

レーザスペckル認証による類似物体の個体識別

龍宮寺 嵩士^{1,a)} 北野 和哉¹ ビンダー ヨハネス¹ 石山 壘¹ 船富 卓哉¹ 向川 康博¹

概要

コヒーレントな光を物体に照射した際に観測されるレーザスペckルは、独立性・ランダム性が高いパターンであるため、個体識別に適している。しかし、このパターンは物体の微小なずれにより大きく変化する為、位置ずれに対するロバスト性の低さが課題となる。本稿では、高精度な個体認証を実現するためにロバストなレーザスペckル光学系を用いた個体識別システムを構築した。実験結果より、位置ずれに対してロバストにかつ精度よく物体識別する事が確認された。

1. はじめに

シリアルナンバーやバーコードなどの明示的な識別タグを付与せずに、物体が持つ固有の物理的な特徴を計測して個体識別を行う「人工物メトリクス」とよばれる技術が、真贋認証や製造現場におけるトレーサビリティ確保などの用途で活用されている [1]。一例として、物体表面の微小な凹凸パターンを「物体指紋」として撮像し、画像のパターンマッチングにより個体認証する技術がある [2]。本稿では、コヒーレントな光を物体に照射した際に生じる、物体の微細形状に依存する独立性・ランダム性の高いパターンであるレーザスペckルを用いた個体識別手法を取り扱う。レーザスペckルとは、レーザ光などのコヒーレントな光を物体表面に照射した際に、微細形状によって攪乱された波がそれぞれ重ね合わさる事で生じる斑点状の模様である。このパターンは、物体の微細構造や光学系の構成によって決定されるため偽造が困難であり、一波長より大きな粗面であればどのような材質でも観測できるため個体認証に最適である。しかし、レーザスペckルは物体の位置が少しでも変化するとパターンが大きく変化してしまうため、位置ずれに対するロバスト性が低い点が問題である。

本稿では、画像センシングシンポジウムで報告されたレーザスペckル光学系構築のための指針 [3] を用いて光学系を構築し、位置ずれに対してロバストなレーザスペckル認証を行うための光学系と認識システムを実装した。

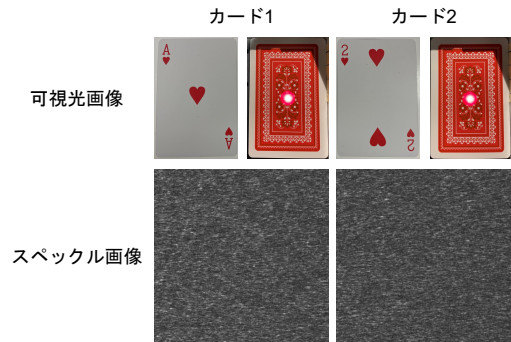


図 1 実際のスペckル画像

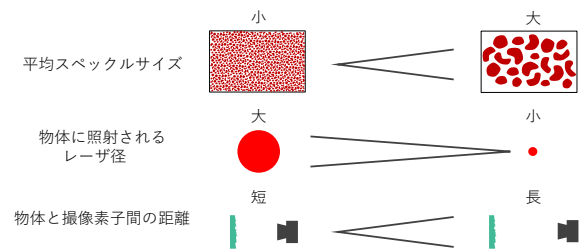


図 2 光学系の各種パラメータに対するスペckルサイズの変位

2. レーザスペckルの性質

物体表面の微細構造と光学系の構成がレーザスペckルの大きさに与える影響を解説する。図 1 に異なるトランプカードの裏面を計測した際に得られるスペckル画像を示す。カードの裏面はどちらも同じ絵柄であるが、観測されたスペckル画像はそれぞれ異なるパターンである。これは、同じ製品であっても表面の微細構造が異なるためである。スペckルパターンから固有の特徴量を抽出する為には、パターンを構成する斑点模様の最小単位であるスペckルサイズが重要となる。ここで、山口らはスペckルサイズはレーザビーム径に反比例し、計測対象とカメラの距離に比例すると述べている [4]。よってレーザビーム径が大きいほど照射範囲が広いために計測対象の位置ずれに対してロバストになるが、画像平面におけるスペckルサイズが小さくなるために観測が困難になる。また、計測対象とカメラの距離が遠いほどスペckルサイズが大きくなるが、コントラストの低下によってスペckルパターンの検出が困難になる。上記の性質より、レーザスペckル認証

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

^{a)} ryuguji.takashi.rt9@is.naist.jp

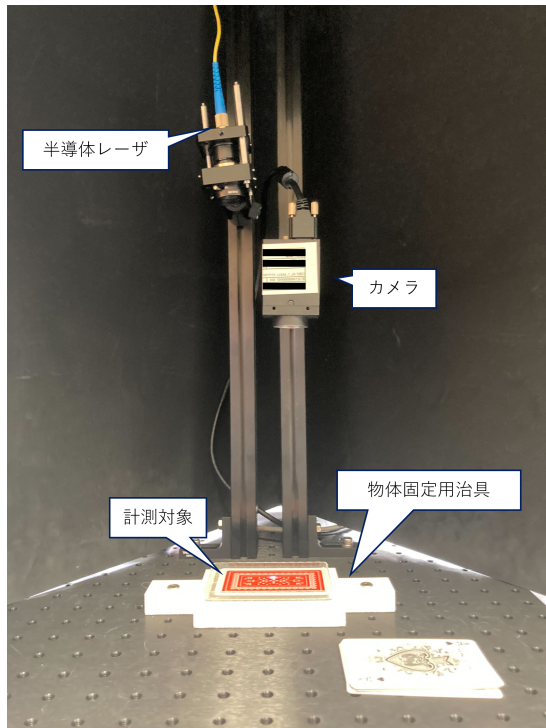


図 3 本稿で構築した光学系の構成

において「計測対象とカメラの距離」, 「レーザービーム径」が重要なパラメータとなる事が分かる. 本稿では, 北野らが提案した光学系設計の指針 [3] を用いて並進に対してロバストな個体識別システムを構築する.

3. 構築したシステムの概要

3.1 光学系の構成

本研究で構築したレーザスペックル認証光学系の構成を図 3 に示す. 計測対象の物体をレーザとカメラの中心に配置し, レーザスポットが物体中心を照射するように少し傾けた. また, カメラの撮像面と計測対象の物体平面が平行になるように取付けた. さらに, 物体平面に垂直な軸の回転や高さ方向のずれを防ぐために固定用の治具を設置した. 前章で述べた指針に基づき, カメラの高さをステージから 200 mm 前後に設定し, レーザビーム径を 10 mm に設定した. また, 光源は波長が 670.4 nm の半導体レーザを使用し, カメラは画素サイズ 4.54 μm 四方で解像度 1920 \times 1440 画素の GS3-U3-28S5M-C (FLIR 製) を用いた.

3.2 識別方法と実行結果

本研究では, あらかじめ計測したテンプレート画像と計測対象より得られるスペックル画像の類似度を正規化相互相関を用いて計算した. 予備実験として, テンプレート画像で撮影した物体と同じ物体を観測した場合と異なるを観測した場合の相関値を計測した. 実験には, トランプ 2 枚を用いて一方のカードのスペックル画像を観測してテンプレート画像を作成し, テンプレート画像を登録した物体と

未登録の物体でそれぞれ相関値を計測した. 結果, テンプレート画像で用いた物体と同じ物体を計測した場合は相関値が 0.4 以上となり, 異なる物体の場合は相関値が 0.1 以下となる事が分かった. よって, 本稿で構築した個体識別システムで用いる検出しきい値を 0.4 以上とした.

構築した個体識別システムの処理は以下の通りである.

- 事前に計測対象のスペックル画像を取得し, 画像中心より 256 \times 256 画素切り抜きラベル付けを行った後, 画像をデータベースに登録する.
- 認証時は治具に計測対象を配置し, レーザを照射してスペックル画像を観測する.
- 登録した画像との類似度を正規化相互相関により計算する. 相関値が 0.4 以上の場合, 画像のラベルと相関値を表示する. 一致するデータがない場合, UNKNOWN と相関値を表示する.

製作した個体識別システムの動作を確認するために実環境実験を行った. 実験では, トランプ 54 枚のうち, スペードのトランプ 13 枚と JOKER を 1 つ用意し, トランプの裏面にレーザを照射した際に得られるスペックルパターンを特徴量として使用し, それぞれのトランプを識別する. スペードのカード 13 枚の裏面を事前に計測してデータベースに登録した後, JOKER を含めた 14 枚で実験を行った. 図 4 に, スペードの ACE, 8, KING, JOKER の 4 枚のトランプの裏面に対して個体識別した際の実験結果を示す.

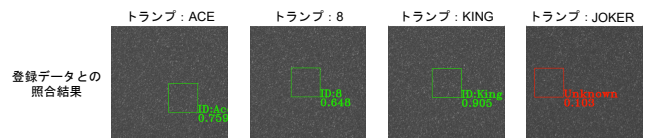


図 4 構築した個体識別システムでの認証結果

実験より, データベースに登録されたトランプに対して高精度な個体識別を確認した. また, 未登録のトランプである JOKER に対する相関値が十分低いことから, レーザスペックルは個体特有の特徴を捉えており, 個体識別の有効性を示した. さらに, 計測時にトランプカードを再配置するために位置ずれが生じるが, そのような場合でも高精度に個体識別ができる.

4. まとめ

本稿では光学系設計の指針を参考に, レーザスペックル認証に最適な光学系の構築を行い, 実験を通して高精度な識別結果と位置ずれに対するロバスト性を確認した. また, データベースに登録する計測対象が増加するに従って相関値計算の回数が増加するためにフレームレートの低下がみられた. 今後の課題として, 多数の物体を高速に認証するために, 正規化相互相関の高速化やアルゴリズムの最適化が必要であると考えられる.

謝辞

本研究の一部は JST さきがけ JPMJPR2025, JSPS 科研費 JP23K16902 の支援を受けた。

参考文献

- [1] 人工物メトリクスを用いた個体管理技術ガイダンス. CPSEC テクニカルレポート, No. CPSEC-TR-2022001, 2022.
- [2] 高橋徹, 牧野賢吾, 石山 壘. 人工物メトリクスに基づく多種多様な製造物の個体管理の実現に向けた物体指紋の撮影方法とその照合方式の確立. 精密工学会誌, Vol. 87, No. 2, pp. 164–168, 2021.
- [3] 北野 和哉, ビンダー ヨハネス, 石山 壘, 舩富 卓哉, 向川 康博. レーザスペックルを用いた物体認証のための光学系設計の指針. 第 29 回画像センシングシンポジウム, June 2023.
- [4] 山口一郎. レーザースペックルの性質と計測への応用. 実験力学, Vol. 2, No. 3, pp. 153–160, 2002.