

レーザスペckルを用いた物体認証のための光学系設計の指針

北野 和哉† ビンダー ヨハネス† 石山 壘†† 船富 卓哉† 向川 康博†

† 奈良先端科学技術大学院大学 †† NEC

E-mail: kitano.kazuya@is.naist.jp

1 緒論

バーコードなどの明示的な識別タグを付与することなく、物体の個体毎に固有の特徴をセンシングして個体識別や認証を行う「人工物メトリクス」とよばれる技術が、偽造品対策のための真贋認証や製造現場におけるトレーサビリティ確保のための個体識別管理などの用途で活用されている [1]. その一つに、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、画像パターンマッチングにより個体認証する技術がある [2]. 多種多様な物体の「指紋」を精度良く認識できるよう明瞭に撮影するための FIBAR 方式と呼ばれる光学系設計の指針も示されており、利用者が容易に光学系を設計実装することができる [3]. また、ある程度の位置ずれに対しても一般的な画像処理で対応が可能である。しかし、対象物の物性によっては指紋パターンが類似し、高精度なパターン識別アルゴリズムが要求されることや、照明環境の変動には弱く、近接での撮影あるいは強い照明や遮光カバーなどが必要であり、用途によっては装置の大きさやコストなどの課題があった。

一方、コヒーレントな光が物体表面の微細構造によって拡散されることで生じるランダムな波の重ね合わせであるスペckルは、照明環境の変動の影響を受けにくいことから、物体の微細な変位の計測 [4] や、レーザスペckル認証 (LSA) を代表とする様々な物体識別技術 [5] に応用されている。後者は特に、照明環境の変動に強く、物体個体毎の認証パターンの独立性・ランダム性が高いため高精度な識別が容易という利点がある一方で、位置ずれ等に対してセンシティブという課題があった。

Samsul ら [6] はスペckルの安定性を評価するために、顕微鏡と平行移動・回転ステージを用いてレーザスペckルのずれに対する許容値を計測し、数 mm 程度の並進運動や数度の角度変化でも許容できないことを明らかにした。Yeh ら [7] は、プラスチックカードを対象とし、ガボールフィルタと SIFT 特徴量を組み合わせたロバストな特徴量抽出手法を提案した。しかしながら、識別精度や位置ずれなどに対するロバスト性の高い光学系の設計手法を提案する従来研究はほとんどなく、利用者は試行錯誤を繰り返して光学系を構築し

なければならない。

そこで本研究では、レーザスペckルを用いた物体認証のための光学系設計の指針を明らかにする。まず、スペckルパターンが特徴量として利用できるスペckルサイズの平均値と画素サイズの関係性を明らかにし、実環境実験にてその有効性を示す。また、指針に基づいて設計された環境を用いて、並進に対するロバスト性を向上させる方法を考察し、実環境実験にてその効果を確認する。

本論文の貢献は、簡単に安定したスペckル観測用の光学系を設計するための指針を明らかにした点と、その指針により並進に対するロバスト性向上が容易となった点である。これらによって、様々な対象物に対してレーザスペckルを活用した物体認証システムを実用化することが容易となり、応用の拡大に貢献する。

2 スペckル観測に適した光学系の設計

2.1 光学系とスペckルサイズの関係

本論文は、図 1 に示すようにコリメートされたレーザビームを対象物体に照射し、撮像素子の画像平面と物体平面が平行に配置された光学系を対象とする。この光学系は、物体表面で拡散された波面を撮像素子で直接観測する構成である。レーザスペckルを用いる多くの研究 [6, 8] では、撮像素子にカメラレンズを取り付けた光学系を採用しているが、光波の重ね合わせを観測する点において本構成と大きな差異はない。また、本構成はカメラレンズなどの光学系を簡略化できる点、レンズがないために対象物体との距離をより長く取れる点、コリメート光の照射によって計測対象面の並進移動とスペckルパターンの並進移動が連動する点などで優位性がある。

図 2 に本手法で取り扱う光学系の構成を用いて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。全てのカードで裏面の絵柄は同じであるが、撮影されたスペckル画像はそれぞれ異なるパターンが観測される。これは、同じ製品であっても表面の微細構造が異なり、またスペckルパターンが物体表面の微細構造に依存するためである。

山口らは画像平面で観測されるレーザスペckルの

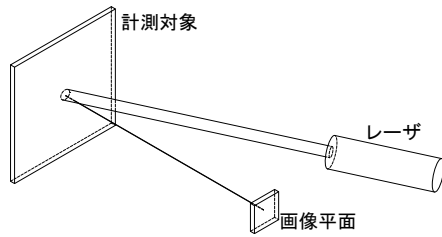


図1 本論文で対象とする光学系の構成

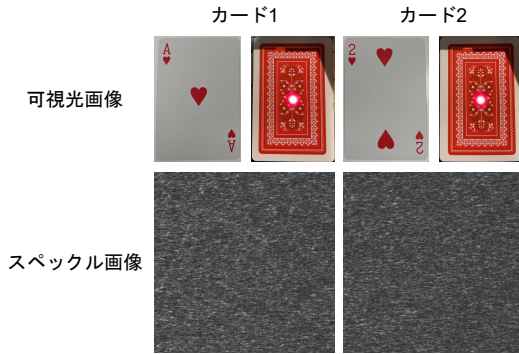


図2 カード裏面のスペckル画像

最小サイズが物体の表面粗さに依存せず、光学系の構成によって変化すると明らかにした [4]。この条件が成り立つ計測環境として以下の二つを仮定している。

1. レーザの照射スポット径が計測対象の表面粗さより十分に大きい
2. 計測対象の表面粗さがレーザー光の一波長より大きい

これらの条件は鏡面などで破綻する場合があるが、一般的な物体では概ね満たされる。本手法で構築した光学系では、レーザー光線と物体表面との角度は垂直に近いのでレーザービーム径とスポット径がほぼ同一であるとみなす。物体に照射されるレーザービームの直径を d_l 、物体と画像平面との距離を L_i 、レーザー光の波長を λ と定義すると、画像平面で観測される最小のスペckルサイズ S_{\min} は次式で表される。

$$S_{\min} = \frac{\lambda L_i}{d_l} \quad (1)$$

また、平均スペckルサイズ S_{avr} は以下の値がよく用いられる [9]。

$$S_{\text{avr}} = 1.22 S_{\min} \quad (2)$$

2.2 カメラで識別可能なスペckルサイズ

次に、画像平面に表れるスペckルのサイズと撮像素子の画素サイズとの関係から特徴量として利用できるスペckルサイズを考える。スペckルを特徴量として利用する場合、すべてのスペckルを厳密に観測する必要はない。そのため、サンプリング定理より撮像素子で観測される平均スペckルサイズが画素サイズの2倍程度あればよいと考えられる。撮像素子の画

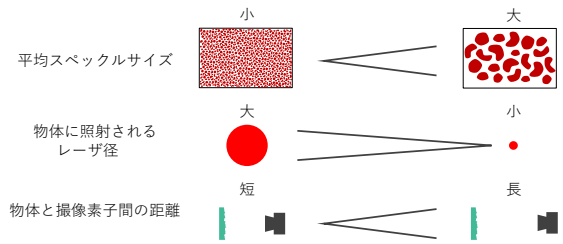


図3 光学系の各種パラメータと画像平面で観測されるスペckルサイズの関係

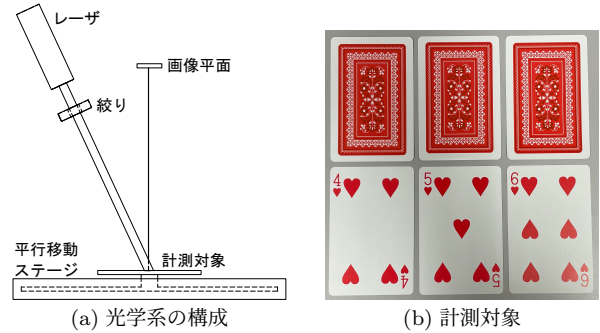


図4 実験環境

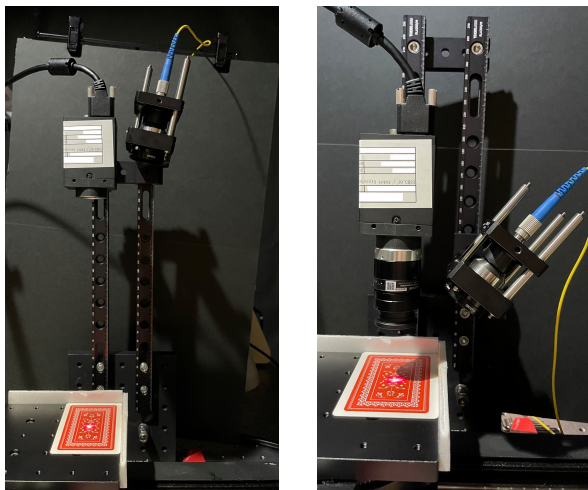
素を正方形と仮定し、画素の一辺を L_{px} とすると、構築する光学系において満たすべき平均スペckルサイズは次式で表される。

$$S_{\text{avr}} \geq 2 L_{\text{px}} \quad (3)$$

図3に光学系の各種パラメータと観測されるスペckルサイズとの関係を示す。物体に照射するレーザービーム径を大きくすることで並進や回転に対するロバスト性を向上させられるが、観測されるスペckルサイズが小さくなる。また、物体と撮像素子の距離を離すと観測されるスペckルサイズを大きくできるが、撮像素子に入射する光量の低下が問題となる。実際には、式(3)を指標として、計測する物体の大きさや並進移動に対するロバスト性の確保、設置空間の大きさなどを考慮しつつ撮像素子の高さや物体に照射するレーザービーム径の大きさを最適化する。

3 実験と考察

光学系の構成として、図1のレーザー光源にビーム径を制御するための絞りを追加し、物体を並進移動させるための平行移動ステージを設置した。光源として波長が670.4 nmの半導体レーザーを使用し、カメラは画素サイズ4.54 μm 四方で解像度1920 \times 1440画素のFLIR製GS3-U3-28S5M-Cを用いた。また、計測対象としてプラスチック製のトランプカードを使用し、その裏面を計測した。光学系の構成と計測対象を図4に示す。実験では、スペckル画像の類似度を計算するために画像間の正規化相互相関を計算した。



(a) 最適な条件の光学系

(b) 最適でない光学系

図5 実験1で用いた光学系の構成

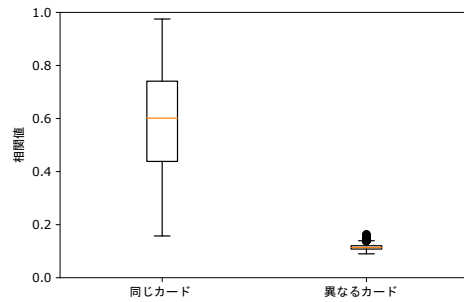
3.1 最適な光学系を用いた識別精度の評価

スペックル観測に最適な条件を満たす光学系とそうでない光学系を構築し、それぞれの系におけるスペックル画像群の相関値分布を評価する。実験では、図4(a)の構成で最適な条件を満たすよう、カメラをステージ平面からCマウントレンズ取り付け口の高さを207mmに設定し、コリメートされたレーザービームを物体表面に対して少しだけ傾けて照射する。条件を満たさない光学系の構成として、従来構成[7, 8]を参考に焦点距離35mmのレンズ(FUJIFILM製HF35XA-5M)を取り付けたカメラを82mmの高さに設定し、カメラの光軸から45度傾けてレーザー光を物体へ照射する。また、カメラレンズのF値を1.9に調整し、画素サイズより小さなスペックルサイズに設定した。レーザー光源から射出されるビーム径はそれぞれの環境で同様である。図5にそれぞれの条件で用いた光学系を示す。

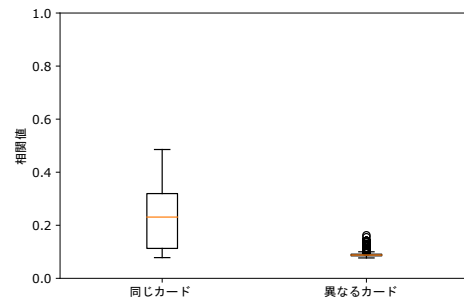
計測対象として図5(b)に示すように表面の絵柄が異なるが裏面の絵柄は全く同じであるトランプカードを複数用いる。見た目だけでなく製造法や素材としても全く同一である裏面でも、スペックル画像は個々のカードで異なる。これを計測することで表面の絵柄がどれであるかを識別することができる¹。

本実験では、それぞれの光学系で13枚の絵柄が異なるトランプカードの裏面を9回置き直して撮影した。得られたスペックル画像群を画像中心から1024×1024のサイズに切り抜いた。さらに、正規化相互相関の計算に用いるテンプレート画像を画像中心より256×256画素切り抜き、画像群との相関値を計算した。同じカードの画像間と異なるカードの画像間で相関値の分布を評価した。前者と後者の分布が完全に分離できる場合、閾値判定などの簡便な方法によって個体識別を誤りな

¹仮に表面も同じ印刷のトランプカード(同一製品)をもうひとつ用意したとしても個々を識別できるため、真贋判定や認証にも利用可能である。



(a) 最適な光学系の場合



(b) 最適でない光学系の場合

図6 それぞれの光学系におけるスペックル画像群の相関値分布

くできることを意味する。一方、双方の分布が重なりが大きいくほど、パターン識別の問題として難しく識別精度が下がることを意味する。

図6にそれぞれの光学系で得られたスペックル画像群に対する相関値の分布を示す。実験結果より、最適な条件を満たす光学系で計測されたスペックル画像群では、同じカードの画像間と異なるカードの画像間で相関値の分布が大きく異なり、簡便な閾値処理でこれらを分離できる事が分かる。すなわち、最適な条件の光学系では、スペックル画像を個体識別の特徴量として十分利用できると言える。

一方、最適でない光学系で計測されたスペックル画

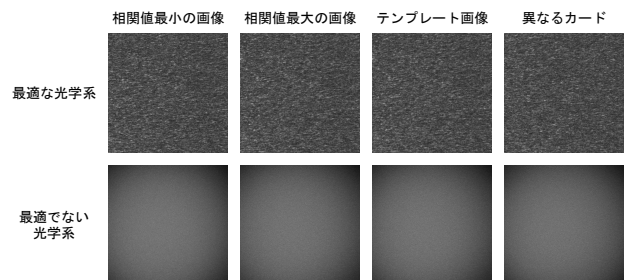


図7 それぞれの光学系で相関値が最大・最小となるスペックル画像とテンプレート画像、異なるカードで観測されたスペックル画像

像群では、同じカードの画像間と異なるカードの画像間で相関値の分布が重なっており、それぞれが容易には分離できないことが分かる。これは、最適でない光学系で得られるスペックル画像は、個体識別のための特徴量として十分機能しないことを示している。

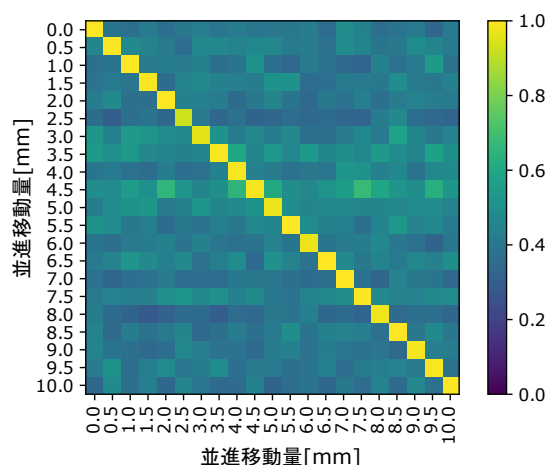
図7にそれぞれの光学系で観測されたスペックル画像のうち、テンプレート画像との相関値が最大・最小となった同一カードのスペックル画像、および異なるカードのスペックル画像を示す。最適な光学系では、相関値が最大のスペックル画像とテンプレート画像がほとんど同じパターンであり、相関値が最小の場合でもテンプレート画像と類似した画像が観測されている。一方、異なるカードのスペックル画像を同じカードから観測された左3枚を比較すると、スペックルパターンが異なることが見て取れる。一方で、最適でない光学系では、高周波なノイズ状のスペックルパターンが観測される。撮像平面に入射する波面によって形成されるスペックルパターンは画素サイズより小さいためにパターンの特徴を捉えていない。

3.2 並進移動に対するロバスト性の評価

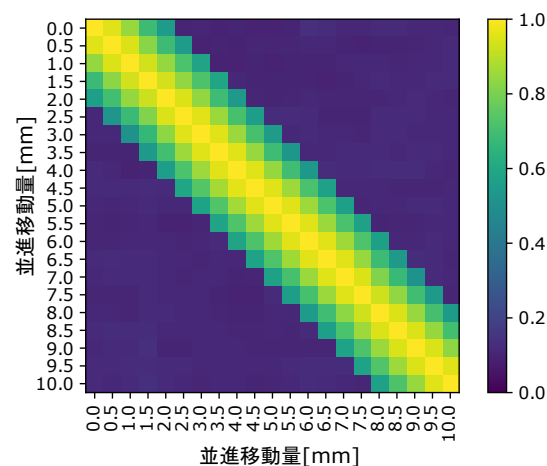
レーザービーム径と計測対象の並進移動に対するロバスト性の関係について評価する。実験では、絞りの大きさを調整して1mmと10mmの2種類のレーザービーム径を用いた。これらを計測対象であるトランプの裏面に照射し、これを0.5mm単位で10mm移動させてそれぞれのスペックル画像を撮影した。得られた画像群のうち、正規化相互相関の計算に用いるテンプレート画像を画像中心より256×256画素切り抜いて用いた。それぞれの移動距離でのスペックル画像に対する相関値を計算し、並進移動に対するロバスト性を評価した。カメラとレーザーの配置は3.1節で構築した最適な条件を満たす光学系の配置と同様である。

図8にそれぞれのレーザー径における物体を並進移動させた場合のスペックル画像の相関値を示す。実験結果より、レーザービーム径が小さい場合はどの位置においても0.5mm程度の移動で相関値が急激に低下する事が分かる。これは、同じカードであっても、レーザー照射位置が少しでも変化すると異なる個体として識別されてしまう事を意味する。一方、レーザービーム径が大きい場合、対角要素のみならずその周辺の相関値が高いことが分かる。相関値から4.0mm程度の変位であれば誤りなく物体を識別できると考えられる。

また、図9に4.5mm、5.0mm、5.5mmの並進移動時に観測されたスペックル画像を示す。また、4.5mm、5.0mmをそれぞれ青、赤色に割り当て、0.5mmの並進移動に対応する画素数だけずらして重ね合わせた画像を右端に示す。レーザー径1mmでは、3枚の画像でパターンが大きく変化している。一方、レーザー径10mmで得られた画像では、輝点などの特徴的なパターンが



(a) レーザビーム径 1 mm



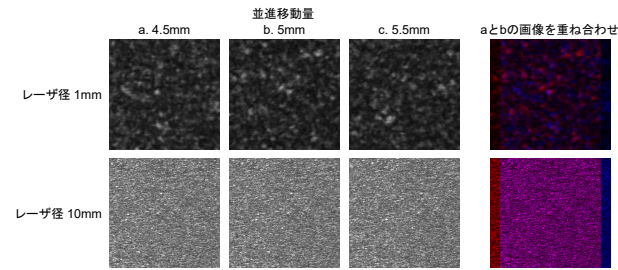
(b) レーザビーム径 10 mm

図8 物体を並進移動させた際のスペックル画像間の相関値

並進移動している様子が分かる。また、重ね合わせた画像の結果より、レーザー径1mmの場合では赤や青の色が視認でき、ほとんどのパターンが一致していないことを示している。これに対して、レーザー径10mmでは重なった部分がほぼ紫色に視認でき、パターンがある程度一致している様子が分かる。

4 結論

本論文では、スペックルサイズに関する従来研究を参考に、レーザースペックルを用いた物体認証に最適な光学系の構成を理論的に考察し、実環境実験を通してその有用性を示した。スペックル観測に最適な光学系の条件として、画像平面で観測される平均スペックルサイズを指針として用い、サンプリング定理に照らして画素サイズが平均スペックルサイズの2倍程度必要であると規定した。実環境実験では、最適な条件を満たす光学系とそうでない光学系を構築し、それぞれにおいてプラスチック製のカードを用いた画像相関値の



右の画像は a と b の画像をそれぞれ青，赤チャンネルに割り当てて約 0.5mm の並進に対応する画素数ずらして重ね合わせたものである。模様が重複している画素は青と赤チャンネルの輝度に偏りがないため鮮やかな紫となる。

図 9 各ビームサイズにおける物体を並進移動量させた場合のスペックル画像

分布の比較を行い，識別問題としての難易度が大きく異なることを示した。また，最適な光学系の条件下において，レーザーのビーム径を大きくする事で並進移動に対するロバスト性が向上することを示した。

並進に対するロバスト性については，従来研究 [6] では 0.154 mm とされていたが，本論文ではこれを 4.0 mm 程度に向上させた。レーザスペックルを用いた物体認証の従来研究では，光学系設計の最適性は論じられておらず，位置ずれのロバスト性を担保するために対象物を固定する治具を個別設計したり，パターンマッチングのアルゴリズムを工夫したりするなど，システム全体から見るとアドホックな個別最適化にとどまっていた。このため，レーザスペックル自体は様々な物体と用途に活用可能な汎用的な人工物メトリクスでありながら，実用化には個別最適化の試行錯誤が必要であり，開発コストやリスクなど応用拡大のハードルとなっていたと考えられる。本論文で示された光学系設計の指針により，レーザスペックルによる物体認証の適用拡大に大きく貢献できると考えている。例えば，対象物が自動搬送される製造ラインなど，従来技術では位置ずれ等が課題となり実現できていなかった様々な用途での実用化が容易になると期待される。

今後の課題として，円形以外の様々な照射パターンにおける最適な光学系パラメータの構築や，光軸方向に対する移動や傾き，回転方向に対するロバスト性の評価やその向上が挙げられる。

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ドンス. 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] 工藤佑太, 高橋徹, 牧野賢吾, 石山壘. 拡散反射面の物体指紋撮影に適した照明照射方法. 信学技報 PRMU2018-150, pp. 103–108, 2019.
- [4] 山口一郎. レーザ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.
- [5] James Buchanan, Russell Cowburn, Ana-Vanessa Jausovec, Dorothee Petit, Peter Seem, Gang Xiong, Del Atkinson, Kate Fenton, Dan Allwood, and Matthew Bryan. Forgery: ‘fingerprinting’ documents and packaging. *Nature*, Vol. 436, p. 475, 08 2005.
- [6] Wiwi Samsul, Henri Uranus, and Muhammad Danang Birowosuto. Static laser surface authentication with low-cost microscope: Tolerances on spatial and angular disturbance. *Journal of Optics*, Vol. 44, pp. 1–8, 05 2015.
- [7] Chia-Hung Yeh, Po-Yi Sung, Chih-Hung Kuo, and Ruey-Nan Yeh. Robust laser speckle recognition system for authenticity identification. *Optics Express*, Vol. 20, No. 22, pp. 24382–24393, Oct 2012.
- [8] Mikael Sjö Dahl and Erik Olsson. Robustness of laser speckles as unique traceable markers of metal components. *Digital*, Vol. 1, No. 1, pp. 54–63, 2021.
- [9] 山口一郎. スペックル応用計測技術と最近の動向. 計測と制御, Vol. 21, No. 9, pp. 881–890, 1982.