



Title	局所排他的構造化照明法による深層学習を用いた光相関イメージングの高解像度化
Author(s)	片岡, 将磨
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/103118">https://doi.org/10.18910/103118</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏 名 （ 片 岡 将 磨 ）

論文題名 局所排他的構造化照明法による深層学習を用いた光相関イメージングの高解像度化

## 論文内容の要旨

観察領域に対して微小かつまばらに存在する対象物のセンシングは、天文、医療、産業など多くの分野で用いられており、その実現には高感度かつ高解像度な高速イメージング技術が求められる。2次元センサを用いた一般的なイメージング手法は高速である一方、感度が低く、微弱な信号の検出には適さない。本研究では、高感度かつ高速な特性を有する深層学習を用いた光相関イメージングに対して、局所排他的構造化照明法を導入することで高解像度化を実現し、高感度かつ高解像度な高速イメージング法を提案した。光相関イメージングは、構造化照明と測定信号の相関により像を再構成する手法であり、深層学習の導入によって少ない照明回数で相関計算できる。しかし、従来の照明法では異なる対象の測定値が一致する非排他的測定が局所的に生じ、解像度および推定精度が制限される課題があった。そこで、空間的および時間的に異なる位置で異なる強度変調を与える局所排他的構造化照明を導入することで高解像度化した。さらに、推定不確かさに基づくフィルタリングを併用することで、非排他的測定の影響を排除し推定の信頼性を向上させた。

第2章では、局所排他的構造化照明法を導入した深層学習を用いた光相関イメージングの原理を述べた。はじめに、光相関イメージングの原理を述べたのちに、深層学習モデルの各構成要素との対応関係を整理した。さらに、空間的な非排他性には非合焦照明を用いて画素内に強度勾配を生じさせることで対応し、時間的な非排他性には2進数表記に基づくパターン設計で対応可能であることを示した。さらに、測定のばらつきによる非排他性は、近傍特徴マップを用いた推定不確かさ評価により検知可能であることを示し、これらを統合することで高感度かつ高解像度な高速イメージングが実現できることを述べた。

第3章では、非合焦照明を用いてサンプルに投影される構造化パターンを意図的にぼかした空間的に局所排他的な構造化照明により、従来手法を上回る解像度での位置推定が可能となることを示した。深層学習モデルの比較により、異なるカーネルサイズを持つ畳み込み層を並列に接続したモデルによって相関情報と非合焦照明に由来する情報を同時に抽出可能であることを明らかにした。実験により、従来法に比べて4×4倍の高解像度での推定が可能であることを実証した。

第4章では、2進数表記に基づいて設計した時間上で局所排他的な構造化照明を用いることで、偶発的な信号重複を回避し、位置推定精度が向上することを示した。照明パターンの解析により、照明強度の時間変化の組み合わせ数が画素数を超える場合、2進数パターンは排他性を常に満たすことを確認した。さらに、1bitおよび8bitランダムパターンとの比較実験で、2進数パターンが高い推定精度とノイズ耐性を両立していることを示した。

第5章では、深層学習モデルの中間出力である特徴マップに揺らぎを与え、得られた推定値のばらつきから不確かさを評価する手法を提案した。推定不確かさと推定の正誤の関係を明らかにし、誤った推定ほど推定不確かさが高くなることを示した。さらに、最適化したしきい値に基づくフィルタリングにより、推定不確かさの高い推定を除外することで、最大48%の精度向上が得られることを確認した。

第6章では、提案手法を用いた高解像度微小物体位置検出を実証した。高解像度推定にあたって、全領域を一度に推定するモデルでは計算コストが肥大化し学習が困難となる。そこで、画素ごとに内部分布を推定するPixel-by-Pixelモデルを構築した。数値解析において、62K相当の解像度で欠陥位置推定が可能であることを示した。また、8K解像度での微小欠陥トラッキング実験において、従来手法の64×64倍の解像度での推定が可能であることを実証した。さらに、構造化照明が乱れる擾乱環境下においても推定が可能であり、シリコンウエハ上の欠陥検出にも応用できることを確認した。

第7章では、本研究の総括として各章ごとに得られた知見をまとめ、本論文の結論を述べた。

以上より、深層学習を用いた光相関イメージングに局所排他的構造化照明を導入することで高解像度化でき、高感度かつ高解像度な高速イメージングを実現できることを明らかにした。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 片 岡 将 磨 )			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	准教授	水谷 康弘
	副 査	教授	井野 秀一
	副 査	教授	榎本 俊之
	副 査	教授	高谷 裕浩

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、時間的および空間的に局所排他な構造化照明を用いることで、深層学習を用いた光相関イメージングを高速、高感度かつ高解像度化することを目的としている。スパースに広域分布する測定対象を検出するためには、高解像度かつ高感度に高速検出する技術が不可欠である。高感度なイメージング法の 1 つに光相関イメージングという単一画素検出器と構造化照明を用いたイメージング法が提案されている。しかし、従来の構造化照明法では、異なる検出対象にも関わらず同一の測定値となる非排他的測定となるため、対象の識別性能が低下するという課題を有している。この課題は、局所空間的および時間的な観点から照明光強度が同一となることに由来している。さらに、測定のばらつきも識別能の低下に寄与している。本研究では、これらの課題を解決するための構造化照明法を提案している。空間的には、非合焦照明によって生じるボケパターンの強度勾配を利用して局所排他的構造化照明を実現している。また、時間的には、2 進数表記に基づいた構造化パターン設計により局所排他的構造化照明法を提案している。さらに、測定のばらつきによる非排他的測定を除外するための推定不確かさ評価法を提案している。そして、これらの提案法について個別検証をしたのちに統合することで、深層学習を用いた高解像度光相関イメージングが広域微小欠陥検査へ応用可能であることを実証している。

第 1 章では、本研究の背景および目的を述べている。天文、医療、産業分野などの分野で広域、高解像度かつ高速なイメージング技術が求められていることを挙げている。高感度かつ高速なイメージング法である深層学習を用いた光相関イメージングに着目し、課題である非排他的構造化照明による識別能の低下について述べている。これらの課題を解決するためには、照明光強度分布の時間的、空間的および測定のばらつきに着目した局所排他性を考慮する必要があることを導いている。そして、総合的に局所排他性を実現した深層学習を用いた光相関イメージングの高解像度化を目的としている。

第 2 章では、本研究で提案する局所排他的構造化照明法を導入した深層学習を用いた光相関イメージングの原理について述べている。まず、光相関イメージングが構造化照明と単一画素検出器を用いた相関計算により像を再構成する手法であり、マルチプレックス効果や相関計算によるノイズ除去により高感度な検出が可能であることを説明している。また、深層学習モデルを用いて特徴量を抽出することで、少ない測定回数でも高品質な像を推定できるという基本的な考え方を示している。さらに、局所排他的構造化照明法として、まず、非合焦照明により構造化パターンの画素内部に強度勾配を生じさせることで高解像度化できることを述べている。つぎに、2 進数表記に基づいた強度変調パターンを利用することで局所時間的な排他性を確保できることを示している。さらに、深層学習モデルの内部出力である特徴マップを用いて推定不確かさを評価することで、推定のばらつきに由来する非排他的測定を検知できることを示している。そして、これらを統合した高解像度な深層学習を用いた光相関イメージングの原理を説明している。

第 3 章では、非合焦照明による空間領域での局所排他的構造化照明が推定解像度向上に有効であることを示している。合焦位置とサンプル設置を意図的にずらすことにより生じる強度勾配により、構造化照明の画素内に埋もれている情報の抽出を実現している。具体的には、高解像度情報を抽出するための深層学習モデルを比較検討した結果、異なるカーネルサイズを持つ畳み込み層を並列に接続した深層学習モデルが効率的であることを示している。そして、実験により、構造化照明の画素サイズより高い解像度で欠陥位置の推定に有効であることを実証している。

第 4 章では、2 進数表記に基づくパターン生成により、時間領域での局所排他的構造化照明が位置推定精度を向上させることを示している。2 進数表記に基づいて各画素に一意な強度変調を割り当てる構造化照明を生成することで、少ない照明回数にも関わらず時間的な局所排他性を実現できることを示している。具体的には、照明パターンの階調数がノイズ耐性に与える影響を比較し、多値パターンより 2 値パターンが高いノイズ耐性を有することを数値解析で確認している。さらに、実験により、非排他的照明による識別不能性の影響を低減し、位置推定精度が向上することを実証している。

第 5 章では、推定不確かさを空間的に導出することで測定の際のばらつきに由来する非排他的推定を除外し、推定信頼性を向上できることを示している。具体的には、特徴量の二次元分布に乱数を付加することで、推定値のばらつきから推定不確かさを定量評価する手法を検証している。非排他的測定により、誤った推定ほど推定不確かさが高くなることを数値解析で明らかにしている。また、推定不確かさをを用いることで測定環境のばらつきを反映した評価も可能であることを述べている。さらに、具体的に運用するための推定不確かさに基づいたフィルタリングの指針についても述べている。最後に、フィルタリングにより誤推定の可能性が高い非排他的な推定を除外し、推定の信頼性を向上できることを実験的に示している。

第 6 章では、第 3 章から第 5 章までの手法を統合した局所排他的構造化照明法を導入した深層学習を用いた光相関イメージングにより微小欠陥を高解像度で位置検出できることを実証している。具体的には、8K 以上の高解像度推定のための Pixel-by-Pixel 推定モデルを構築している。ここでは、推定画素数に依存せず超高解像度推定が可能であることを、128×128pixel の構造化照明であるにもかかわらず、65536×65536 pixel の空間分解能で画像を推定できることを数値計算で示している。さらに、測定システムの点広がり関数を用いて学習したモデルにより、8K 解像度での微小欠陥トラッキングができることを実験で確認している。また、擾乱環境下においても位置検出が可能であり、擾乱耐性に優れていることを示している。さらに、シリコンウエハ上の欠陥検出に本手法を適用し、欠陥位置および形状を高解像度で検出できることを示し、広域微小欠陥検査への展開可能性を明らかにしている。

第 7 章は本論文の結論であり、本研究で得られた成果を総括している。局所排他性を導入した深層学習を用いた光相関イメージングによって、高感度かつ高解像度、高速な微小欠陥位置検出が可能であることを実証したことを述べている。また、非排他的推定の検出と除外による信頼性向上についても触れている。今後の展望として、複数欠陥の同時存在や複雑な対象への拡張、および他の物理量での相関測定技術への応用可能性についても言及している。

以上のように、本論文は局所排他的構造化照明法によって深層学習を用いた光相関イメージングの高解像度化を実現し、高感度かつ高速な高解像度イメージングという新たな計測技術を創出したものであり、微小欠陥検査など産業分野へ大きな貢献が期待されるだけでなく、学術的にも意義深い研究成果を収めている。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。