レーザレンジファインダによる溶射皮膜のはく離状態と 3次元位置の同時検出*

大谷 幸三^{*1}, 新原 美子^{*2}, 福島 千晴^{*3}
木戸 光夫^{*3}, 馬場 充^{*4}

Surface Condition and 3-D Position Detection of Thermally Sprayed Materials Using a Laser Rangefinder

Kozo OHTANI^{*5}, Yoshiko SHINHARA, Chiharu FUKUSHIMA,
Mitsuo KIDO and Mitsuru BABA

^{*5} Faculty of Applied Information Science, Hiroshima Institute of Technology,
2-1-1 Miyake, Saeki-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima, 731-5193 Japan

This paper describes a method of measuring the surface condition of thermally sprayed materials and its three-dimensional position with a new laser rangefinder. The feature of this rangefinder is to equip an optical position sensor which has the ability to simultaneously detect the position of a light and its incident angle onto the sensor. Moreover, the sensor has an autonomous exposure time control function with a microcomputer. Therefore, our laser rangefinder can detect the 3-D positions of an object with unknown reflectance. We constructed a prototype system and performed some experiments. First, we inspected the surface reflection of each element in thermally sprayed materials and established the measurement procedure using our rangefinder, which can identify the surface condition based on the optical properties. Next, we measured the thermally sprayed materials with several kinds of delaminations. From the measurement results, the error of the 3D position measurement was $\Delta z/z=0.7\%$, which was independent of the surface reflection of the measured objects. Regarding the detection of the surface condition, we could identify four types of delamination conditions with accuracy. The proposed method has great potential for a wide range of industrial inspections.

Key Words: Thermally Sprayed Material, Delamination Detection, Laser Rangefinder, Optical Property

1. 緒 言

セラミックス溶射材は耐熱性を有するため、熱遮蔽材として有用であるが、実機稼働中の熱的あるいは機械的負荷によって、やがては溶射皮膜にはく離や亀裂が生じ、本来の効果を失う。一般に、はく離や亀裂が生じた実機は再生利用する。そのためには、一旦、溶射皮膜を基材から完全に除去した後、再度溶射を施す必要がある。基材から溶射皮膜を除去する方法には、化学溶液を使用するケミカルストリップ法、高速固体粒子を使うブラスト法、及びウォータージェット（以下WJ）による方法などがある。現在、本研究グループでは、はく離効率が良く、しかも環境への負荷が小さいWJに着目し、それを利用した皮膜除去システム

の構築を検討している。

WJの加工特性は、噴射ノズル形状、スタンドオフ距離、噴流圧力、照射時間などに左右される。これまでの基礎実験の結果では、とくにスタンドオフ距離と噴流圧力が加工特性に大きな影響を与えていることが明らかとなっている⁽¹⁾。したがって、皮膜除去システムを自動化するには、まず、WJの噴射ノズルから溶射皮膜までの距離（3次元位置）の検出が必要不可欠となる。次に、信頼性の面から加工後のはく離状態をインプロセスで評価する必要がある。したがって、WJの照射に先行あるいは追従して加工対象の情報を検出することが前提条件になるため、画像処理にある程度の時間を必要とする一般的なステレオ法⁽²⁾などの適用は困難と考える。

そこで本研究では、レーザスポット光投影法を基本原理とした、溶射皮膜のはく離状態と3次元位置を同時検出可能なレーザレンジファインダを構築する。溶射皮膜とそのはく離部分及び基材は、それぞれ材質や表面粗さが起因して表面反射特性が異なる。これらの

* 原稿受付 2008年9月1日。

^{*1} 正員、広島工業大学情報学部情報工学科(〒731-5193 広島市佐伯区三宅2-1-1)。

^{*2} 正員、広島工業大学知能材料・機器研究センター。

^{*3} 正員、広島工業大学工学部機械システム工学科。

^{*4} 正員、茨城大学工学部知能システム工学科(〒316-8511 日立市中成沢町4-12-1)。

E-mail: ohtani@me.it-hiroshima.ac.jp

特性を利用すれば、照射したレーザスポット光の反射方向とその光強度から直接的に表面状態を獲得できる可能性がある。同時に、レーザスポット光の反射位置から、皮膜表面の3次元位置を三角測量法を基に算出可能となる。ただし、従来のレンジファインダは原理的に拡散物体しか適用できないため、本研究のように金属特有の鏡面反射をもつ物体を対象とする場合には適用できないことが知られている⁽³⁾。また、本研究で検出対象とする皮膜はく離の状態には、一般の画像解析では識別が困難な、反射特性が酷似した異なる性状が存在する。本論文では、これらの問題の解決を目的として、光沢をもつ金属材料表面にも適用可能な新たなレンジファインダを考案し、測定対象の僅かな光反射特性の違いから表面状態を識別するための測定方法について述べる。そして、試作システムによる実験では、第一段階としてWJを種々の条件に設定して皮膜除去を行った試料をオフラインで測定し、本手法の実用可能性を検証する。

2. レーザレンジファインダの諸問題

2.1 物体の表面反射特性 三角測量原理に基づくレンジファインダ⁽⁴⁾は、測定環境を整備することが可能であれば、計測精度、データの信頼性、計測時間などの面で有利な点が多い。その基本原理は、測定対象にレーザ光などを照射し、その反射光を光位置センサで捕らえることで測定対象の3次元位置を検出する。したがって、測定に際しては物体の表面反射特性について考慮する必要がある。

物体表面の光反射成分は、図1に示すように以下の特性をもっている⁽⁵⁾。diffuse lobe成分は内部散乱メカニズムを表しており、物体表面の垂直方向の周りに一様な大きさで分布している。specular lobe成分は入射光の単純反射を表しており、正反射方向、すなわち物体表面の法線に対して、光源と対称な方向の周りに分布する傾向がある。specular spike成分は鏡面反射を表し、正反射方向の周りのごく小さな領域に集中して分布している。specular spikeは、物体の表面粗さが十分小さい滑らかな場合に支配的となる。物体の表面粗さが大きくなるにつれて、次第にspecular lobe成分が支配的となってくる。表面粗さが大きい場合、specular spikeのピーク位置角度とspecular lobeのピーク位置角度が異なるoff-specular peakと呼ばれる状態が生じることが知られている^{(5), (6), (7)}。

このように物体の表面状態に応じて、上記の3つの反射成分(diffuse lobe, specular lobe, specular spike)のそれぞれが支配的な場合やそれらが混在した場合など、

Fig. 1 Surface reflectance

多様な表面反射特性が存在する。

2.2 問題点と研究方針 従来のレンジファインダでは、使用する光位置センサからはスポット光の入射画素位置しか得られないということを前提としており、測定に当たってあらかじめ求めておくべきいくつかのパラメータが必要となる^{(8), (9)}。そのため、多数の点光源を用いる方法⁽⁶⁾やパターン光を投光して求める方法⁽⁷⁾などが提案されているが、これらは鏡面物体のみに適用可能であったり、何らかの反射モデルを仮定する必要がある。また、鏡面物体の反射強度は拡散物体のそれより非常に大きいので、光位置センサのダイナミックレンジによっては飽和やブルームングが生じ、正確に入射光位置を検出することができない場合がある。逆に、拡散物体の場合ではS/N比の問題から微弱な反射光を検出できず、やはり入射光位置を検出できない場合も生じる。

そこで本研究では、センサへの入射光の画素位置と同時に入射角度をも検出可能な光位置センサ⁽¹⁰⁾を用いたレンジファインダを構築する。この光位置センサを適用すれば、測定対象へ投影したスポット光の反射光路を一意に決定することが可能となる。すなわち、一般の光位置センサを用いたレンジファインダに比べ、設定すべきパラメータや幾何学的な制約が少なく、何ら反射モデルを仮定することなく拡散物体から鏡面物体までが測定可能となる。また、光位置センサにはスポット光強度に対する自動露光切替の機能を搭載し、擬似的に広いダイナミックレンジを実現する。従来、未知な光強度をもつ光入射への対応として、CCDイメージセンサでは露光時間を調節した複数の画像を合成する方法、感度の違う撮像素子を集積する方法、などがある⁽¹¹⁾。また、CMOSイメージセンサでは、対数変換回路を各画素に設置する方法、抵抗ネットワークにより強い光信号を周囲に拡散する方法、画素値が飽和するごとに個別にリセットする方法、などがある。前者は、多段階に設定した露光時間で逐次的にデータ

Fig. 2 Overview of the position sensor

を取得するためデータ量が多く、撮像時間が長いという欠点をもつ。さらに、後者はコスト面で不利となる。これらの手法に対し、本研究の手法は測定したスポット光強度に適応して露光時間を調整するため、撮像時間が短く、扱うデータ数も少ないという利点があり高速測定が可能となる。

3. 提案するレンジファインダの基本原理と構成

3.1 光位置センサ

3.1.1 光入射位置と角度の検出 スポット光の入射位置の検出では、図2に示すように、まず、階段状に配列した2つの1次元センサアレイによりスポット光を受光する。そして、各センサアレイについて、ピーク出力を示すセンサ素子 x_i とその両隣のセンサ素子 x_{i-1}, x_{i+1} の計3素子の出力 v_i, v_{i-1}, v_{i+1} を用いてピーク付近の出力分布を2次曲線で近似し、サブピセル化してスポット光入射位置 X (mm) を検出する。ただし、 $(x_{i-1}, v_{i-1}), (x_i, v_i), (x_{i+1}, v_{i+1})$ は隣接する3つのセンサ素子の素子番号と出力電圧 (V) の組を表す。このように3点のみを用いて2次曲線近似すれば、サンプリングした3点は必ず近似曲線を通ることになり、その頂点座標、すなわち光入射位置は式(1)で算出することができる。ここで、 l (mm) はセンサ素子間隔を表し、ここでは各センサ素子間の距離は等しいと仮定する。

$$X = (x_i + \frac{v_{i-1} - v_{i+1}}{2v_{i-1} - 4v_i + 2v_{i+1}})l \quad (1)$$

次に、スポット光の入射角度は、2つのセンサアレイで検出したスポット光の入射位置の差から検出する。図2において、前後段センサアレイの間隔を d (mm) とすれば、スポット光の入射角度 α (deg) と前後段センサアレイで検出した入射位置 X_1 (mm), X_2 (mm) との間には式(2)の関係が成り立つ。

$$\tan \alpha = \frac{X_2 - X_1}{d} \quad (2)$$

Fig. 3 Block diagram of the saturation detection

したがって、式(2)から入射角度を算出することが可能となる。

3.1.2 露光時間の切替原理 前後段の光センサアレイの露光時間を計測データに応じて電子シャッターで切り替え、最小限の測定時間で擬似的に広いダイナミックレンジを実現する。露光時間切替機能の基本原理解を図3に示す。

まず、センサアレイの時系列出力からローパスフィルタ (LPF) を用いて高周波雑音を除去する。次に、飽和状態の画素、すなわち複数画素出力が一定の画素を検出する。図に示すように、飽和レベル v_i (V) で出力が飽和している画素が存在する場合、飽和直前の画素出力の差分値 a (V) と飽和した画素数 m を基に、式(3)を用いてピーク値 v_e (V) を推定する。そして、推定したピーク値が検出可能な範囲に収まるように露光時間を調整し、再度データを取得する。一方、飽和せず適切にピーク位置を検出可能な場合、2次曲線近似によって、ピーク位置 X (mm) をサブピセル化して算出する。本研究では、この機能をマイクロコンピュータ (R5F21154SP, ルネサステクノロジ社製) に実装し、光位置センサの露光制御を自動化した。

$$v_e = \frac{am}{2} + v_i \quad (3)$$

3.2 3次元位置の導出 入射位置と角度検出が可能になれば、測定対象の3次元位置 x (mm), z (mm) は、図4に示す光学系に基づいて導出した三角測量式(4), (5)から算出できる⁽¹²⁾。

$$x = z \tan(\alpha + \alpha_x) - s_1 \cos \alpha \{ \tan(\alpha + \alpha_x) - \tan \alpha \} \quad (4)$$

$$z = \frac{d + s_1 \cos \alpha \{ \tan(\alpha + \alpha_x) - \tan \alpha \}}{\cot \gamma + \tan(\alpha + \alpha_x)} \quad (5)$$

Fig. 4 Coordinate system

ここで、 α (deg) はレンズ光軸と z 軸とのなす角、 α_x (deg) は物体からの反射光とレンズ光軸とのなす角、 γ (deg) はレーザー光の投影角度、 d (mm) はレーザー光源とレンズ中心間の距離、そして、 s_1 (mm) はレンズの焦点距離 f (mm) によって式 (6) で定まるパラメータである。

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} \quad (6)$$

ただし、式 (4), (5) において、 s_1 と α_x は未知数である。ここで、光線のレンズへの入射位置 h (mm) と光位置センサでの入射位置 w_x (mm)、レンズとセンサ間の距離 l (mm) 及び入射角度 ϕ (deg) の間には式 (7) が成り立つ。

$$h = w_x + l \cdot \tan \phi \quad (7)$$

したがって、 s_1 はガウス光学の法則を用いて式 (8) のように求めることができる。

$$s_1 = \frac{f \cdot (w_x + l \cdot \tan \phi)}{w_x + (l - f) \cdot \tan \phi} \quad (8)$$

s_1 が求まれば、残る未知パラメータ α_x は、式 (9) のように h と s_1 のみで表すことができる。

$$\alpha_x = \tan^{-1} \frac{h}{s_1} \quad (9)$$

さらに、鏡面物体であれば、測定対象の傾き β (deg) を式 (10) により算出することができる。

$$\beta = \frac{\alpha_x + \alpha + \gamma - \pi/2}{2} \quad (10)$$

なお、光位置センサは入射スポット光の x 位置と x 軸に対する角度を検出することはできるが、 y 位置と

y 軸に対する角度は検出できない。したがって、本レンジファインダで測定可能な物体形状は、 y 方向に曲面をもたない柱状物体に限定される。このとき、レーザー光源と光学系（レンズと画像センサ）を同一 xz 平面上に配置し、投影するレーザー光も xz 平面に平行な光線とすれば、測定対象物体の y 位置はレーザー光源と光学系の y 位置と一致することになる。

以上より、測定対象の表面反射特性に依らず3次元位置を計算することが可能になる。

3.3 反射特性の測定 物体表面を物理的に正確にレンダリングするためには、物体表面での光の反射現象、つまり表面反射特性をモデル化する必要がある。実世界では、表面反射特性は非常に複雑であり、これを空間全体に渡って計算しようとする、途方もない時間がかかってしまい実用性がなくなる。そこで、コンピュータグラフィックスの世界では、一般にレンダリングする物体の条件を限定して、表面反射特性を物体への入射光度に対する反射光度の比を用いた双方向反射関数 (BRDF: bi-directional reflectance distribution function, 以下 BRDF と記す) で具体化している。BRDF が最終のレンダリングした面の表現において最も大きな影響を持つため、BRDF の適切な表現を生成することが重要になってくる。BRDF は図 5 と式 (11) に示すように、入射角度 θ_i, ϕ_i における光強度 $I(\theta_i, \phi_i)$ 及び反射角度 θ_e, ϕ_e における光強度 $L(\theta_e, \phi_e)$ の比で表現される。

$$f(\theta_i, \phi_i, \theta_e, \phi_e) = \frac{dL(\theta_e, \phi_e)}{dI(\theta_i, \phi_i)} \quad (11)$$

したがって、BRDF を測定値から求める場合、入射角度、視線角度、そのときの光の強さの情報が必要となる。提案するレンジファインダでは、対象物体の形状を柱状と仮定していることから、入射角度 $\phi = 2/\pi$ とし、入射角度 θ_i に対する反射角度 θ_e のみを用いて反射特性を測定する。したがって、入射角度がレーザーの投光角度、視線角度がセンサの姿勢 (角度)、光の強さはセンサの出力電圧となる。このとき、検出されたレーザー照射点の3次元位置を基に、レーザー光源とセンサ間距離及びセンサの視線方向を制御すれば所望の反射成分を測定することができる。

4. 試作システムによる実験

4.1 装置構成と測定方法 試作レンジファインダは、図 6 に示すように、主に光位置センサとレンズ系、レーザー光源 (出力 5mW, 波長 635nm)、自動移動ステージ、AD 変換器及びコンピュータからなる。レーザー光源は回転ステージ、光位置センサは x 軸ス

Fig. 5 Geometry of surface reflection

ステージ上の回転ステージ、また、測定対象は y 軸ステージにそれぞれ設置しており、その位置と姿勢を分解能 $1\mu\text{m}$ と 0.01° でコンピュータ制御可能としている。光位置センサは2台のライン CCD (TCD1305P, 東芝⁽¹³⁾) を階段状に配置して構成した。TCD1305P は電子シャッタ機能をもち、この電子シャッタの周波数を 3.1.2 節の方法によりマイクロコンピュータで制御し、入射スポット光の強度に応じて自動的に露光時間を切り替える。レンズ系は焦点距離 50mm の両凸レンズと $\phi=5\text{mm}$, 長さ 30mm の円柱レンズから成る。物体からの反射光は、まず両凸レンズで集光され、さらに光位置センサの受光面と平行に配置された円柱レンズで y 方向へシート状に拡散される。このようにレンズ系を構成することで、階段状アレイ型センサでは同じ y 位置に入射した光を検出することが可能となる。試作システムの外観写真を図 7 に示す。

測定対象の表面反射特性を考慮した計測を行うためには、厳密には反射光の方向（レーザ照射点の法線ベクトル）とその光強度を獲得する必要がある。前節で述べたように、本研究のレンジファインダでは、反射光に鏡面反射成分が含まれれば、測定対象の法線ベクトルを検出可能である。しかし、後述するように皮膜が除去された面には鏡面反射成分が含まれていないため、レーザ照射点の法線ベクトルを直接求めることはできない。そこで、光位置センサの x 位置と視線方向を変化させ、1つのレーザ照射点について複数の異なる方向から反射光強度を観測し、視線方向の偏差と反射光強度の相関から反射特性を推定する。具体的には、以下のような手順で測定を行う。ここで、反射光強度は光位置センサで得られた光量の積分値を用いた。

- (1) レーザ照射
- (2) 光位置センサで反射光を受光
- (3) レーザ照射点の3次元位置を算出
- (4) 光位置センサを x 方向に -20mm 移動

Fig. 6 Overview of the laser rangefinder

Fig. 7 Photo of the prototype rangefinder

- (5) (3) で得た3次元位置 (x, z) に基づき、光位置センサの光軸をレーザ照射点の方向に合わせる。光位置センサの視線方向 α は以下より算出する。

$$\tan \alpha = \frac{z}{x + 20i} \quad (12)$$

ここで、 i は x 方向への移動回数を表す。

- (6) 反射光強度を取得。(4)~(6) を10回 ($1 \leq i \leq 10$) 繰り返す。

このように光位置センサを x 方向に 20mm ごとに移動させた場合、4.4 節の実験のように測定対象である平板の (x, z) 位置を (140~180mm, 200mm) とすると、視線方向 45° の正反射強度から視線方向 20° 近辺までの反射強度を、約 $2 \sim 4^\circ$ おきに取得できることになる。

4.2 試作レンジファインダの基本特性 図 8 に示す4つの反射特性 (surface1~4) を約 7.0mm 幅でもつ平板を測定対象とし、試作システムの基本特性を測定した。それぞれの反射特性は、鏡面特性の優位な surface 1, 2, 次に拡散特性の優位な surface 3, 4 の順に並んでいる。surface 1 と 4 の光強度の比は約 40dB である。

Fig. 8 Surface reflectance of the measured objects

Fig. 9 Position measurements in the z direction

測定結果を図9に示す。図は検出した平板の位置(x, z)を、計測中に選択された露光時間を示すモード(A:488.0 μ s, B:122.0 μ s, C:30.5 μ s, D:7.6 μ s)とともに示している。図に示すように、試作システムが反射光強度に応じて露光時間を切り替えながら計測できていることがわかる。このときの、奥行き z に対する誤差 $\Delta z/z = 0.6\%$ であった。

4.3 溶射皮膜表面の反射特性 本研究で対象とするセラミックス溶射皮膜は、基材(ステンレス鋼)-ボンドコート層(Ni-Cr)-トップコート層(Al_2O_3)の3層から形成される。基材表面はボンドコート層の接合強度を増すために、32~36 μ m程度の個体粒子を吹き付けた微小な凹凸が存在する(ブラスト面)。ボンドコート層は、基材とトップコート層を粘着する役割を担う。したがって、WJを利用してトップコート層をはく離させた場合、主に、基材、トップコート層、ボンドコート層及びブラスト面の表面反射特性を考慮すれば、その表面状態が識別可能となる。

図10にそれぞれの概観写真と表面反射特性を示す。図(a)~(c)の矩形内部が、トップコート層、ボンドコート層及びブラスト面であり、矩形外部は基材である。図(d)の表面反射特性はトップコート層の最大値

Fig. 10 Surface reflectances of the elements of the thermally sprayed material

で正規化している。基材は研磨されたステンレス鋼であり顕著な鏡面反射特性を示している。トップコート層では、ブラスト面などと比較すると全方向へ大きく拡散している。ブラスト面とボンドコート層は、トップコート層に比べると反射光強度は小さく、正反射方向への反射光強度はいずれも約1/2程度である。ブラスト面とボンドコート層の特性は酷似しており、市販の画像処理ソフトによる輝度解析結果においても図11のようにピーク階調こそ異なるものの、輝度分布の大半は重複している。これは、一般の画像解析では双方を識別することが困難であることを示している。しかし、これらの反射特性を図10(d)を基に詳細に比較すると、ブラスト面の方がボンドコート層よりも僅かに正反射方向へ集中しており、この特性の違いが検出できれば双方を識別可能となる。

4.4 3次元位置とはく離状態の検出結果 実験では、実際にWJで皮膜をはく離させた2種類の測定対象を使用した。それぞれの概観写真を図12(a)と13(a)に示す。測定対象1には、WJのスタンドオフ距離を5.0mm、噴射圧力を60, 100, 150, 200MPaに設定して皮膜を除去した合計4種類のはく離跡が存在する。一方、測定対象2には、噴射圧力を100MPa、スタンド

Fig. 11 Intensity distributions by image analysis

オフ距離を 10.0mm, 15.0mm とした場合の 2 種類のはく離跡が存在する。これらの測定対象を光位置センサとレーザ光源をベースラインとして、奥行き距離 (z 方向) 約 200mm の位置に設置し, x, y 方向に 1mm 間隔で約 35mm 四方を測定した。

図 12(b) と 13(b) に 3 次元位置の測定結果をそれぞれ示す。このとき, 測定対象は y 方向に形状変化がないものとし, 同一 x 位置の測定点ごとに yz 平面で最小 2 乗法を適用すると, 図 12(c) と 13(c) に示すように奥行き z に対する最大誤差 $\Delta z/z$ は約 0.7% (1.4mm) であり, 対象表面には異なる反射特性が混在しているものの, 反射特性による測定精度のばらつきは見られなかった。本研究で目標としている WJ のスタンドオフ距離の制御には, 噴射圧力にもよるが絶対値で 1.0mm 程度の精度があればよく, 光学系の校正が厳密ではない試作システムとしては, ほぼ目標を達する結果が得られた。ただし, 3 次元計測の結果からは, 深さ 100 ~ 200 μm 程度のはく離跡を確認することはできなかった。

次に, 図 12(c) と 13(c) に表面状態を検出した結果を示す。図は, 反射光強度 (センサ出力電圧の積分値) を $x-y$ 軸上にカラーマップで表している。測定対象の写真と比較すると, 反射光強度が溶射皮膜のはく離跡をよく反映していることがわかる。ここで, 前節で測定した反射特性を基に以下のように閾値を設定し, はく離箇所のみを抽出した結果が図 (d) であり, さらに, ボンドコート層とブラスト面を分離した結果が図 (e) と (f) である。図 10 で示す反射特性によれば, 皮膜とはく離部分の反射特性 (反射強度) は大きく異なる。そこで, 皮膜とはく離部分の識別に関しては, 正規化後の反射強度 0.5 を閾値とした。一方, ブラスト面とボンドコート層の正反射方向 (45°) の反射強度は近接しているが, 正反射方向から外れるにしたがってブラスト面の反射強度の方が小さくなる。そこで, ブラ

スト面とボンドコート層の識別に関しては, 視線方向が約 20° における反射強度 0.2 を閾値とした。

ボンドコート層はブラスト面上に処理された接合材であり, 本来は皮膜とともに除去されていなければならない。したがって, ブラスト面と識別された箇所が多いほど, 適正に皮膜が除去されたことを示している。測定対象 1 に存在する 4 本のはく離跡のうち, 噴射圧力が 100, 150, 200MPa の場合には, はく離跡の境界部分に僅かにボンドコート層が確認されるが, 大半はブラスト面が表出しており, ほぼ同程度の精度で皮膜が除去されている。さらに, 100MPa の場合は 150, 200MPa の場合と比較して, 表出したブラスト面の面積がやや小さいこともわかる。また, 60MPa の場合では, 皮膜が施された境界部分のみがはく離しており, ほとんどが除去されずに残っている。一方, 測定対象 2 のスタンドオフ距離が 10.0mm のはく離跡は, 測定対象 1 と比較するとスタンドオフ距離が大きくなった分 WJ 噴射の範囲が広がっているが, 一様にブラスト面が表出しており十分に皮膜が除去されていることが伺える。しかし, 15.0mm の場合には, はく離跡の境界部分に若干皮膜の除去が確認されるが, ほとんどがボンドコート層と識別されており十分とは言えない。ここで, 円状のはく離跡は溶射施工時の不良が主原因ではなく離したものと推定している。

測定結果の妥当性を検証するため, 同じ測定対象を三次元荒さ測定器で測定した結果を図 14 (a), (b) に示す。図 (a) の測定対象はスタンドオフ距離 5mm, 噴射圧力 100MPa のはく離跡, 図 (b) はスタンドオフ距離 15mm, 噴射圧力 100MPa のはく離跡である。図 (a) では, 中央付近が完全にはく離してブラスト面が露出しているが, 皮膜とブラスト面の境界部分には緩やかな傾斜があり, ここにボンドコート層が露出していることがわかる。これに対し, 本手法でも中央部分ではブラスト面, 境界部分ではボンドコート層をそれぞれ検出できている。また, 図 (b) では大半の皮膜が残り, 数箇所ボンドコート層が露出しているものの, ブラスト面までは WJ が到達していないことがわかる。この場合についても, やはり本手法によってはく離部分の大半をボンドコート層と識別できている。以上の測定結果は, WJ による皮膜除去の特性⁽¹⁾とよく符合しており, 本手法の妥当性を十分に示しているものと考えられる。

本手法では, 照射するスポット光の径サイズが表面状態の識別に影響を与える。すなわち, レンジファインダで観測している反射特性は照射点 (面) 内の平均的な特性になっているため, とくにはく離部分の境界

Fig. 12 Measurement results for object 1

Fig. 13 Measurement results for object 2

Fig. 14 Measurement results by 3-D roughness detector

では、皮膜、ブラスト面、及びボンドコート層が混在している可能性が高く、これが誤認識の要因となっている可能性がある。したがって、識別に要求される空間分解能に応じてレーザスポット光の径サイズを検討する必要がある。ただし、現段階では表面状態の識別精度について詳細な解析が困難なため、今後さらに検討していく必要がある。

5. 結 語

本研究では、WJによる溶射皮膜の除去システムに適用する技術として、レーザレンジファインダによる溶射皮膜のはく離状態と3次元位置を検出する手法を提案した。本レンジファインダは、入射位置と入射角度を検出可能な特殊な光位置センサから構成されており、測定対象の表面反射特性に対する制約を大幅に軽減している。

試作システムによる溶射皮膜のはく離状態の検出実験では、複数の方向から観測したレーザ反射光の光強度と反射位置から、精度よく表面状態と3次元位置を検出可能であることを示した。本手法は、一般に画像計測として利用されるステレオ法などと比較して、2値化やテンプレートマッチングなどの処理を必要とせず、反射スポット光の方向、位置及び強度から直接的に3次元位置とはく離状態を検出可能である点に特徴がある。そのため、WJの照射に先行あるいは追従して、高速に測定対象の状態を検出する用途に対して有効であると考えられる。今後の課題としては、WJ加工機

との組み合わせに伴う機構の検討や水煙が測定に与える影響の排除などが挙げられる。

謝 辞

本研究の一部は「文部科学省ハイテク・リサーチ・センター整備事業（平成16年度～）」によるものである。

文 献

- (1) C. Fukushima, Y. Yonehara, Y. Shinbara and M. Kido, An Application of Water Jet for Removal of Thermally Sprayed Materials, *Proceedings of the 87th Regular Meeting of the Japan Thermal Spraying Society*, 101, (2008)
- (2) T.Y. Young, *Handbook of pattern recognition and image processing: Computer vision*, (1994), Academic Press.
- (3) M. Baba, T. Konishi and H. Handa, Shape measurement of columnar objects with specular surfaces by slit ray projection method, *IEICE Transactions on Information and Systems*, Vol.J83-D-II, No.8 (2000), pp.1773-1782.
- (4) F. Chen, G. M. Brown and M. Song, Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods, *Optical Engineering*, Vol.39 (2000), pp.10-22.
- (5) S.K.Nayar, K.Ikeuchi and T.Kanade, Surface reflection physical and geometrical perspectives, *IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.12, No.4 (1989), pp.402-409.
- (6) Y.K.Ryu and H.S.Cho, New optical sensing system for obtaining the three-dimensional shape of specular objects, *Optical Engineering*, Vol.35, No.5 (1996), pp.1483-1495.
- (7) S.H.Nayar, K.Ikeuchi and T.Kanade, Determining Shape and Reflectance of Hybrid Surfaces by Photometric Sampling, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.6, No.4 (1990), pp.418-431.
- (8) A. Murata, J. Y. Zheng, Y. Fukagawa and N. Abe, Shape Recovery of Specular Objects from Multiple Lights, *IEICE Transactions on Information and Systems*, Vol.J80-D-II, No.7 (1997), pp.1659-1667.
- (9) T. Azuma, K. Nobori, K. Uomori and A. Morimura, Development of Multi-Slit Rangefinder, *IEICE Transactions on Information and Systems*, Vol.J84-D-II, No.6 (2001), pp.1020-1032.
- (10) K. Ohtani, M. Baba and T. Konishi, A New Sensor for Detecting the One Dimensional Incident Position and the Angle of a Light Spot Simultaneously, *Transactions of the Japan Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.37, No.9 (2001), pp.799-806.
- (11) T. Tsukada, S. Yamamoto, H. Matsuo and A. Iwata, A Method for Measuring of 3-D Objects Having Uneven Reflection Surfaces, *IEICE Transactions on Information and Systems*, Vol.J81-D-II, No.6 (2002), pp.208-211.
- (12) M.Baba, D.Narita and K.Ohtani, An Advanced Rangefinder Equipped with a New Image Sensor Having the Ability to Detect the Incident Angle of a Light Stripe, *Journal of Optics, A: Pure and Applied Optics*, Vol.6, No.1 (2004), pp.10-16.
- (13) Toshiba Corporation, The Data sheet of TCD1305P (2001)