

物体の位置ずれを考慮したレーザスペckル認証のための 位相回復を用いた参照データの拡張

仲 純平^{1,a)} 北野 和哉¹ 石山 壘¹ 船富 卓哉¹ 向川 康博¹

概要: レーザスペckル認証はレーザ照射面の移動にセンシティブであり、認証する物体の位置ずれによって認証精度が著しく低下する。幅の広いレーザ光が照射面の並進移動に対するロバスト性を向上させることが既に明らかとなっているが、光軸方向の移動に対する対策は依然として課題である。本研究ではスペckルの3次元コヒーレンス特性から、幅の広いレーザ光が光軸方向の移動に対するロバスト性を低下させるために、並進移動と光軸方向の移動に対するロバスト性はトレードオフの関係にあることを明らかにした。また、位相回復を用いた参照データの拡張によってトレードオフが解消できることを示した。

1. はじめに

物体の材質や表面の微細な凹凸形状などの物理的特徴に基づいた人工物メトリクス [1] と呼ばれる個体識別手法が提案されている。この手法では物体の物理的特徴を「参照データ」として記録し、これを個体識別のための特徴として用いる。物理的特徴に基づく特徴は、改ざんや複製が困難であるため、工業製品の偽造品対策や、個体識別管理などの用途で活用されている。その手法の一つにレーザスペckル認証があり、粗面を持つ物体の表面にレーザ光を照射したときに観察されるスペckルパターンを用いて個体識別を行う [2]。この手法は、物体表面の微細な凹凸を利用するため、高精度な個体識別が可能であるが、物体の位置ずれによってスペckルパターンが大きく変化するため、位置ずれに対するロバスト性の向上が課題である。

北野ら [3] はスペckルサイズに関する従来研究に基づいて最適な光学系の構成を理論的に考察した。最適な光学系では、従来手法に比べて光軸方向に垂直な面の並進移動に対するロバスト性を向上させ、最大 4mm 程度の許容移動量を実現した。

物体の並進移動の他に光軸方向の移動も識別のロバスト性に影響を与えるが、こちらの対処方法についてはこれまでほとんど議論されてこなかった。Gatti ら [4] は、スペckルの3次元コヒーレンス特性の理論を示し、ある位置で観測されたスペckルパターンの3次元的な変形を明らかにした。この理論によると、物体から撮像素子までの距離が一定の場合、レーザビームの直径が大きいほど物体が光

レーザビーム径	大	...	小
光軸方向の移動に対するロバスト性	低	...	高
並進移動に対するロバスト性	高	...	低

図 1 レーザビーム径と2方向のロバスト性のトレードオフ

軸方向に移動したときのスペckルパターンの変化も大きくなる。レーザスペckル認証では、ある距離におけるスペckルパターンを参照データとして記録するため、観測のときに少しでも位置ずれが生じると参照データと一致しなくなる。したがって、レーザビームの直径が大きいほど光軸方向の移動に対するロバスト性は低下する。一方で、レーザビームの直径が小さくなると光軸方向のスペckルパターンが変化しにくくなるため、光軸方向の移動に対するロバスト性は向上するが、レーザの照射範囲が狭くなるために並進方向のロバスト性が低下する。つまり、光軸方向の移動に対するロバスト性と並進移動に対するロバスト性は図1に示すようなトレードオフの関係にあるため、双方のロバスト性を同時に向上させる事が困難である。

そこで、我々は並進移動に対するロバスト性を維持したまま光軸方向のロバスト性を向上させるために、少数の参照データを拡張することによってロバスト性を向上させる手法を提案する。我々の手法は、異なる位置でスペckルパターンを複数回撮影し、位相回復によって参照データを密に内挿・外挿する。本手法では、疎な参照データの計測と拡張によって光軸方向のロバスト性を向上させる。

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

^{a)} naka.jumpei.ni8@is.naist.jp

2. 手法

2.1 スペックルの3次元コヒーレンス特性

物体の光軸方向の移動に伴うスペックルパターンの変化の程度は、レーザービームの波長やレーザービームの直径、物体表面から撮像素子までの距離などで決まる。

ここでは物体表面に並行な方向に対するスペックルの直径をスペックルの横サイズ、物体表面と撮像素子を結ぶ光軸方向のスペックルの長さを縦サイズと呼ぶ。縦サイズはレーザスペックル認証における光軸方向のロバスト性に関係する。縦サイズが大きいほど、物体の光軸方向の移動に対して、スペックルパターンは変化しにくくなる。

スペックルが観察される物体表面上の空間は図2に示すようにディープフレネル領域、フレネル領域、フラウンホーファー領域の3つの領域に分けることができ[4]、領域ごとにスペックルのサイズは異なる数式で表される。物体表面 ($z = 0$) から VCZ 距離 ($z_{VCZ} = \delta x_0 D / \lambda$) までの領域はディープフレネル領域と呼ばれる。 D はレーザービームの直径を表し、 λ はレーザービームの波長を表す。この領域では、スペックルの横サイズ δx は伝搬距離によって変化せず、常に一定であり、次式で表される。

$$\delta x = \delta x_0 \quad (1)$$

ここで、 x_0 は物体表面におけるスペックルのサイズを表す。スペックルの縦サイズ δz は δx を用いて次式で表される。

$$\delta z \propto \frac{\delta x^2}{\lambda} \quad (2)$$

VCZ 距離以降では、スペックルの横サイズは次式で表される。

$$\delta x = \frac{z\lambda}{D} \quad (3)$$

VCZ 距離からフラウンホーファー距離 ($z_{Fr} = D^2/\lambda$) までの空間はフレネル領域と呼ばれる。ここではスペックルの縦サイズは次式で表される。

$$\delta z = \frac{\delta x^2}{\lambda} \frac{1}{1 - \frac{z}{z_{Fr}}} \quad (4)$$

この式から、 $z = z_{VCZ}$ で豆粒状だったスペックルが $z = z_{Fr}$ にかけて針金状に伸びていくことがわかる。図3にレーザービーム径が1mmと10mmのときの物体表面から距離 $z = 200\text{mm}$ まで光が伝搬する様子を示す。レーザービーム径が1mmのとき、スペックルが z 方向に伸びる様子が顕著に表れている。

フラウンホーファー距離以降の空間はフラウンホーファー領域と呼ばれる、この領域ではスペックルの縦サイズは無限大になる。つまり、フラウンホーファー領域では伝搬距離が変化してもスペックルパターンは変化しない。

光軸方向のロバスト性だけに着目すれば、撮像素子をフ

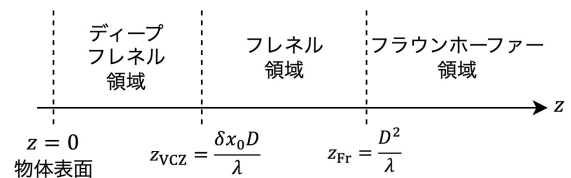


図2 物体表面からの距離によって定められる3つの領域

ラウンホーファー領域に配置するのが最も良い。フラウンホーファー領域は物体表面から最も遠方の領域であるが、レーザービームの直径を小さくすることで現実的に撮像素子を配置可能な距離までフラウンホーファー領域を近づけることが可能である。しかし、レーザービームの直径を小さくすると物体のわずかな並進移動も許容されなくなるため、単純にレーザービームの直径を小さくすることはできない。

そこで、ある程度小さなスペックルの縦サイズを前提として、ロバスト性の向上方法を検討する必要がある。

2.2 スペックルパターンを用いた個体識別手法

レーザスペックル認証では他の人工物メトリクス[1]と同様に図4に示すような2段階の処理で個体識別を行う。登録処理は、物体から参照データを作成し、データベースに保存する処理である。この処理は以下に示す4つの手順に分けられる。

- (1) スペックルパターンの撮影。物体を規定の位置に配置してレーザービームを物体表面に照射し、撮像素子でスペックルパターンを撮影する。
- (2) 参照データ作成。撮影したスペックルパターンを適切なサイズに加工して、これを参照データとする。
- (3) ID生成。物体に対応するIDを生成する。
- (4) 格納。データベースにIDと参照データを紐づけて保存する。

識別処理は、物体から作成した判定対象データが、登録されたどの物体の参照データと合致するの(または合致する参照データが存在しないか)を検証する処理である。識別処理は5つの手順に分けられる。

- (1) スペックルパターンの撮影。登録処理と同様の手順で物体のスペックルパターンを撮影する。
- (2) 判定対象データ作成。撮影したスペックルパターンを適切なサイズに加工して、これを判定対象データとする。
- (3) 参照データ候補リストの取得。判定対象データと一致する可能性のある参照データ候補リストをデータベースから取得する。
- (4) 照合スコア算出。リストにある参照データ群と判定対象データの照合スコアを算出する。照合スコアとして正規化相互相関を用いる。スコアは「全く一致しない」を意味する0から「完全に一致する」を意味する1までの範囲の値となる。

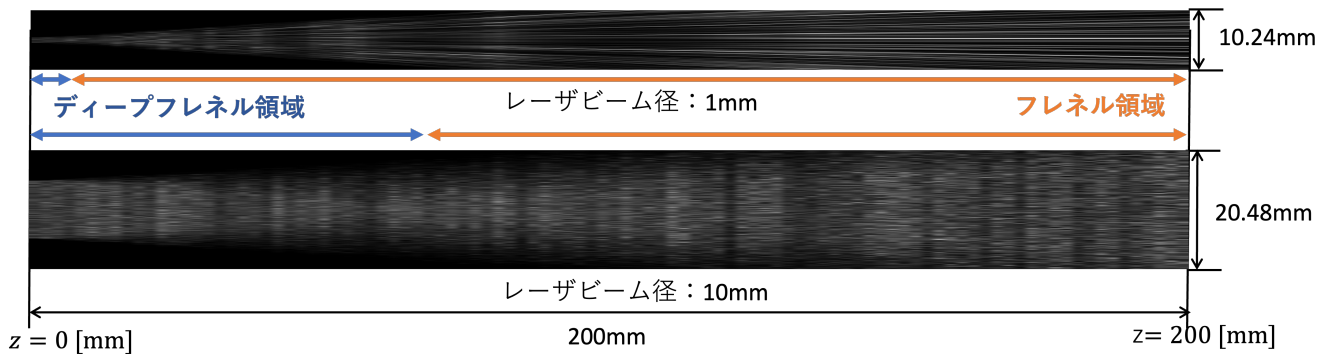


図 3 物体表面 ($z = 0\text{mm}$) から $z = 200\text{mm}$ まで伝搬するスペックル。シミュレーション時の画像平面の幅をレーザービーム径 1mm のとき 10.24mm, レーザービーム径 10mm のとき 20.48mm とした。

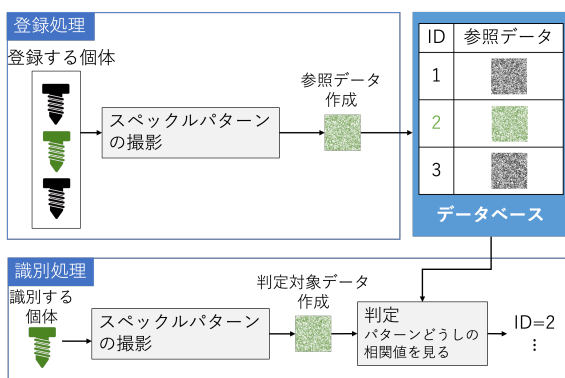


図 4 個体識別のための 2 段階の処理

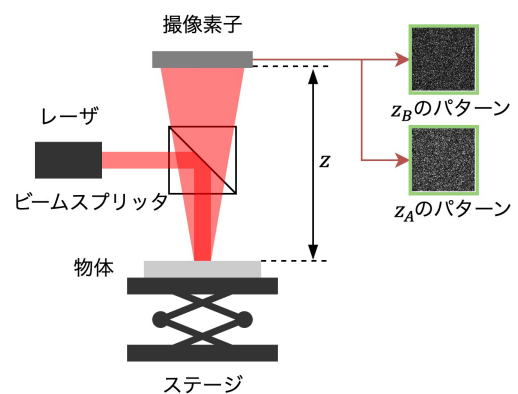


図 5 本手法で想定する光学系

(5) 識別判定. 規定のしきい値と照合スコアを比較し, 判定対象データに合致する参照データに対応する 0 個または 1 個以上の ID 候補を選定し, 相関値より識別順位を付けて識別結果として出力する.

ここで, 登録処理と識別処理で物体の位置が変化すると, 同じ物体を観察しているにも関わらず, 参照データと判定対象データが一致しなくなる問題が生じる.

2.3 登録処理における複数撮影

物体の位置ずれによって生じるスペックルパターンの変化に対応する方法として, 登録処理で複数のスペックルパターンを撮影する方法が考えられる. 登録処理で複数回撮影する方法は次の通りである.

- (1) 複数の距離におけるスペックルパターンの撮影. 個体を規定の位置に配置して撮像素子でスペックルパターンを撮影したあと, 個体を光軸方向に一定間隔移動させ, 再度撮影する. ここで, 物体の移動が想定される範囲をすべてカバーするように移動と撮影を繰り返す.
 - (2) 参照データの作成.
 - (3) ID 生成.
 - (4) 格納. データベースに ID と撮影したすべての参照データを紐づけて保存する.
- このように物体の位置ずれが想定される範囲内で複数の

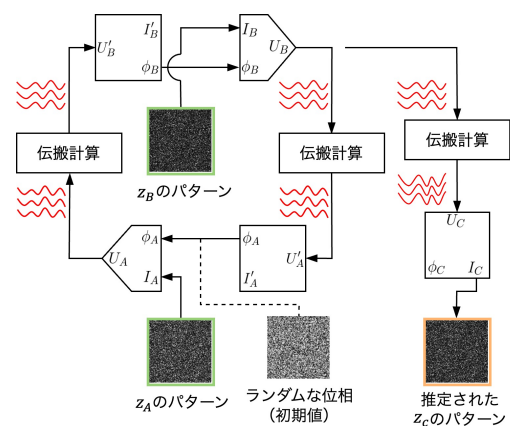


図 6 位相回復を用いたスペックルパターンの推定

スペックルパターンを撮影することで, 個体の識別が可能な範囲を広げることができる. ただし, 一個体に対して数多くの撮影が必要になることは留意しなければならない.

2.4 位相回復を用いた参照データの拡張

個体の識別が可能な範囲を広げるためには, 一個体に対して数多くのスペックルパターンが必要であるため, 撮影回数が増えることが問題である. この問題に対処するために, 本研究では, 撮影した少数のスペックルパターンから

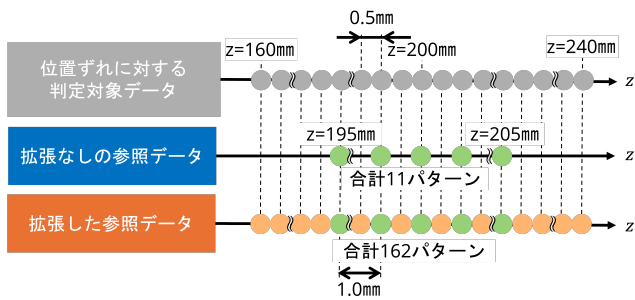


図 7 シミュレーション実験で生成した異なる距離のスペックル画像

なる参照データに対して物理的な波面の伝播を考慮した内挿と外挿を行うことで、参照データを拡張する。

本手法で想定する光学系を図 5 に示す。この光学系では、レーザビームがビームスプリッタを介して物体表面に垂直に照射される。撮像素子と物体表面の距離 z はステージで変更可能である。

図 6 は、2つの距離 z_A と z_B で撮影されたスペックルパターンをもとに、他の距離 z_C でのスペックルパターンを推定する例を示している。スペックルパターンの推定には、位相回復と角スペクトル法による伝搬計算を行う。まず、距離 z_A で撮影したスペックルパターンの強度 I_A から、ランダムな位相を用いて波面 U_A を構成する。次に、波面 U_A に伝搬計算を行い、距離 z_B 上での波面 U'_B を推定する。その後、距離 z_B で計測したスペックルパターンの強度 I_B と U'_B の位相 ϕ_B を用いて波面 U_B を構成する。さらに、 U_B に伝搬計算を行い、距離 z_A における波面 U'_A を推定する。その位相 ϕ_A と強度 I_A から再び波面 U_A を構成し、このプロセスを繰り返すことで、位相 ϕ_A と ϕ_B はそれぞれ 1 つの解に収束する。位相が収束した後、波面 U_B に伝搬計算を行い、他の距離 z_C での波面 U_C を推定する（波面 U_A から計算することも可能である）。このとき、波面 U_C の強度 I_C が、推定されたスペックルパターンである。本手法を用いて、複数の距離でスペックルパターンを推定することで異なる高さにおけるスペックル画像群を得る。得られた画像群を用いて、識別処理で得られる画像と正規化相互相関を計算することで、個体識別を行う。以上の手法により、限られた枚数のスペックルパターンから広範囲の位置ずれに対応したスペックルパターンの推定が実現する。本手法は、撮影回数を抑えつつ、個体識別における位置ずれの影響を軽減できる点が利点であり、光軸方向の位置ずれ軽減への効果が期待される。

3. 実験

シミュレーション実験を通じて、物体を光軸方向に移動させながら少数のスペックルパターンを撮影し、参照データを拡張することで、認証精度の評価を行う。はじめに、図 5 の光学系をもとにシミュレーション環境を構築した。このときレーザビーム径は 10 mm に設定した。識別処理

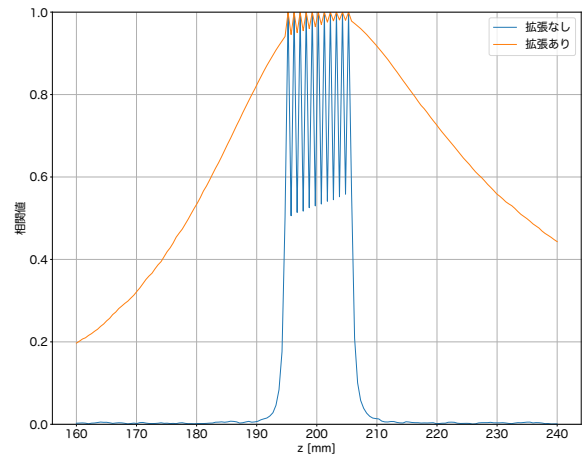


図 8 実験結果

で $z = 160$ mm から $z = 240$ mm までの 80 mm の範囲で位置ずれが起こることを想定し、参照データを拡張せずに 10 mm の範囲のスペックルパターンのみで構成された参照データ群と、拡張して 80 mm の範囲のスペックルパターンからなる参照データ群の 2 タイプを作成した。拡張なしの参照データ群は、 $z=195$ mm から $z=205$ mm までの 10 mm の範囲内で 1 mm ごとに撮影された 11 個のパターンから構成されている。拡張した参照データ群は、11 パターンに加え、 $z = 160$ mm から $z = 240$ mm までの範囲で位相回復による内挿と外挿を行った。実験では、識別処理における位置ずれの影響を拡張あり・なしの参照データ間で比較した。位置ずれの影響を評価するために、正規化相互相関より相関値を計算した。ある距離のスペックルパターンと参照データ群の相関値を計算し、その中で最も一致するパターン間の相関値を認証結果として使用した。図 8 に実験結果を示す。拡張なし参照データを用いた場合の相関値は、登録処理で撮影した範囲である 10 mm の範囲から離れると急激に低下する。10 mm の範囲内でも、スペックル画像群のギャップにおいて相関値の低下がみられる。拡張あり参照データを用いた際の相関値は、10 mm の範囲を超えても相関値が緩やかに低下する。10 mm の範囲内でのギャップにおいても相関値はほとんど低下しない。これらの結果より、参照データを拡張する事で光軸方向のずれに対してロバスト性が向上すると言える。

4. 結論

本論文では、位相回復を用いて少数の疎な参照データから任意の距離のスペックルパターンを推定する手法を提案し、シミュレーションに実験を通して光軸に対する位置ずれへのロバスト性が向上することを示した。今後の課題として、実環境での検証や最適な参照データの距離間隔の考察、伝播計算の効率化が挙げられる。

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ダンス. CPSEC テクニカルレポート, No. CPSEC-TR-2022001, 2022.
- [2] Buchanan J.D.R., Cowburn R.P., Jausovec A., Petit D., Seem P., Xiong G., Atkinson D., Fenton K., Allwood D.A. and Bryan M.T.: Forgery: 'fingerprinting' documents and packaging, *Nature*, 436, 475 (2005).
- [3] 北野和哉, ビンダーヨハネス, 石山塁, 船富卓哉, 向川康博: 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, 第 29 回画像センシングシンポジウム (2023).
- [4] Gatti A., Magatti D. and Ferri F.: Three-dimensional coherence of light speckles: Theory, *Phys. Rev. A* 78(6), 063806 (2008).