

産業用装置の位置合わせ機能に特化した符号化開口の最適化

作山努^{†1} 船富卓哉^{†2} 飯山将晃^{†2} 美濃導彦^{†2}

逆畳み込みによる合焦画像の推定は、符号化開口を実装することで、精度よく行える。先行研究で提案されている符号化開口は、自然画像のパワースペクトルモデルを評価式に導入し、その式によって最適化されていた。しかし、位置合わせ用画像を撮影する産業用装置にその先行研究の符号化開口を適用しても、そのパワースペクトルは自然画像と異なるため、十分な精度で合焦画像の推定ができない場合がある。そこで本研究では、位置合わせ用画像のパワースペクトルを符号化開口の評価式に導入することで、その復元に適した符号化開口の最適化を行った。この最適化した符号化開口を適用したとき、最適化に用いた特定種類の画像の推定が先行研究よりも精度よく行うことができた。

Optimization of Coded Aperture mask for alignment in industrial machinery

TSUTOMU SAKUYAMA^{†1} TAKUYA FUNATOMI^{†2} MASAOKI IYAMA^{†2}
MICHIIHIKO MINOH^{†2}

The camera equipped with a coded aperture can accurately recover the target scene from a defocused image by deconvolution technique. Previous study has reported an aperture pattern that was optimized based on the power spectrum of natural images. However, the aperture sometimes provides insufficient accuracy in recovering images for alignment in an industrial machinery. In this paper, we have introduced the power spectrum of the alignment images to optimize the aperture pattern. Our aperture could recover the target scene from the defocused alignment images with higher accuracy than that of the previous study.

1. はじめに

半導体ウェハやプリント基板、液晶パネルのパターンを検査する装置には位置合わせの機能が搭載されている。この機能は、検査材料の位置を検出し、その材料の位置を検査装置にフィードバックするものである。検査装置はフィードバックされた位置情報に応じてパターンを検査を行う。この機能の具体的な処理の一例を示す。まず、検査装置に、検査材料が設置される。次に、位置合わせ用にあらかじめ描画された所定のパターン（以下、アライメントマークと呼称）を含む領域を撮影する。さらに、あらかじめ用意されたテンプレートと撮影画像とのパターンマッチング等を行い、画像中のアライメントマークを検出する。最後に、検出されたマークの位置情報を用いて、処理対象物の形状変化や、位置決め誤差を算出し、その誤差を吸収するように装置が検査を行う。一般的に位置合わせ機能で用いられるカメラにはオートフォーカスが搭載されているが、そのオートフォーカスも失敗することがある。このとき、非合焦画像が撮影され、アライメントマークの検出に失敗する。その結果、検査装置は設計された描画パターンを適切に検査できなくなり、不良品の見落としが発生する。この非合焦画像が撮影される問題に対処する一手法として、逆畳み込みによる画像復元が挙げられる[1]。

画像復元は、撮影した非合焦画像と、その画像のぼけ方

を示す点広がり関数（PSF:Point Spread Function）の逆畳み込みを行うことで、合焦画像を推定する技術である。この逆畳み込みの演算は、非合焦画像、PSFをそれぞれフーリエ変換して、周波数空間上で行う。もし位置合わせ機能でオートフォーカスに失敗しても、画像復元によって、十分な精度で合焦画像が推定できれば、アライメントマークを正しく検出できる。ただし、一般的なカメラの場合、PSFの周波数分布に多くのゼロ交差を持つことが原因で、安定して合焦画像の推定が行えないことが知られている[2]。

この問題を解決する手法として、符号化撮影が提案されている[3]。符号化撮影は、ハードウェアの工夫により、PSFを制御することで、画像処理のみでは不安定であった距離推定問題や画像復元問題の解を、より安定して求められるようにする方法である。光学の分野では、PSFはカメラのレンズ特性や開口の形状により決定されることが知られている。この特徴を活かして、符号化撮影の中でも、カメラの開口を変更して、PSFの制御を行う研究がある[4][5][6][7]。このとき用いられる開口は符号化開口と呼ばれ、目的に応じて様々な形状が提案されている。例えば、天文学の分野ではMURAコード[4]と呼ばれる符号化開口が提案されている。一方、自然画像の分野では、Zhouら[5]やVeeraraghavanら[6]、Levinら[7]によってそれぞれ異なるアプローチで符号化開口が提案されている。しかし、位置合わせ装置にこれらの符号化開口を適用しても、十分な精度で合焦画像の推定ができない場合がある。

そこで、アライメントマーク画像のパワースペクトルを導入した符号化開口の評価式を用いることで、それらの画

^{†1} 大日本スクリーン製造株式会社
Dainippon Screen Mfg. Co., Ltd.
^{†2} 京都大学
Kyoto University

像の復元に適した符号化開口を設計した。本稿では、この設計した符号化開口を適用して画像復元を行い、位置合わせの精度を評価し、推定した合焦画像が位置合わせ装置に必要十分な画質であることを示す。

2. 産業用装置の位置合わせ機能

半導体や液晶、プリント基板の各種検査装置の検査工程において、検査材料の反り、あるいは、熱や研磨による前工程（下地となるパターンを描画材料にあらかじめ描画しておく工程）でのずれや歪みが発生し、設計と異なる位置にパターンが描画されている場合がある。これを吸収しなければ十分な検査品質が得られないことがある。そこで、アライメントマークと呼ばれるパターンの撮影を行い、検査材料の歪みを検出し、検査する位置を決定する。この一連の処理による位置合わせ機能を用いない場合、設計上の描画パターンと実際の描画パターンの比較ができず、検査性能が低下する（図1）。

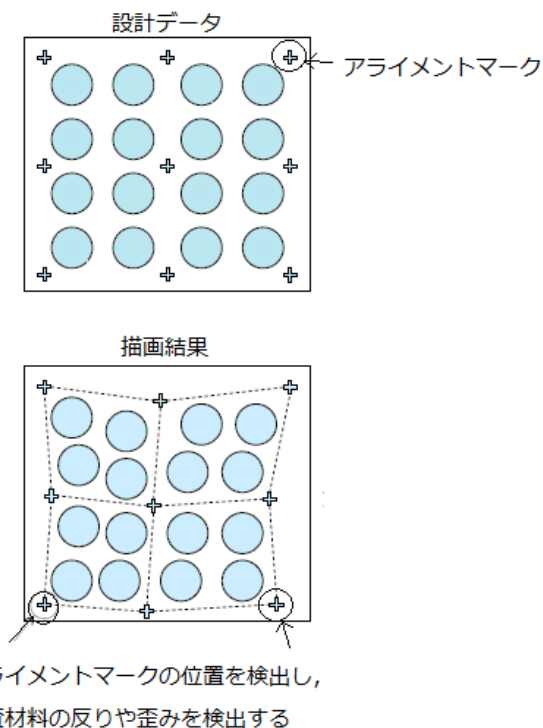


図1 検査装置の位置合わせ機能概要

アライメントマークは前工程で描画されたパターンが用いられるが、その形は様々である。また、アライメントマークとして撮影されたパターンではなく、回路として設計された部分の中で特徴的な部分をアライメントマークとして用いることもある。図2に、アライメントマーク画像の模式図を示す。



図2 アライメントマークの模式図

通常、位置合わせ機能でアライメントマークを撮影する装置にはオートフォーカスが搭載されているが、何らかの原因によりオートフォーカスに失敗すると、非合焦画像が得られ、設計されたパターンが検査できなくなる。

現状の要求は、この位置合わせ機能においてオートフォーカスを行う範囲で、非合焦画像が得られても0.5pixel以下の誤差でアライメントマーク検出ができるようにすることである。また、追加で許される処理時間は最小限とする。本稿では、この条件を満たしながら、問題へ対処する方法として画像復元を用いることを提案する。

3. 関連研究

3.1 画像復元

一般的に非合焦画像が撮影される現象は(1)式で表現される。

$$i = i_0 \otimes k + n \quad (1)$$

ここで、 i は非合焦画像、 i_0 は合焦画像、 k はぼけ関数(PSF)、 n はノイズ成分である。(1)式をフーリエ変換によって周波数領域で表現すると(2)式が得られる。

$$I = I_0 \cdot K + N \quad (2)$$

非合焦画像及びPSFは撮影装置によってそれぞれ実測できるため、 I と K は既知である。さらに、ノイズ成分 N が既知であれば、(3)式により合焦画像の周波数画像 \hat{I}_0 を推定することができる。

$$\hat{I}_0 = \frac{J}{K} = I + \frac{N}{K} \quad (3)$$

しかし(3)式からわかるように、もし K の一部にゼロまたは小さい値を含むとき、 \hat{I}_0 は発散もしくは不安定な解になる。また(3)式の右項が示すように、除算によって画像のノイズ成分が強調されてしまう[3]。これを抑制する方法として、様々なデコンボリューション手法が提案されている。その中でも、(4)式に示すウィナーフィルタを用いることが一般的である[8]。

$$\hat{I}_0 = \frac{I \cdot \bar{K}}{|K|^2 + |C|^2} \quad (4)$$

$|C|^2$ は NSR (Noise-to-Signal Ratios) 比を示し、 $|\sigma/\hat{I}_0|^2$ と定義される。また、 σ は撮影画像 I に含まれるノイズの標準偏差である。ただし、(4) 式を用いても完全にリングングを抑制できないことがあるため、十分な精度で焦点画像を推定できない場合がある。よって、画像復元の際に生じる、リングングに対する様々な対策が提案されている。

リングングの一因は撮影画像に含まれるノイズであるため、そのノイズを画像復元処理の前にフィルタ処理によって除去する手法が提案されている[9][10][11]。一方、井下ら[2]は、画像復元後に発生したリングングを検出し、そのリングングだけを推定した合焦画像から除去する方法を提案している。しかし、これらの手法を採用した場合、画像復元の他にノイズへ対処するための計算処理を行う必要がある。よって、処理時間を最小限にするという今回の要求には不向きであると考えられる。

上述のように追加の計算を必要とせず、ハードウェアの工夫により、画像復元で生じるリングングに対処する方法として、符号化開口を用いて画像復元を行う方法がある。

3.2 符号化開口を用いた画像復元

符号化開口は様々な用途に応じて提案されてきた。例えば、天文学の分野で代表的なものは MURA コード[4]である。この MURA コードは天体望遠鏡で利用されることを想定し、X 線やガンマ線を用いた撮影を前提としている。また、この符号化開口は、実装した際の PSF のパワースペクトルは広帯域になるように設計されている。一方、Veeraraghavan ら[6]は可視光を撮影する通常のレンズカメラを想定し、PSF のパワースペクトルが広帯域になるように設計した符号化開口を提案した。具体的には、開口パターンをランダムに変化させ、パワースペクトルの最小値が最大となるように遺伝的アルゴリズムによる最適化を行っている。

また、Zhou ら[5]は画像復元の結果を最適化するような符号化開口を提案している。彼らは、真値 I_0 と画像復元による推定結果 \hat{I}_0 の差が最小になる開口を遺伝的アルゴリズムにより近似的に求めた。以下に Zhou らが作成した開口の評価関数を示す。

$$R(K) = \sum_{\xi} \frac{\sigma^2}{|K_{\xi}|^2 + \sigma^2/A_{\xi}} \quad (5)$$

ここで、 ξ は周波数、 A_{ξ} は 1/f 法則[12][13][14]に従う自然画像のパワースペクトル、 σ はノイズの標準偏差である。また、 σ が既知であり、真値 I_0 と推定結果 \hat{I}_0 の差分値を基準としたとき、これまで提案された各先行研究の符号化開口の中でこの (5) 式で最適化した符号化開口が、最も合焦画像に近い推定結果が行えることが示されている[5]。この評価関数では、1/f 法則に従う自然画像のパワースペクトル

が用いられており、一般のカメラで撮影されるような自然画像の復元が想定されている。一般に、 $N[\text{pixel}] \times N[\text{pixel}]$ の画像のパワースペクトルは以下の式から求めることができる[15]。

$$\Gamma(k_x, k_y) = \frac{1}{N^2} |I(k_x, k_y)|^2 \quad (6)$$

$$\Gamma'(k_x, k_y) = \frac{\Gamma(k_x, k_y)}{\text{std}|\Gamma(k_x, k_y)|} \quad (7)$$

$$\text{std}|\Gamma(k_x, k_y)| = \sqrt{E[(\Gamma(k_x, k_y) - E[\Gamma(k_x, k_y)])^2]} \quad (8)$$

ここで k_x, k_y はそれぞれ規格化周波数であり、 $I(k_x, k_y)$ は撮影画像のフーリエ変換結果を示す。また、 Γ はパワースペクトルを示し、 Γ' は Γ を正規化したパワースペクトルである。1/f 法則は自然画像の Γ' をモデル化した法則である。

4. 提案手法

4.1 アライメントマークのパワースペクトル

一般的に、撮影対象の種類によって、得られるパワースペクトルの傾向が異なると報告されている[15]。よって、アライメントマーク画像が自然画像と異なるパワースペクトルの傾向を持っているとすると、Zhou ら[5]の符号化開口は、アライメントマーク画像の画像復元にとって、最適ではない可能性がある。そこで、(7) 式を用いて、撮影されたアライメントマーク画像のパワースペクトルを画像ごとにも求めた平均した結果と 1/f 法則から求めた自然画像のパワースペクトル平均を比較した (図 3)。パワースペクトル平均を求めるためのアライメントマーク画像は、アライメントマークとして用いることができる特徴的な領域を持つテストパターン画像 10 枚を用いた。実際は 2 次元のパワースペクトルが得られるが、図 3 では y 座標の中心を切り取った x 軸方向のパワースペクトルを示している。

図 3 より、検査装置で用いられる各アライメントマーク画像から求めたパワースペクトル平均は 1/f 法則から求められる自然画像のものとは、異なることが見て取れる。アライメントマーク画像のパワースペクトルを画像毎に観察すると、低帯域の周波数成分が自然画像よりも多く含まれていた。一方、アライメントマーク画像の中帯域の周波数成分は各画像によって様々な特性が見られた。アライメントマークは人工的に設計された比較的単純なパターンである。よって、図 3 に示すように、アライメントマーク画像は自然画像に比べて濃淡の変化が少ない。このことから、アライメントマーク画像には低帯域の周波数成分が自然画

像に比べて多く含まれていたと考えられる。一方、中帯域の周波数成分は、撮影対象に描かれているパターンに依存するため、各画像で異なる。このため、アライメントマーク画像の中帯域の周波数成分は平滑化され、自然画像に比べてパワースペクトルの振幅が小さくなったと考えられる。

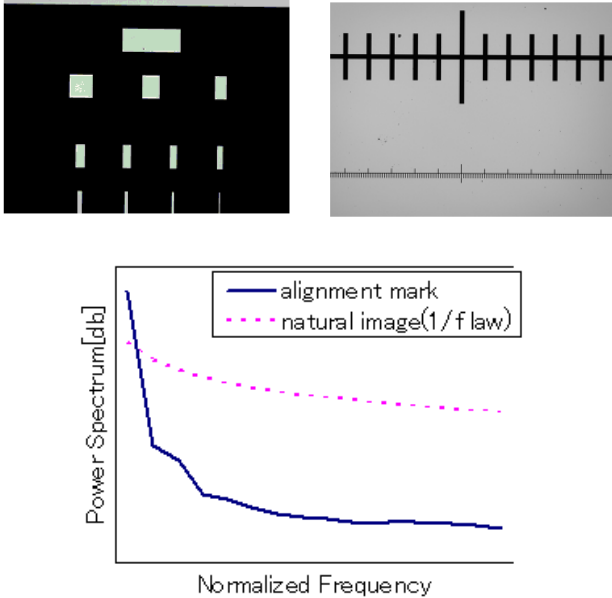


図 3 アライメントマーク画像の例とその画像のパワースペクトル平均値

4.2 符号化開口の最適化方法

4.1 で述べたように、自然画像とアライメントマーク画像のパワースペクトル平均値をとったとき、画像に含まれる周波数成分の傾向が異なることがわかった。よって、Zhou ら[5]が用いた開口の評価関数 (5) 式で自然画像のパワースペクトル平均が用いられている部分にアライメントマーク画像のパワースペクトル平均 S_{ξ} を代入した場合、Zhou らが提案した符号化開口と異なる形状に最適化されると予測できる。そこで、Zhou らと同様に遺伝的アルゴリズムを用いて、 $A_{\xi}=S_{\xi}$ とした (5) 式の値を最小とする開口 k を求めた。以下にその具体的な手順を示す。このとき求める開口 k は 1 を開口部、0 を遮光部とする数列で表される。

- ① ランダムな開口 k を 4000 個発生させる。この開口は 13×13 のグリッドで構成され、ランダムに開口部、遮光部が配置されている。
- ② ランダムに発生させた開口 k のフーリエ変換結果、 K を求める
- ③ $A_{\xi}=S_{\xi}$ とした (4) 式に K を代入して評価値を求め、4000 個の開口の内、評価値が低いものを 400 個選択する
- ④ 400 個の開口からランダムに 2 つを選択し、新たな開口パターンを以下の処理により生成する。この処理を繰り返すことで、さらに 3600 個の開口パターン

を生成する。

- (ア) 選択された 2 つの開口の開口部と遮光部を 20% の確率で入れ替え、新たに 2 つの開口を作成する
- (イ) 新たに作られた 2 つの開口の開口部と遮光部を 2% の確率で反転させる。

- ⑤ ②から④を 80 回繰り返し、最も低い評価値が得られた開口を選択する。このとき、開口率 50% 以上のものを選択した。

図 4 に通常円形開口、Zhou らによって示された開口形状、上記手法によって得られた開口形状を示す。この図には一例として $\sigma=0.01$ として最適化した結果を示す。



図 4 既存研究の符号化開口と提案する符号化開口

5. 実験

図 4 に示す符号化開口を撮影装置にそれぞれ実装し、オートフォーカスで動作できる範囲で撮影された非合焦画像の画像復元を行ったとき、位置合わせ機能に必要な精度 0.5pixel 以下のばらつきで位置の検出ができることを示す。

5.1 実験環境

この実験を行うための実験環境は実際の検査装置で用いられているレンズを用いて構築した。また、画像撮影時、後述する PSF 撮影時にセンサ面上で均一な光量を確保するために、照明にはケーラー照明系[16]を採用した。撮影素子は一般的な CMOS センサである (acA2500-14gm/gc, BASLAR)。図 5 に実験環境の概要図を示す。振動の影響を考慮して、この実験環境は除振台の上で構築した。また、外部からの照明の影響を排除するために、実験環境は暗室内に設置した。本稿の技術の適用を想定している装置のオートフォーカスの範囲は、この実験環境の $\pm 300 \mu\text{m}$ に相

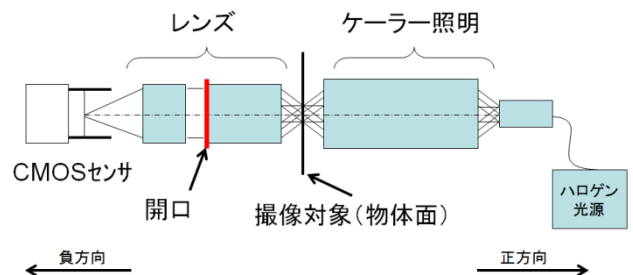


図 5 実験環境

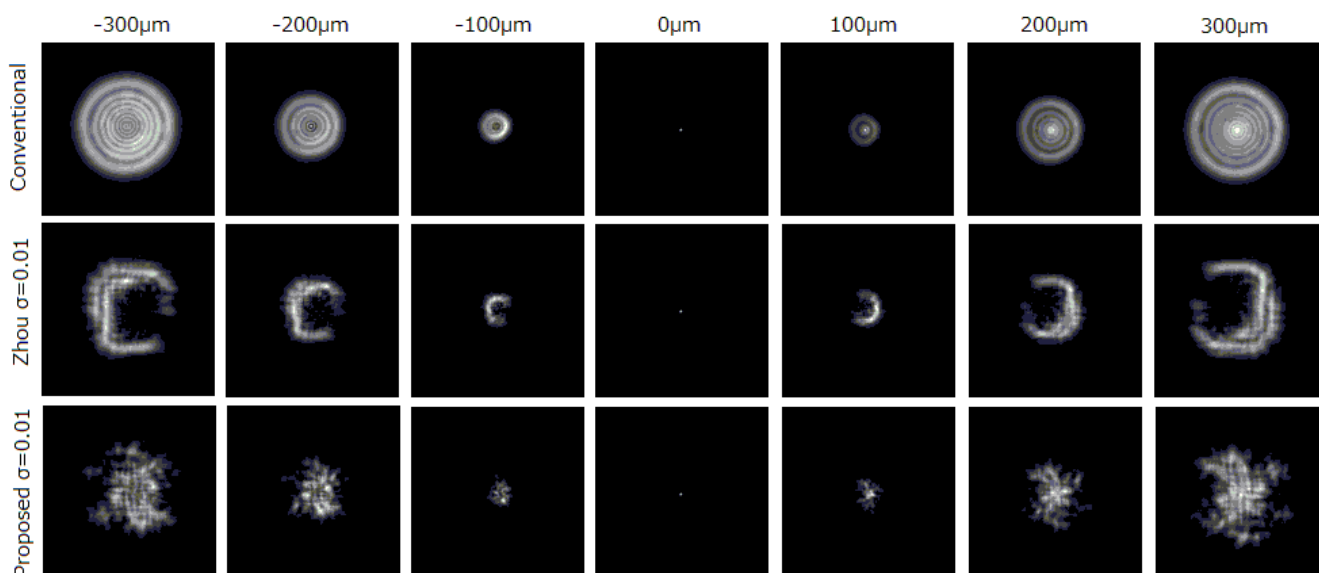


図 6 各符号化開口を実装したときに撮影された PSF

当する。よって、物体面にはマイクロメータを設置し、 μm オーダーで光軸方向に移動できるようにして、 $\pm 300\mu\text{m}$ の範囲で物体の撮影をできるようにした。負の方向は物体面がレンズに近づく方向であり、正の方向は物体面がカメラから遠ざかる方向である。また、従来の絞りを設置する位置には設計した符号化開口を設置できるように固定部を設けた。

5.2 PSF の撮影方法

画像復元を行うとき、PSF が必要になる。この PSF はブラインドデコンボリューション[17][18]と呼ばれる手法により推定する方法と、点光源を撮影し、それを PSF として用いる方法が一般的に知られている。ブラインドデコンボリューションは円形の絞りを前提とした手法が多く提案されているが、符号化開口を実装した場合に適用した例が少ない。よって、今回は PSF を撮影する方法を選択した。

PSF は理想的には大きさの無い点光源を撮影した画像であるとされている。しかし、物理的に大きさの無い点光源を作ることはできない。よって、5.1 で示した実験環境にとって十分小さい光源を作るために、物体面に微小な穴の開いた板（以下、ピンホール）を用いた。実験環境に用いたレンズは、物体側の結像性能が約 $2\mu\text{m}$ であることから、PSF 実測に用いるピンホールは、直径 $2\mu\text{m}$ の穴を採用した。実験環境の物体面にこのピンホールを設置し、センサと反対側から光をあてて、近似的な点光源を作成し、それを撮影装置で撮影することで、PSF を $\pm 300\mu\text{m}$ の範囲、 $100\mu\text{m}$ 間隔で撮影した（図 6）。

このとき、センサ側でオートゲインやトーンカーブによる画像処理は全て行わないように設定した。また、合焦位置からピンホールのズレ量が大きくなると、撮影された画像の光量が低下する。これに対処するために、露光時間を

ズレ量に応じて変化させて撮影している。このとき、正確な点光源の輝度分布を測定するために、撮影された PSF の最大輝度値が 230-254 の範囲になるように各条件で露光時間を設定した。さらに、PSF を各条件で 100 枚連続して撮影し、その撮影した画像の平均を取ることで、ノイズ成分を吸収する処理を行った。

5.3 評価方法

まず、5.2 で示した方法で PSF の撮影を行う。次に、PSF と同様に $100\mu\text{m}$ 間隔で $\pm 300\mu\text{m}$ の非合焦画像を撮影する。ただし、このとき露光時間は撮影した画像がサチレーションを起こさないように PSF 撮影時と異なる値を用いた。この非合焦画像及び PSF により画像復元を行い、その結果得られた画像を用いてテンプレートマッチングを行う。画像復元には (4) 式のウィナーフィルタを用いた。また、今回は画像復元を行うとき、非合焦画像の合焦位置からのずれ量は既知であるとする。

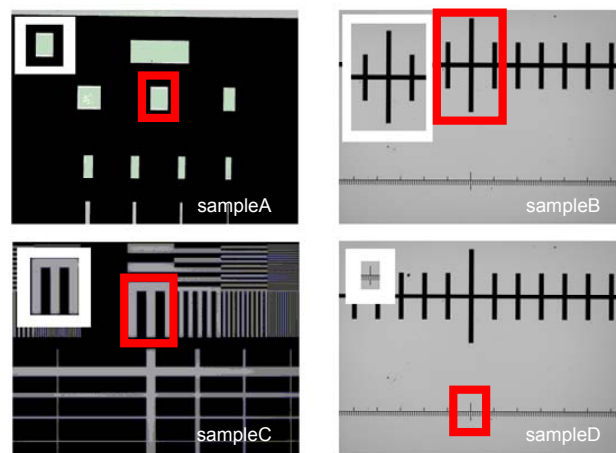


図 7 評価対象画像とテンプレート

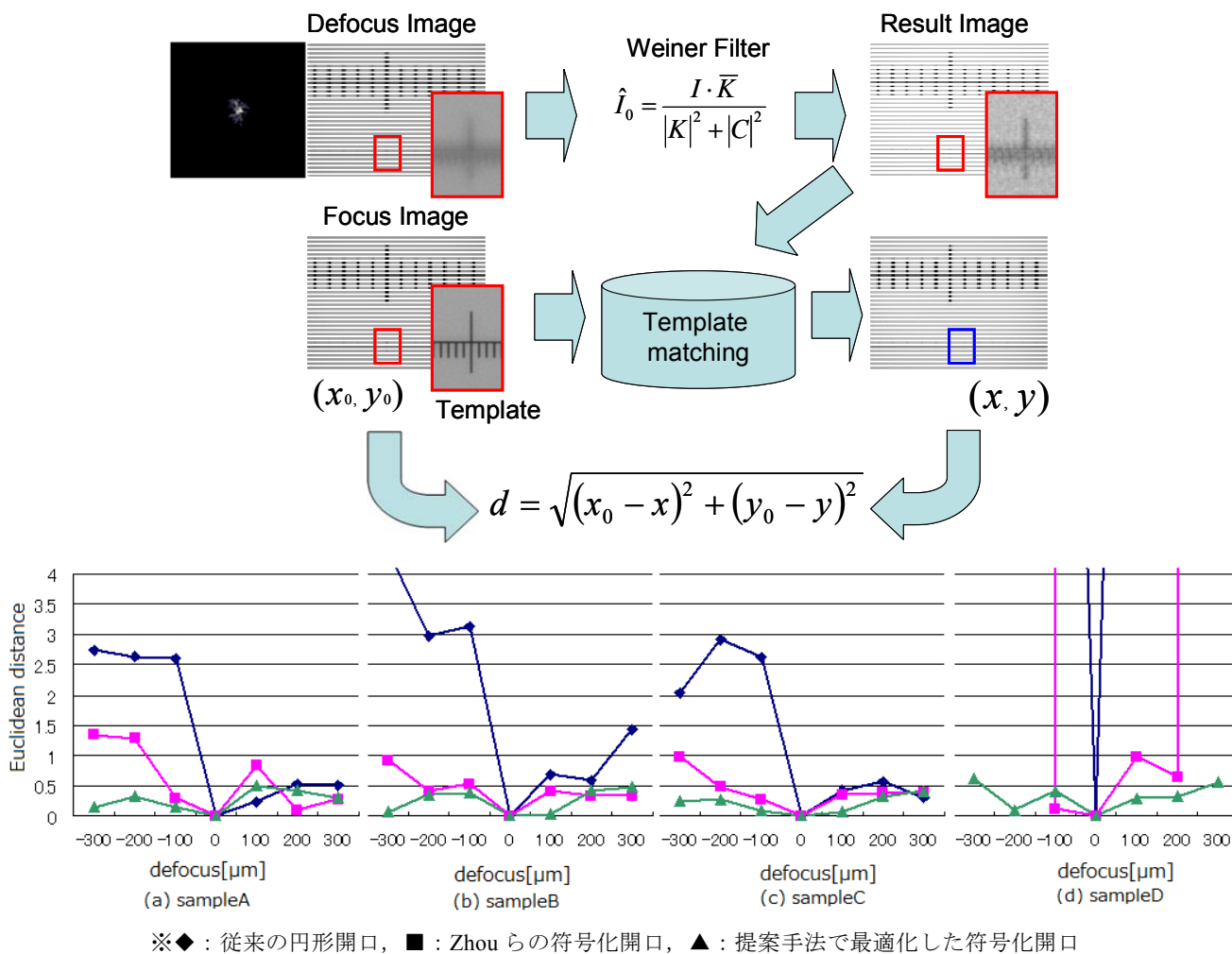


図 8 位置合わせ精度の評価方法と各サンプルの評価結果

今回、テンプレートマッチングは市販されているソフトウェアの関数を用いて行った (HALCON, find_shape_model 関数)。この結果検出されたパターンの座標値 (x, y) とパターンの座標値の真値 (x_0, y_0) のユークリッド距離 d を求めた。本稿ではこの距離 d を位置決め精度と定義する。位置決め精度の評価に用いた撮影対象は、4.1 で計算に用いたアライメントマーク画像の内、大きさや線幅の異なる sampleA から sampleD の計 4 種類を用いた (図 7)。

また、アライメントマークの位置座標の真値 (x_0, y_0) は、テンプレートを切り出した合焦画像に対して、同画像から切り出したテンプレートでテンプレートマッチングを行い、検出された座標と定義した。図 7 の左上にテンプレートマッチングで用いたテンプレートを示す。また、同図の赤枠で囲んである部分が位置決めの真値の位置を示す。

6. 結果と考察

6.1 位置決め精度の評価

5.3 で示した位置決め精度の評価を行った結果を図 8 に示す。今回評価に用いた sampleA から sampleD の全てのサ

ンプルにおいて、提案手法で最適化した符号化開口を実装して非合焦画像、PSF の撮影を行い、画像復元を行ったとき、従来の円形開口、Zhou らの符号化開口を実装したときに比べて、位置決め精度が向上することが分かった。また、提案手法により最適化した符号化開口を実装したとき、位置決め精度は sampleD の $-300 \mu\text{m}$ の条件の場合には若干 0.5pixel を上回ったものの、要求された仕様をほぼ満たしていた。よって、提案手法は今回想定するアプリケーションにとって有効であるといえる。

また、各サンプルの位置決め精度の大小に注目すると、sampleA から sampleC は物体面が負方向に移動すると、正の方向に移動したときに比べて位置決め精度が悪くなりやすい傾向が見て取れる。一般に、物体面がカメラに近づく方向のピントの合う範囲である前方被写界深度が、物体面がカメラから遠ざかる方向のピントの合う範囲である後方被写界深度よりも小さいことが知られている。これは物体面がカメラに近づく方向に移動したほうが、撮影面の錯乱円の面積、つまりぼけの面積が大きくなりやすいことに起因する。よって、焦点位置からの距離が同じでも、負の方向の条件では正の方向の条件に比べて、非合焦画像のぼけ

方が強く、その条件で画像復元した結果を用いた位置決め精度も悪化したと考えられる。

6.2 画像復元により推定した合焦画像のリングング

図8の sampleD の位置決め精度を見ると、提案手法で最適化した符号化開口を除いて、sampleA から sampleC と異なる傾向が見られた。図9に従来の円形開口、Zhou らの符号化開口を実装した場合の、sampleD のテンプレートマッチングの結果を示す。図中の赤枠は真値を示し、それ以外の領域は $\pm 300 \mu\text{m}$ の各条件での検出位置を示す。この図より、sampleD でテンプレートマッチングの結果検出された位置を確認したところ、本来検出されるべきパターンと全く異なる位置が検出されていたことがわかる。

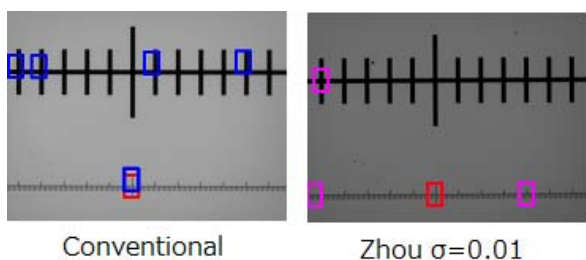


図9 sampleD のテンプレートマッチングの結果

今回用いたテンプレートマッチングのアルゴリズムはテンプレートと対象の画像からエッジ特徴を検出し、その類似度を求め、最も類似度の高い領域を検出するものであった[19]。また、各開口を実装して撮影した非合焦画像から推定した合焦画像の推定結果を見ると、リングングが現れていた。図10にリングングが現れた一例として、sampleD で物体面を焦点距離から $300 \mu\text{m}$ 移動させ、撮影した非合焦画像と推定した合焦画像を各開口の条件ごとに示す。従来の円形開口、Zhou らが提案する符号化開口を実装したとき、このリングングにより、正解のパターンの無い部分にテンプレートに類似したエッジが現れ、真値と異なる位置が検出されたと考えられる。一方、提案手法によって最適化した符号化開口を用いた場合、画像復元の結果発生したリングングが他の開口を用いたときに比べて弱く、リングングによってテンプレートに類似したパターンが現れなかったため、他の開口を用いたときに比べて精度よく位置決めができたと推察できる。

Zhou らの提案する符号化開口を実装したとき、設計上の PSF のパワースペクトルは、リングングの原因となるゼロ点への落ち込みは含まれない。よって、設計通りに PSF のパワースペクトルが得られていれば、(3) 式に示した撮影画像に含まれるノイズ成分を強調することによって生じるリングングは現れない。ここで、設計通りに PSF のパワースペクトルが得られていることを確認するために、Zhou らの符号化開口の設計上のパワースペクトルと、その符号化開口を実装した状態で、画像として撮影した PSF のパワースペクトルの比較を行った (図11)。

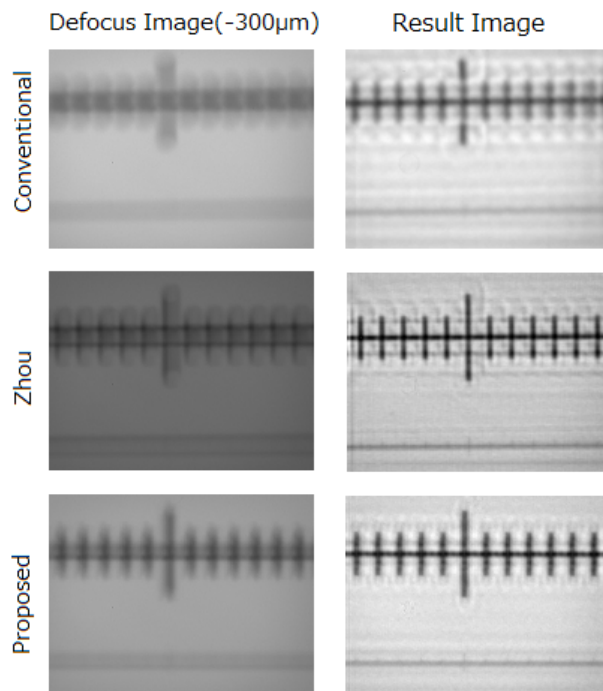


図10 推定した合焦画像の例 ($300 \mu\text{m}$, sampleD)

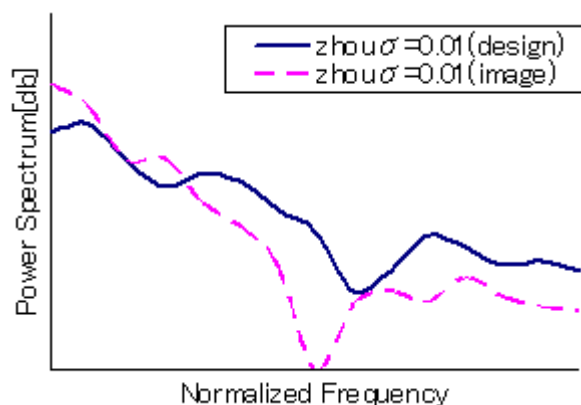


図11 Zhou らの提案符号化開口の設計データ、撮影結果 ($300 \mu\text{m}$) から求めた PSF のパワースペクトル

この比較結果から、撮影した PSF では設計上とは異なるパワースペクトルが得られていることがわかった。さらに、実際に撮影した PSF のパワースペクトルには設計時には見られないゼロ点への落ち込みが見られる。この点が推定した合焦画像にリングングが発生した一因であると考えられる。ここで、図8の円形開口を実装して撮影した PSF を見ると、理想的には点対称な PSF が得られることが想定されるにもかかわらず、非対称な PSF が得られている。理想的な PSF が撮影できなかった原因として、装置部品の加工誤差、またはそれらの調整誤差が影響した可能性がある。この装置部品の加工誤差、装置の調整誤差が原因となり、設計と異なる PSF が得られたことで、想定されていなかったゼロ点への落ち込みが発生したと推察する。

6.3 装置応用に向けた課題

今回、提案手法によって最適化された符号化開口を実装して画像復元した結果を用いて位置合わせを行ったとき、応用を想定するアプリケーションで要求されている位置決め精度が得られた。ただしこれは今回評価に用いたサンプルに対しての評価であり、なおかつ画像復元の際に物体面までの距離を既知として評価している。

評価に用いた画像はアライメントマークに用いたパターンの大きさや線幅が異なるものであった。実際のアライメントパターンも線幅や大きさが異なる様々なパターンが使われる。例えば、sampleDのようにパターンの線幅や大きさが小さいものほど位置決めが困難であると予測できる。そのため、装置応用を考えたとき、パターンの大きさや線幅、アライメントマーク以外の領域のパターンの複雑さに対してどの程度頑強に対応できるのかを定量的に評価しておく必要がある。

また、実際に装置で画像復元を行う場合には、非合焦画像から画像内の各対象までの距離推定を行う必要がある。特にばけの大きさから画像中の物体の奥行きを推定する手法は Depth From Defocus(DFD)と呼ばれている[20][21]。DFDでは、一般的に撮影画像と復元画像を任意の奥行きに対応したPSFでぼかした推定合焦画像との差で奥行きの評価関数が表される。この評価関数を最小化することで奥行きを推定することができる。今後はこのDFDを用いた上で、位置合わせ精度の評価を行う必要がある。

7. おわりに

本稿では産業装置で用いられる位置合わせ機能の位置決め精度を向上させるために、位置合わせ機能で撮影される画像のパワースペクトルを導入した評価式を用いて符号化開口の最適化を行った。この符号化開口を実装した実験環境を用いて非合焦画像を撮影し、画像復元によって推定した合焦画像を用いて位置決め精度の評価を行った結果、先行研究で提案されている符号化開口を実装したときと比較して位置決め精度が向上し、かつ要求された仕様を満たすことを確認した。ただし、装置応用に当たっては、撮影対象に対するロバスト性の評価や、距離推定を含めた状態での位置決め精度評価を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 美濃導彦: 画像処理論—Web情報理解のための基礎知識—, 株式会社 昭晃堂,(2011).
- 2) 井下智加, 向川康博, 八木康史: ぶれ画像復元のためのリング検出器の提案, CVIM2010, No.7, pp.1-8, (2010).
- 3) 長原一: 符号化撮影, CVIM2010, No.14, pp.1-9, (2010).
- 4) S. R. Gottesman and E. E. Fenimore: New family of binary arrays for coded aperture imaging, Applied optics, Vol.28, No.30, pp.4344-4352, (1989).

- 5) C. Zhou and S. Nayar: What are Good Apertures for Defocus Deblurring?, Computational Photography (ICCP), 2009 IEEE International Conference on, pp.1-8, (2009).
- 6) A. Veeraraghavan, R. Raskar, A. Agrawal, A. Mohan and J. Tumblin: Dappled photography: mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing, ACM Transactions on Graphics, Vol.26, No.3, (2007).
- 7) A. Levin, R. Fergus, F. Durand, and W. Freeman: Image and depth from a conventional camera with a coded aperture, ACM Transactions on Graphics, Vol.26, No.3, (2007).
- 8) H. Andrews and B. R. Hunt: Digital image restoration, Prentice Hall, (1977).
- 9) K. Dabov, A. Foi, V. Katkovnik, K. Egiazarian: Image denoising with block-matching and 3D filtering, Proceedings of SPIE, Vol.6064, pp.354-365, (2006).
- 10) J. Mairal, F. Bach, J. Ponce, G. Sapiro, A. Zisserman: Non-local sparse models for image restoration, Computer Vision, 2009 IEEE 12th International Conference on, pp.2272-2279, (2009).
- 11) D. Zoran and Y. Weiss: From learning models of natural image patches to whole image restoration, Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference on, pp.479-486, (2011).
- 12) Y. Weiss and W. T. Freeman: What makes a good model of natural images?, Computer Vision and Pattern Recognition, 2007. CVPR'07. IEEE Conference on, pp.1-8, (2007).
- 13) D. Mumford and B. Gidas: Stochastic models for generic images, {Quarterly of applied mathematics, Vol.59, No.1, pp.85-112, (2001).
- 14) A. Srivastava, A. B. Lee, E. P. Simoncelli, and S-C. Zhu: On Advances in Statistical Modeling of Natural Images, Journal of mathematical imaging and vision, Vol.18, No.1, pp.17-33, (2003).
- 15) T. Antonio, and A. Oliva: Statistics of natural image categories, Network: computation in neural systems, Vol.14, No.3, pp.391-412, (2003).
- 16) K. August: New method of illumination for photomicrographical purposes, Journal of the Royal Microscopical Society Vol.14, pp.261-262, (1894).
- 17) W. H. Richardson: Bayesian-based iterative method of image restoration, Journal of Optical Society of America, Vol.62, No.1, pp.55-59, (1972).
- 18) L. Lucy: An iterative technique for the rectification of observed distributions, Journal of Astronomy, Vol.79, pp.745-754, (1974).
- 19) C. Steger, M. Ulrich C. Weidemann: 画像処理アルゴリズムと実践アプリケーション: HALCONによるマシンビジョンシステム構築のためのソリューション, リンクス出版事業部, (2008).
- 20) A. P. Pentland: A new sense for depth of field, Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, Vol.9, No.4, pp.523-531, (1987).
- 21) M. Subbarao, G. Surya: Depth from defocus: a spatial domain approach, International Journal of Computer Vision, Vol.13, No.3, pp. 271-294, (1994).