国際会議（査読なし） 主：0，副：1

- [6] Takashi Hirayama, Daisuke Saisho, Yoko Ikeda, Jun Ito, Norikatsu Sumi, Koosuke Hattori, Tsuji Hiroyuki, Taizo Umezaki, Keiichi Mochida, “Data driven crop design technology”, Taiwan-Japan Plant Biology 2017, pp.345, 2017.

シンポジウム・研究会（査読あり） 主：8，副：11

- [7] 鷺見典克，田口亮，鈴木貴大，ウキエツ，保黒政大，梅崎太造，西村憲治，“位相シフト法を用いた航空機主翼用ファスナの自動検査”，SSII (Symposium on Sensing via Image Information), IS1-30, pp.IS1-30-1 – IS1-30-6, 2014.
- [8] 鈴木貴大，田口亮，鷺見典克，ウキエツ，保黒政大，梅崎太造，神尾弘哉，“位相シフト法を用いた車両外観検査装置の開発”，SSII (Symposium on Sensing via Image Information), IS1-33, pp.IS1-33-1 – IS1-33-6, 2014.
- [9] 鷺見典克，田口亮，服部公央亮，保黒政大，梅崎太造，“打刻印字にロバストな航空機ファスナ部の三次元形状検査”，ViEW (Vision Engineering Workshop), IS1-6, 2014.
- [10] 鷺見典克，服部公央亮，ウキエツ，田口亮，保黒政大，堀米秀嘉，梅崎太造，“ワンショットデジタルホログラフィによる生体組織の精密三次元計測”，第54回 日本生体医工学会大会, P2-3-1-E, 2015.
- [11] 鷺見典克，田口亮，服部公央亮，保黒政大，梅崎太造，堀米秀嘉，“デジタルホログラフィによるフーリエ変換位相シフト法を用いたナノオーダ三次元計測”，ViEW (Vision Engineering Workshop), IS1-19, 2015.
- [12] 高橋直也，鷺見典克，田口亮，服部公央亮，保黒政大，梅崎太造，“粗密探索法を用いた合焦法による半透明物体に対する三次元計測”，ViEW(Vision Engineering Workshop), OS2-H3(IS1-15), 2015.
- [13] 鷺見典克，服部公央亮，田口亮，保黒政大，梅崎太造，堀米秀嘉，“位相シフト法における位相信頼性評価法の検討”，DIA (Dynamic Image processing for real Application), OS4-2, 2016.
- [14] 鷺見典克，服部公央亮，田口亮，保黒政大，梅崎太造，堀米秀嘉，“光干渉計測における振動に対してロバストな位相推定手法の検討”，ViEW (Vision Engineering Workshop), IS2-31, pp.438-443, 2016.
- [15] 武笠公亮，鷺見典克，服部公央亮，保黒政大，田口亮，梅崎太造，丹羽祐平，“KAZEと極座標サンプリングを用いた指紋認証手法の検討”，ViEW (Vision Engineering Workshop), IS2-31, pp.438-443, 2016.

- [16] 村本峻介, 加藤嗣, 野村安國, 鷺見典克, 服部公央亮, 梅崎太造, “3階層ニューラルネットワークを用いた表面色および表面形状の異なるチップ型電子部品の不良判別手法の検討”, DIA (Dynamic Image processing for real Application), IS1-3, pp.90-93, 2017.
- [17] 武笠公亮, 鷺見典克, 服部公央亮, 保黒政大, 田口亮, 梅崎太造, 奥村健太, “KAZEと極座標サンプリングによる指紋認証法に対する前処理の検討”, DIA (Dynamic Image processing for real Application), IS1-18, pp.168-172, 2017.
- [18] 鷺見典克, 服部公央亮, 最相大輔, 田口亮, 保黒政大, 平山隆志, 梅崎太造, “多視点カメラを用いたオオムギ生長度合いの推定”, ViEW (Vision Engineering Workshop), IS2-B2, pp.393-398, 2017.
- [19] 武笠公亮, 鷺見典克, 服部公央亮, 保黒政大, 田口亮, 梅崎太造, “IR画像による虹彩認証手法の検討”, ViEW (Vision Engineering Workshop), pp.359-364, IS2-A5, 2017.
- [20] 廣野裕太, 鷺見典克, 服部公央亮, 田口亮, 保黒政大, 梅崎太造, 山城浩昭, 西田隼人, “Active Shape Modelを用いた電子部品の形状不良判別の検討”, DIA (Dynamic Image processing for real Application), IS1-1, pp.50-53, 2018.
- [21] 近藤友貴, 鷺見典克, 田口亮, 服部公央亮, 保黒政大, 梅崎太造, “ヒューマン-ロボットインタラクションのための指差し方向の推定”, DIA (Dynamic Image processing for real Application), IS1-27, pp.188-193, 2018.
- [22] 松井悠, 鷺見典克, 服部公央亮, 田口亮, 保黒政大, 最相大輔, 梅崎太造, 平山隆志, “IR画像のセグメンテーションによるオオムギの生長度合いの推定”, DIA (Dynamic Image processing for real Application), IS2-3, pp.273-278, 2018.
- [23] 加藤有祐, 鷺見典克, 服部公央亮, 田口亮, 保黒政大, 最相大輔, 梅崎太造, 平山隆志, “セマンティックセグメンテーションを用いたオオムギ領域の抽出”, DIA (Dynamic Image processing for real Application), OS5-3, pp.252-257, 2018.
- [24] 加藤翔大, 鷺見典克, 服部公央亮, 保黒政大, 田口亮, 梅崎太造, “指紋・指静脈を用いた複合認証装置の試作”, SSII (Symposium on Sensing via Image Information), IS1-13, 2018.

- [25] 鷺見典克, 服部公央亮, 保黒政大, 田口亮, 梅崎太造, “独立成分分析を用いた二波長位相シフト干渉計におけるロバスト計測”, ViEW (Vision Engineering Workshop), OS3-H3(IS2-C5), (掲載決定), 2018.

シンポジウム・研究会（査読なし） 主：1，副：2

- [26] 鷺見典克, 田口亮, 服部公央亮, 保黒政大, 梅崎太造, “航空機主翼部ファスナに対する画像と形状データを用いた自動検査”, FIT(情報科学技術フォーラム), H-036, pp.147-148, 2014.
- [27] 加藤有祐, 鷺見典克, 服部公央亮, 田口亮, 保黒政大, 最相大輔, 梅崎太造, 平山隆志, “DNNを用いたオオムギ領域の抽出および生長推定への活用”, FIT (情報科学技術フォーラム), H-010, pp.109-110, 2018.
- [28] 加藤翔大, 鷺見典克, 服部公央亮, 田口亮, 保黒政大, 梅崎太造, “指紋・指静脈を用いた多要素認証装置の開発”, FIT (情報科学技術フォーラム), H-019, pp.127-128, 2018.

口頭発表（査読なし） 主：1，副：4

- [29] 鷺見典克, 田口亮, 梅崎太造, 服部公央亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, “位相シフトデジタルホログラフィに対する位相計算の高速化に関する検討”, 平成27年度電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会, O2-2, 2015.
- [30] 高橋直也, 鷺見典克, 田口亮, 梅崎太造, 服部公央亮, 保黒政大, “画像ピラミッドを用いた合焦法による生米の三次元計測”, 平成27年度電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会, M1-3, 2015.
- [31] 高橋直也, 鷺見典克, 田口亮, 梅崎太造, 服部公央亮, 保黒政大, “パターン投影と合焦法を組み合わせた三次元計測法の検討”, 平成28年度電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会, D2-5, 2016.
- [32] 近藤友貴, 鷺見典克, 田口亮, 梅崎太造, 服部公央亮, 保黒政大, “Pepperとの指差しを用いたインタラクションに向けた検討”, 平成29年度電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会, G4-1, 2017.

- [33] Daisuke Saisho, **Norikatsu Sumi**, Koosuke Hattori, Yoko Ikeda, Keiichi Mochida, Taizo Umezaki, Takashi Hirayama, “Field Crop Data Acquisition for the Data Driven Crop Design Technology”, 第59回 日本植物生理学会年会, P-415, 2018.

表彰

- [34] 名古屋工業大学 平成27年度名古屋工業大学学生表彰（学術活動部門）
学長表彰
- [35] 動的画像処理実利用化ワークショップ2016 研究奨励賞
- [36] 日本生体医工学会 平成27年度 研究奨励賞・阿部賞
- [37] 名古屋工業大学 平成28年度名古屋工業大学学生表彰（学術活動部門）
副学長表彰