

令和 4 年 6 月 30 日現在

機関番号：10106
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2019～2021
課題番号：19K12012
研究課題名(和文)ホロ・レコグナイザ：計算機から光学系への機械学習拡張による物体の完全3次元知覚
研究課題名(英文)Holorecognizer: implementation expansion of machine learning to optical setup for three-dimensional recognition
研究代表者
杉坂 純一郎 (Sugisaka, Jun-ichiro)
北見工業大学・工学部・准教授
研究者番号：00599227
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：光の回折現象を利用し、物体の立体構造を知覚できる新規システムの開発を行った。表面に微細な欠陥のある試料を照明し、その散乱光を光フィルタに透過させると、透過光の強度値から試料表面の凹凸を判別できる。この光フィルタでは、散乱光に含まれる物体の立体情報を正確に抽出できる。最適な識別結果を得るために光フィルタと電子計算機を同時学習させる機械学習アルゴリズムなど、光学系と電子計算機が一体化した新たな人工知能システムの設計を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義
物体表面の微細な凹凸の判別は、半導体ウェハの欠陥検査など、従来の技術では困難であった計測手法の開発が期待できる。本研究で開発した光フィルタは、散乱光がフィルタを透過する過程で機械学習と同等の演算を実現でき、通常は電子計算機のプログラムとして実装される機械学習を、新たな形態で実現するものである。このシステムの利点は、必要な演算処理をきわめて高速・低消費電力で実現でき、エネルギー効率の点でも優れた人工知能の研究開発にもつながるものである。

研究成果の概要(英文)：We have developed a novel system that can discriminate the three-dimensional structure of an object by using the diffraction of lightwave. The convex or concave defect on a sample surface is discriminated by transmitting the scattered light from the sample through the optical filter. The optical filter can accurately extract the three-dimensional information of the sample from the scattered light. We also designed a novel artificial-intelligence system that consists of an optical system and electronic computer, including a machine learning algorithm that simultaneously trains (designs) the optical filter and the electronic computer to obtain optimal discrimination results.

研究分野：光学

キーワード：人工知能 機械学習 ホログラム 逆散乱問題 計算電磁気学

1. 研究開始当初の背景

人工知能 (AI) 技術の進歩に伴い、様々な物体に対する高度な認識・識別できるシステムが開発されている。人間がごく簡単に行っている物体の識別だけでなく、複雑な医療画像など、判別の難しいものについても有意義な判断ができるようになってきている。

現在の物体認識システムでは、物体をカメラ等で撮影し、電子化された画像データを計算機内で処理することで物体認識を行っている。画像データに変換された時点で物体の 3 次元情報は失われており、物体の凹凸や距離感などの 3 次元的な認識は非常に困難になる。

物体の 3 次元情報を取得する方法として、物体を多方向から観測し、それらのデータから 3 次元情報を計算機内で再構築する方法がある。例えば X 線 CT では、あらゆる方向から X 線を照射し、その透過 X 線データから物体の立体情報を再構成する。動物の目のように 2 方向から観測し、その視差から立体情報を知覚する方法もある。これらの手法は、3 次元情報の再構成に大量のデータ処理 (演算) が必要となる。その結果、移動する物体をリアルタイムに知覚できないことや、高性能な計算機が必要となるなどの問題が生じる。自動車や家電製品など、高性能な (消費電力の高い) 計算機を使用することができない環境では、そのようなシステムを搭載できない。さらに、物体表面のわずかな凹凸といった 3 次元情報の認識は、既存の計測技術を用いても困難である。

2. 研究の目的

従来の物体認識システムが 3 次元情報を認識できない原因は、カメラ等で物体を撮影する際に 2 次元の画像データとなることである。物体の 3 次元情報は、物体から放射されカメラに入射するまでの光波の段階ではまだ保持されている。本研究では、物体から放射される散乱波を直接処理し、正確な 3 次元情報を抽出するシステムを設計する。電子化された画像データを計算機で処理するのではなく、物体からの散乱波をホログラムなどのフィルタ素子に透過させ、3 次元情報抽出のためのデータ処理を行う。フィルタ透過後の光波はカメラで撮影し、最終的には電子計算機で結果を出力するが、電子計算機の演算量を増やさないように、できるだけ電子計算機へ送信するデータサイズは小さいほうが望ましい。以上の条件を満たすようなフィルタを、機械学習、非線形最適化、逆散乱問題等の手法を利用して設計する。

識別対象の具体例として、誘電体平板 (ガラス板や半導体基板) の表面に存在する欠陥の判別を行う。光学素子や半導体素子の製造において、材料となる基板にわずかな欠陥が存在すると、製品の動作に悪影響を及ぼすことがある。通常的光学顕微鏡で欠陥を観察しても、斑点状の像しか映らず、基板表面が欠けているのか異物が付着しているのか判別が難しい。本研究でそのような微小欠陥を判別できるか、数値シミュレーションにより検証する。識別対象は図 1 のような凹型欠陥と凸型欠陥に単純化した。ただし、欠陥サイズは照明光の波長以下とし、従来の測定手法では凹凸を正確に判別できないものに限定した。

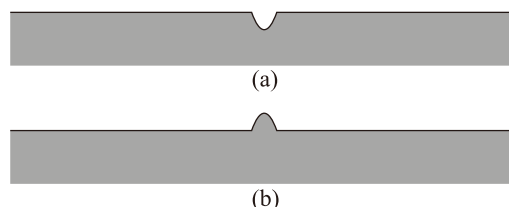


図 1 (a)凹型欠陥と(b)凸型欠陥の断面

3. 研究の方法

(1)凹凸判別の可能性の検証

本研究の凹凸識別システムは、試料に光を照射し、その散乱光から物体形状の情報を得るものである。この情報が散乱波に含まれ、検出可能かを確認するため、以下の数値解析を行った。

図 2 のような周期的な凹凸を有する試料を想定し、その 1 か所の溝が不完全になっていると仮定する。表面を照明し、観測した散乱光を用いて、不完全な溝の断面形状を推定できるか検証した。断面形状を推定するためには、試料の表面形状と散乱波の関係を与える積分方程式を用いた。この積分方程式に特異値分解を適用すると、どのような溝の形状がどのような散乱波を生じさせるかを明らかにできる。

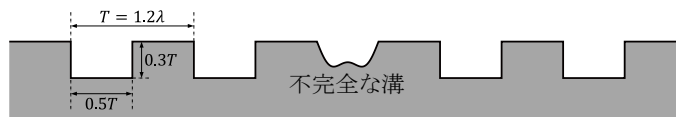


図 2 不完全な溝を有する周期構造の断面図

(2)光フィルタとニューラルネットワークを用いた測定システム

想定している観測用光学系を図 3 に示す。測定試料が対物レンズの焦点面に置かれており、対物レンズと結像レンズの間に光フィルタが配置されている。結像レンズの後方の焦点面に観測点を設けて、この 1 点の光強度を観測する。

光フィルタはマッチトフィルタと呼ばれるもので、欠陥の深さが 0.1λ または 0.3λ (λ は照明光の波長を表す) のとき、観測点の強度が 0 になるようなフィルタを 2 枚設計した。フィルタを差し替えて 2 回測定し、得られた観測点の強度値を 2 入力・3 層ニューラルネットワークに入力する。欠陥の深さや幅が異なる複数の試料を学習用データとしてニューラルネットワークを学習

させ、ニューラルネットワークからの出力値で正しく試料表面の凹凸を判別できるか検証した。

(3) 光フィルタとニューラルネットワークの同時学習

正しい識別結果を得るための光フィルタは、欠陥の深さが 0.1λ または 0.3λ のときに観測点の光強度が0になるマッチフィルタであることが明らかとなったが、この光フィルタが最適なものである保証はない。したがって、試料の形状が変化したとき、どのような光フィルタを設計すればよいかの指針は立てられない。そこで、ニューラルネットワークの学習の過程で、同時に最適な光フィルタも設計されるようなアルゴリズムを構築した。光フィルタを透過する前後の光波の回折現象は、ニューラルネットワーク内部の信号伝播と類似点が多い。そこで、光フィルタとニューラルネットワークを一つの大規模なニューラルネットワークとみなして学習を行った。

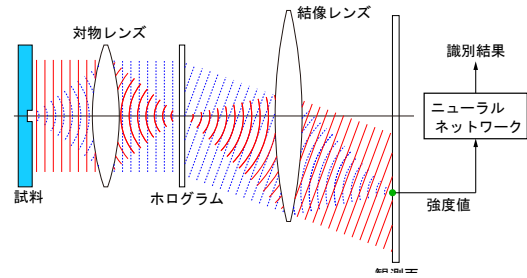


図3 光フィルタとニューラルネットワークによる試料表面の凹凸判別システム

(4) 粗面散乱を用いた凹凸識別システム

凹凸識別用に設計された光フィルタは、不規則な透過率分布になっている。そこで、図4のように光フィルタを粗面（紙や布のように、表面に不規則な凹凸があるもの）に置き換えた。試料Sからの散乱波・反射波を粗面Rで反射させ、観測面 P_2 に現れるスペックルパターンの強度 $f^{(2)}$ を測定する。各点の強度値にそれぞれ異なる重み係数を掛け、それらの総和を観測値とする。システムの学習処理は、用意した学習用データに対し、試料表面の欠陥の凹凸に応じて観測値が変化するように重み係数を調整する。以上の学習処理、識別テストを数値シミュレーションで行い、観測値の値から欠陥の凹凸を判別可能か検証した。

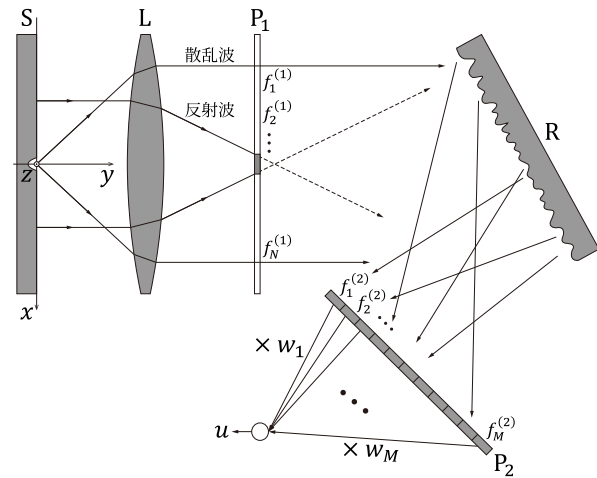


図4 粗面散乱を利用した凹凸判別システム

(5) 光線形判別分析フィルタを用いた測定システム

欠陥の凹凸を観測点1点の強度値のみから判別できるようなフィルタを設計した。計算機側でニューラルネットワークなどの演算が一切不要になり、処理速度の高速化、低消費電力化が見込める。

ここで使用する光フィルタは、機械学習の一つであるFisherの線形判別分析を基に設計した。線形判別分析は、対象のデータとベクトルの内積を計算し、その値からデータがどちらのクラスに属するかを判別するものである。この計算は通常、電子計算機で行われるが、データを散乱波分布、ベクトルをフィルタの透過率分布とみなすと、フィルタを透過する欠陥からの散乱波で表現できる。線形判別分析に基づいて設計した光フィルタに欠陥からの散乱波を透過させると、透過後の光波が凹型欠陥・凸型欠陥に対し複素平面上の異なる位置に分布するようになる。この散乱波に欠陥以外の試料表面から反射する反射波成分が加わるようにする。反射波成分の大きさも光フィルタで調整し、観測点の強度が設定した閾値より小さい場合は凹型欠陥、大きい場合は凸型欠陥と判別できるようにする。

(6) 光フィルタのためのフォトンシープホログラム

フォトンシープホログラムは、既存の半導体露光装置に代わる新たな露光装置として、図5のようにレンズ等を必要とせず、微細な配線パターンを生成・投影する素子である。このホログラムも凹凸識別やパターン識別の光フィルタとして利用することができる。従来の同じ面積の光フィルタと比較して、より多くの情報を処理できる可能性がある。そのためにはフォトンシープホログラムの投影精度を上げておく必要がある。非線形最適化手法を応用した最適設計手法を考案した。この手法に基づいて、正確に像が投影できているか数値解析およ

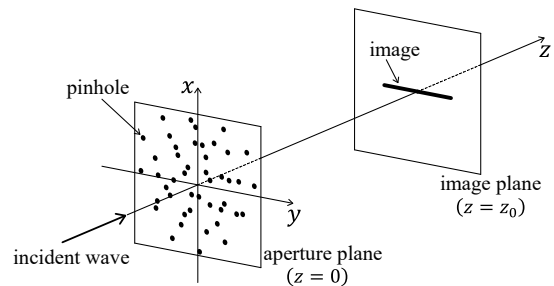


図5 フォトンシープホログラムと投影像。フォトンシープホログラム表面の多数のピンホールを透過した照明光が回折・干渉し、ライン像を生成する。

び実験を通して確認を行った。

4. 研究成果

(1) 凹凸判別の可能性の検証

ノイズを含む散乱波から溝の断面形状を推定した結果を図 6 に示す。測定光学系の開口数 (NA) が大きい場合はノイズに強く、正確に推定できていることが分かる。

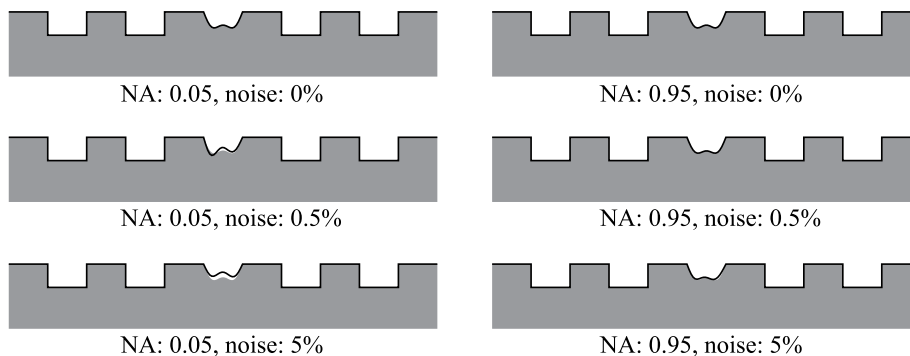


図 6 試料の断面形状 (灰色) と散乱波からの推定形状 (黒線)

図 7 は特異値分解によって得られた、溝の構造 $U'_n(x)$ と観測点に到達する散乱波の大きさ s_n の関係を表している。 $U'_3(x)$ や $U'_4(x)$ のように、溝の内部に細かい凹凸が含まれる構造は感度が低く、測定する散乱波に含まれるノイズの大きさがどこまで細かい構造を推定できるかを決めることが分かる。

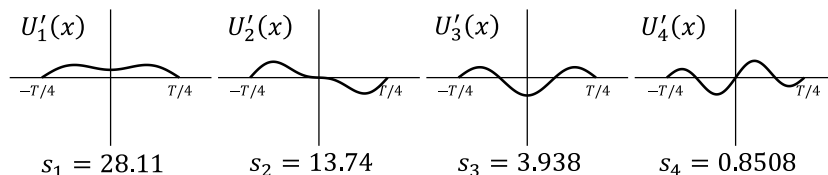


図 7 試料の断面形状 $U'_n(x)$ と散乱波の大きさ s_n

文献：

J. Sugisaka, T. Yasui, K. Hirayama, Optics Express, 28, 30908-30927 (2020).

(2) 光フィルタとニューラルネットワークを用いた測定システム

欠陥の幅が 0.3λ 、高さ (深さ) が 0.5λ 以下の 100 個の試料に対して識別シミュレーションを行った結果を図 7 に示す。光フィルタを用いない場合と比較して、明らかに精度が向上している。

欠陥幅にばらつきのある試料 ($0.1\lambda \sim 0.3\lambda$) に対しても識別シミュレーションを行った。結果は図 8 のように、ほぼすべてのテストデータに対し、正しく凹凸を判別できることを確認した

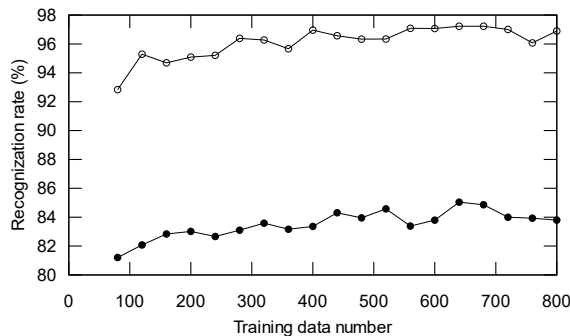


図 8 学習データ数と識別精度の関係

文献：

杉坂, 安井, 平山, 信学技報, EMT2019-47 (2019).

有馬, 杉坂, 田口, 信学技報, EMT2020-3 (2020).

(3) 光フィルタとニューラルネットワークの同時学習

ニューラルネットワークとの同時学習により設計された光フィルタを用いた場合と、光フィルタを用いずにニューラルネットワークのみを用いた場合の結果を比較した。図 9 のように、光フィルタを用いた方が高い識別精度を示しており、光フィルタの効果が現れていることが分かる。

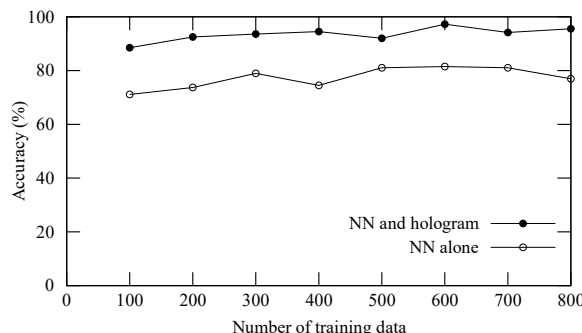


図 9 同時学習させた光フィルタとニューラルネットワークを用いた判別結果

文献：

有馬, 杉坂, 田口, 信学技報, EMT2020-

(4)粗面散乱を用いた凹凸識別システム

スペックルパターンを観測点数と識別精度の関係を図 10 に示す。粗面を平面ミラーに換えたときと比較して、明らかに精度が向上している。観測点数が多いほど精度が良いとは限らず、識別精度を最大にする最適な観測点数が存在することも明らかになった。

文献：

有馬, 杉坂, 田口, 信学技報, EMT2020-31 (2020).

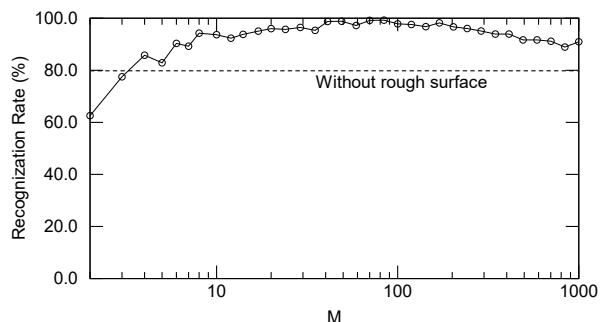


図 10 粗面散乱を用いた凹凸判別結果

(5)光線形判別分析フィルタを用いた測定システム

対物レンズの NA を変えて識別テストを行い、従来の光フィルタ (合成識別関数: SDF) と比較した。図 11 に示すように、識別誤差が減少しており、欠陥の高さ (深さ) や幅に関わらず正しく凹凸を判別できていることが分かる。

文献：

J. Sugisaka, T. Yasui, K. Hirayama, J. Opt. Soc. Am. A, 39, 342-351 (2022).

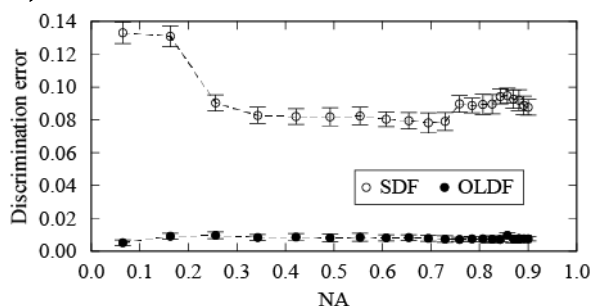


図 11 光線形判別分析フィルタによる凹凸判別結果

(6)光フィルタのためのフォトンシーブホログラム

フォトンシーブホログラムによる投影像 (L 字ライン像) を図 12 に示す。オリジナルのホログラム (最適化前) はライン像が断線しているが、ホログラムの最適設計後は均一な太さの像になっている。

文献：

J. Sugisaka, K. Onishi J. Opt. 22 105606 (2020).

J. Sugisaka, K. Onishi J. Opt. 24 035605 (2022).

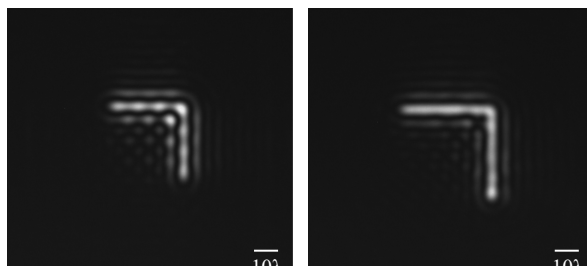


図 12 (a)最適化前、(b)最適化後のフォトンシーブホログラムによる L 字ライン投影像

(7)まとめ

本助成期間において、物体表面の凹凸を識別するための光フィルタを開発した。最新の成果では幅 $0.1\lambda \sim 2.0\lambda$ 、高さ (深さ) 1.0λ 以下の範囲の凹凸を識別できている。必要となる光学系も、干渉計などの複雑かつ振動に弱い系は必要なく、1 点の光強度を閾値と比較するだけで凹凸識別ができる。本研究の当初の目的は、光学系と電子計算機を組み合わせ、立体の識別精度を上げつつ、電子計算機の演算量を抑えることであった。現時点では欠陥凹凸の識別精度が従来の 10 ~ 20% 改善し、電子計算機での演算は測定値と閾値の比較演算のみに減少できている。提案した光線形判別分析フィルタは、本来は電子計算機内の計算プログラムによって実行されるものであるが、これを光の回折現象で代替したものである。このような電子演算から光演算への置き換えは、ほかの機械学習処理にも拡張できる可能性がある。

立体の認識の可否を解析する中で、新たな逆散乱解析アルゴリズムも生まれ、立体の認識・識別だけでなく物体形状を測定する測定技術への発展の可能性も見出した。また、フォトンシーブホログラムは光フィルタとしてだけでなく、次世代の微細加工装置としての応用も期待できる。

今後は、人工知能を単に電子計算機内で稼働するプログラムという概念にこだわらず、光学系と電子計算機を一体とした人工知能システムの概念に基づいて、微小欠陥以外のより複雑な物体に対し、物体計上の把握や空間的な知覚を低い消費電力で瞬時に行えるシステムの研究を継続する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sugisaka Jun-ichiro, Onishi Ko	4. 巻 22
2. 論文標題 Lensless computer-generated hologram with wavelength-order resolution consisting of photon sieves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Optics	6. 最初と最後の頁 105606 ~ 105606
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2040-8986/abb3a9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sugisaka Jun-ichiro, Yasui Takashi, Hirayama Koichi	4. 巻 28
2. 論文標題 Profile reconstruction of a local defect in a groove structure and the theoretical limit under the vector diffraction theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 30908 ~ 30908
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.404067	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Jun-ichiro Sugisaka, Takashi Yasui, Koichi, Hirayama	4. 巻 E103-C
2. 論文標題 Reconstruction of scatterer shape from relative intensity of scattered field by using linearized boundary element method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 30-38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2019ECP5013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sugisaka Jun-ichiro, Onishi Ko	4. 巻 24
2. 論文標題 Optimal design of photon-sieve holograms for fine-line image generation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Optics	6. 最初と最後の頁 035605 ~ 035605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2040-8986/ac4c87	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sugisaka Jun-ichiro, Yasui Takashi, Hirayama Koichi	4. 巻 39
2. 論文標題 Design of an optical linear discriminant filter for classification of subwavelength concave and convex defects on dielectric substrates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America A	6. 最初と最後の頁 342 ~ 342
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/JOSAA.437771	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 有馬秀三朗, 杉坂純一郎, 田口健治
2. 発表標題 ニューラルネットワークとホログラムを用いた 凹凸欠陥の識別システム - 欠陥幅に依らない識別システムへの拡張 -
3. 学会等名 電磁界理論研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 有馬秀三朗, 杉坂純一郎, 田口健治
2. 発表標題 ニューラルネットワークとホログラムを用いた 凹凸欠陥の識別システム - ホログラムとニューラルネットワークの同時学習 -
3. 学会等名 電磁界理論研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 有馬秀三朗, 杉坂純一郎, 田口健治
2. 発表標題 粗面の散乱を用いた微小欠陥の凹凸識別システム
3. 学会等名 電磁界理論シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 有馬秀三朗, 杉坂純一郎, 田口健治
2. 発表標題 表面レリーフ回折格子内部の不均質な屈折率分布の光学的推定限界
3. 学会等名 光関係合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉坂純一郎, 安井崇, 平山浩一
2. 発表標題 周期的表面レリーフ格子の非回折波による断面形状推定
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉坂純一郎, 安井崇, 平山浩一
2. 発表標題 誘電体表面の微細凹凸欠陥の識別用ホログラムの設計
3. 学会等名 電磁界理論シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 有馬秀三朗, 杉坂純一郎, 田口健治
2. 発表標題 ニューラルネットワークとホログラムを用いた微小欠陥の凹凸識別システム
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉坂純一郎, 原田建治, 平山浩一
2. 発表標題 体積 境界要素結合解析を用いた遠方散乱界による誘電体凹凸表面下部の屈折率分布推定法
3. 学会等名 光関係合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 島田慎吾, 杉坂純一郎
2. 発表標題 誘電体表面の三次元微細欠陥識別ホログラムの設計と特性解析
3. 学会等名 電子情報通信学会北海道支部インターネットシンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 フォトンシープホログラム及び微細光学像投影装置	発明者 杉坂純一郎, 安井崇, 平山浩一	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-183428	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

北見工業大学 数理波動システム研究室 https://sugisaka.gi-thub.io/cwslab/index.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	安井 崇 (Yasui Takashi) (20403438)	北見工業大学・工学部・准教授 (10106)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関