3次元計測プロジェクションマッピングによる 変位分布計測結果の実物上でのリアルタイムな可視化*

鈴木 壮 大** 藤 垣 元 治*** 大 津 雅 亮***

Real-time Visualization on Actual Object of Measured Displacement Distribution
Using Three-dimensional Shape Measurement Projection Mapping

Sodai SUZUKI, Motoharu FUJIGAKI and Masaaki OTSU

The demand for non-contact inspection methods is increasing in various fields. However, there is a problem that it takes a great deal of effort for the operator to recognize the defect areas on the actual object from the measurement results displayed on the monitor. Authors have already proposed a three-dimensional shape measurement projection mapping system to reduce the problem. In this study, the prototype was applied to visualize the displacement distribution on an actual object. The measured displacement distributions images of flat and bent steel sheets due to small thermal local deformation, which was difficult to recognize with the naked eyes, were projected onto the actual object in real-time. The projected displacements in time-series was almost same the value shown by the laser displacement meter. The effectiveness of the projection of the distribution of evaluated values obtained from measured object was confirmed.

Key words: 3D shape measurement, whole-space tabulation method, projection mapping, 3D shape measurement projection mapping

1. 結 言

非接触による3次元形状計測は製造業をはじめ、医療、土木、衣料分野など幅広い需要がある¹⁾。高精度かつ高速な3次元形状測定手法として、格子投影法がよく用いられている^{2)~4)}。この手法は、幅広で滑らかな曲面対象物にも有効に適用できるので、とくにパラボラアンテナや建造物の外壁、車のボディや船舶の製造などに用いられる板金加工された部材などが、設計値通りに加工できているかどうかを確認する検査装置としての需要が高まっている。また、船舶のように溶接を必要とする製造方法の場合、溶接時に発生する熱変形を把握する必要がある⁵⁾。3次元計測を利用して、溶接時に発生する熱変形の可視化は試行されており⁶⁾⁷⁾、製品の精度を確保することに役立っている。しかし実際に3次元計測を適用した製品検査の現場において、作業者がモニタなどの機器に表示される3次元計測結果から実物の表面上の対応する位置を確認する作業には労力がかかるという問題がある。例えば、板金加工された部材の平面度計測などで特徴の少ない平坦な大型構造物を計測する場合、ゆがんでいる部分がモニタ上に表示されたとしても、その位置の特定に時間がかかる。そのような手間を少なくする手法が求められている。この問題に対して、3次元計測結果や解析結果をプロジェクションマッピングにより計測物体上に直接投影することは非常に有効である。3次元計測後の解析により得られた評価値の分布を対象物に投影すれば、作業者は注目すべき点を容易に認識することができる。

プロジェクションマッピングを工業や医療へと利用する研究は多く行われている⁸⁾⁹⁾、とくに3次元計測と実物上へのプロジ

ェクションマッピングをリアルタイムに行う技術は20年以上前に考案され、試作されている¹⁰⁾¹¹⁾。当時は3次元計測を行うカメラの画素とプロジェクションマッピング用のプロジェクタの画素をハーフミラーで光学的に1対1に合わせることで、複雑な座標変換計算を行うことなしに3次元計測結果を投影していた。また、その後もプロジェクションマッピングと3次元計測を利用した研究も盛んに行われている^{12)~17)}。近年は、GPGPUなどを用いて座標変換計算を高速に行う手法などにより、リアルタイムに3次元計測結果をプロジェクションマッピングすることができるようになってきた。

著者らはこれまでに、各画素で位相と座標の対応テーブルを作ることにより、高速かつ高精度に3次元形状計測が行える全空間テーブル化手法を開発してきた^{18)~21)}。この手法は、カメラの画素ごとに投影格子の位相と3次元座標の対応関係をテーブル化しておく手法である。計測時には実際の座標計算を必要とせず、事前に作成したテーブルを参照することのみで3次元座標を得ることができる。さらに、この全空間テーブル化手法を利用して、3次元計測結果からプロジェクタで投影する画像を瞬時に生成する手法を開発し、試作システムを構築した²²⁾。以下、これを3DM-PM (3D shape measurement projection mapping) システムと呼ぶ。これまでに開発した3DM-PMシステムは、特徴の少ない大型物体の場合でも、作業者にとって計測結果と計測物体上の位置の対応付けが容易にできるものとなっている。

本研究では、試作した3DM-PMシステムを変位分布計測に適用し、鋼板が熱変形することで発生する変位分布を実物上に投影することで可視化する。この時、計測結果として得られた変位の値とレーザ変位計の値を比較することで、本システムの計測精度と有効性を検証した。

* 原稿受付 令和2年7月27日

掲載決定 令和2年11月2日

** 学生会員 福井大学大学院 (福井県福井市文京3丁目9-1)

*** 正 会 員 福井大学大学院

2. 3次元計測プロジェクションマッピング¹⁸⁾

3DM-PMにおける計測結果または評価結果は、マッピング用プロジェクタから計測対象物の表面に投影される。この場合、マッピング用プロジェクタとカメラの位置、向き、画像サイズが異なるため、投影画像は計測対象物の3次元形状に合わせた変形をして生成される必要がある。計測によって得られた3次元点群を座標変換するには複雑な計算が必要となることが多いが、3DM-PMでは、全空間テーブル化手法を利用した座標変換テーブルを用いることで、短時間に投影画像を生成することができる。

全空間テーブル化手法を用いて3DM-PMを実現するには、3次元計測をするための、位相情報と実座標を対応付けるためのキャリブレーションと、計測して得られる3次元座標を投影画像の座標に変換するためのキャリブレーションが必要である。図1は、基準面上のある点の座標と計測用プロジェクタから投影された格子パターンの位相値とマッピング用プロジェクタから投影された格子パターンの位

相値との関係を示す図である。図1(a)は、計測用プロジェクタから投影された格子パターンの位相値と1画素における z 座標との関係を示す図であり、図1(b)は、計測用プロジェクタから投影された格子パターンの位相値と1画素における z 座標との関係を示す図である。

基準面は z 軸に対して垂直に配置し、 z 軸方向に平行移動ができるようにする。基準面には光拡散シートが表面に取り付けられた液晶モニターを用いている⁹⁾⁹⁾。そこに表示する x 方向と y 方向の格子パターンをカメラで撮影し、その位相値を求めることにより、各点における x 座標と y 座標をそれぞれ求めることができる。

カメラの1画素は、それぞれの基準面位置 $R_0, R_1, R_2 \dots R_N$ に応じた点 $P_0, P_1, P_2 \dots P_N$ を撮像する。それぞれの点における $\theta_{m0}, \theta_{m1}, \theta_{m2} \dots \theta_{mN}$ は、計測用プロジェクタから投影された格子パターンの位相である。このとき、 i 方向についてそれぞれの点における $\theta_{im0}, \theta_{im1}, \theta_{im2} \dots \theta_{imN}$ を液晶ディスプレイに表示される格子パターンの位相とし、 $\phi_{ip0}, \phi_{ip1}, \phi_{ip2} \dots \phi_{ipN}$ をマッピング用プロジェクタの格子パターンの位相とする。 j 方向についても同様とする。キャリブレーションをすることで、カメラの各画素において、計測用プロジェクタから投影された位相値 θ_{mk} ($0 \leq k \leq N$)と、液晶ディスプレイの表示から得られる i 方向の位相値 θ_{imk} ($0 \leq k \leq N$)と j 方向の位相値 θ_{jmk} ($0 \leq k \leq N$)、マッピング用プロジェクタの i 方向の位相値 ϕ_{ipk} ($0 \leq k \leq N$)と j 方向の位相値 ϕ_{jpk} ($0 \leq k \leq N$)、および各基準面の位置における3次元座標が得られる。マッピング用プロジェクタから取得した i 方向の位相値 ϕ_{ip} と j 方向の位相値 ϕ_{jp} 、および投影画像の座標 (i_p, j_p) は式(1)と式(2)で示す関係となる。

$$i_p = \frac{P_{ip}}{2\pi} \phi_{ip} \quad (1)$$

$$j_p = \frac{P_{jp}}{2\pi} \phi_{jp} \quad (2)$$

(a) Relation between the point on the reference plane and the phase of the

projected grating using the measurement projector

(b) Relation between the point on the reference plane and the projected grating phase using the mapping projector

Fig. 1 Relation between the point on the reference plane and the phase of the projected grating

ここで、プロジェクタによって投影される i_p 方向および j_p 方向の格子パターンのピッチをそれぞれ P_{ip} および P_{jp} とする。

図2にキャリブレーションの手順を示す。キャリブレーション時にはまず、図2(a)と図2(b)のように液晶ディスプレイを使い、縦方向の格子パターンと横方向の格子パターンを表示する。その様子をカメラで撮影して位相解析をすることで x 座標と y 座標を得る。続けて、図2(c)と図2(d)のように縦方向の格子パターンと横方向の格子パターンをマッピング用のプロジェクタから投影する。その様子をカメラで撮影して位相解析を行い、得られたそれぞれの位相値に式(1)と式(2)を適用することで、投影画像の座標を得る。最後に、図2(e)のように計測用のプロジェクタから格子パターンを液晶ディスプレイ上に投影して、その位相解析をすることで、 z 座標に対応した位相値を得る。キャリブレーションでは、この手順をそれぞれの基準面位置で行う。こうすることで、各基準面位置でのカメラの画素に対応した、3次元座標と投影画像の座標を得ることができる。

図3に座標変換テーブルにおけるカメラの1画素での z 座標と投影画像の座標 (i_p, j_p) の関係を示す。座標変換テーブルには、各 z 位置におけるカメラの各画素に対応する要素に式(1)と式(2)を用いて得られた投影画像の座標が格納されている。計測時には各要素における投影画像を得る。これ

Fig. 2 Calibration procedure

Fig. 3 Transformation table

により、計測結果や解析結果を対象物上の対応する位置に投影することが可能となる。

カメラの画素数がマッピング用プロジェクタの画素数より少ない場合、投影画像に値のない画素が生まれるので補間する必要がある。本システムでは、注目画素の八近傍の平均値を値のない画素に入れることで補間をしている。

2. 装置概要

ここでは試作した 3DM-PM システムについての説明と、試作システムの平面計測精度と変位計測精度について述べる。図 4 に 3DM-PM の試作システムを示す。3次元計測を行うためのユニットとして、LED 光源、格子板、カメラをそれぞれ固定している。プロジェクションマッピング用のプロジェクタとしては市販のものをを用いた。図 4 (a)に 3DM-PM システムの写真を示し、図 4 (b)に 3DM-PM システムの構成図を示す。計測用プロジェクタとマッピング用プロジェクタは、カメラから 350 mm と 80 mm 離れた位置に配置されている。表 1 に 3DM-PM システムの設計上の各種パラメータを示す。表 2 に 3DM-PM システムに使用したハードウェアの情報を示す。

試作した 3DM-PM システムの 3次元計測精度を確認するために、キャリブレーション時に基準面として使用する液晶ディスプレイを平面試料として計測し、キャリブレーション時の z 位置との差と計測面の標準偏差を確認した。図 5 に実験環境の写真と構成図を示す。3次元計測装置は、位置決め精度 0.0001 mm のフィードバック付きリニアステージ上に設置され、 z 方向の任意の位置に移動可能である。基準面として用いた液晶ディスプレイの液晶面には光拡散シートが貼り付けてある。

本実験では、 $z = 0$ mm の基準面位置から 700 mm 離れた位置に 3DM-PM システムを配置して z 方向に 1.000 mm 間隔で 130 回移動させ、全空間テーブル化手法を用いてキャリブレーションを行った。画像のサイズは、552×320 pixels とした。

(a) Photograph of the prototype 3DM-PM device

(b) Configuration diagram of the 3DM-PM device.

Fig. 4 Configuration of the 3DM-PM device

(a) Photograph of the measuring device and the reference plane

(b) Diagram of the measuring device and the reference plane

Fig. 5 Measurement setup

Table 1 Parameter configuration of the 3DM-PM system

Camera pixels	552 × 320 pixels
Lens focal length	3.5 mm
Grating pitch	2.0 mm
Projector pixels	1280 × 720 pixels

Table 2 Equipment list for the 3DM-PM system

Computer CPU	Intel Core i7-8700K 3.70 GHz
Computer RAM	64 GB
Camera	IDS, UI-3060CP-M-GL Rev.2 (monochrome)
LED source	Philips, LXZ1-PM01 (Dominant wavelength: 530 nm)
Mapping projector	Optoma, ML750STS1

キャリブレーション後に基準面を平面試料とみなして精度評価をした。基準面を撮影した z 位置とは異なる位置として、 $z = 0.500$ mm から $z = 120.500$ mm まで 10.000 mm の間隔に基準面を移動して計測した。なお、この時は 0.0001 mm の試験が出来るフィードバックステージを用いて実験している。図 6 は、平面試料を 3 次元計測して得られた結果のうち画像の中心 1 画素の断面を示す図である。計測値の標準偏差は 0.045 mm 以下であり、計測誤差は 0.019 mm 以下であった。また、全空間テーブル化手法を用いたことにより、3 次元計測結果に確認できるレンズ収差の影響は無視できるほど十分に小さかった。

次に、変位計測の精度を評価する実験として、図 7 に示す平面試料と低炭素鋼を曲げ加工した鋼板に対して、フィードバックステージを使って 1.000 mm の変位を与えて計測した。図 7 (a) に示す平面試料は、計測装置に対して 30° 傾いた状態で設置さ

れており、表面には光拡散シートが貼り付けてある。図 7 (b) に示す試料は、低炭素鋼の鋼板であり、曲げ加工が施してある。図この試料は 3.2 節の実験に使用したものと同一である。計測結果を図 8 に示す。図 8 (a) に示すように、平面試料の変位を計測したときの標準偏差が 0.064 mm であり、図 8 (b) に示すように曲げ加工された鋼板の変位を計測したときの標準偏差は 0.090 mm であった。

Fig. 6 Measured height distribution of flat plate sample.

(a) Photograph of flat sheet sample (b) Photograph of bent sheet sample

Fig. 7 Measured objects

(a) Flat sheet

(b) Bent sheet

Fig. 8 Results of displacement measurement

3. 変位分布の投影

3.1 平面の鋼板に対する変位分布の投影

本実験では、試作した 3DM-PM システムを用いて物体が変位する様子をリアルタイムに実物上で可視化できることを実験によって確認する。本実験の実験環境を図 9 に示し、計測試料を図 10 に示す。図 9(a) は実験環境の写真であり、図 9(b) はその構成図である。図 10(a) は計測試料として用いた低炭素鋼の鋼板であり、試料の裏面にはレーザ変位計が設置してある。また図 10(b) では計測対象物の鋼板がゆがんでいないことが確認できる。この鋼板を試作システムから 600 mm の場所で固定し、工業用ドライヤで加熱する。不均一な温度分布によって鋼板には熱変形が発生する。加熱する直前の鋼板の形状を基準とした変位の分布を求めて、本システムを用いて計測試料に投影した。3次元計測によって求めた変位分布を投影することを 2.5 s 間隔で繰り返した。この時、レーザ変位計の示す変位の値と試作システムの計測値から算出する変位の値を比較した。

鋼板の熱変形の様子を示したものが図 11 である。図 11 (a) から図 11(e) はそれぞれ加熱後から 0 s, 50 s, 100 s, 150 s, 200 s 経過した 5 つの段階の熱変形の様子を示している。まだ加熱していない図 11 (a) では変位は得られず、変位 0 mm を表す緑の表がされている。工業用ドライヤで 50 s 間加熱した図 11(b) では、加熱部分付近がプラス方向に変位して盛り上がり、鋼板の周辺部分がマイナス方向に変位して反り返っていることを視覚的にわかる。図 11(c) の示す、加熱開始から 100 s 経過した画像は、工業用ドライヤで温めることを中断した直後の画像であり、本実験中でのおよそ最大の変位が得られている様子である。この時、鋼板の周辺部では、カラーバーの表示領域を突出した -1.5 mm 以上の変位が得られたので黒く表示した。加熱開始から 150 s 経過した図 11(d) の画像では、加熱で得られた熱変形が、冷

(a) Photograph of object (back side view)

(b) Photograph of object (side view)

Fig. 10 Experimental object (flat sheet)

Fig. 11 Result of mapping

(a) Photograph

(b) Schematic diagram

Fig. 9 Experimental setup (flat sheet)

Fig. 12 Comparison of the amount of displacement calculated from the measurement results and the value indicated by the laser displacement meter (flat sheet)

却と同時に元の形状へ戻っていることを確認することができる。加熱開始から 200 s 経過した図 11(e)の画像では鋼板全域がほぼ加熱開始時の形状へ戻っている。

図 12 は加熱開始から計測したレーザ変位計の示す値と、レーザ変位計の示す位置と対応した点における試作システムが算出する変位の値を比較したものである。図 12 中の A から E の時刻はそれぞれ図 11(a)から図 11(d)と対応しており、レーザ変位計の示す値と試作システムが算出する値はほぼ一致している。

3.2 3次元形状を持つ鋼板に対する変位分布の投影

3.1 節の実験では平面の鋼板に対して変位分布の計測と投影を行ったが、本実験では、3.1 節の実験で用いた鋼板と同種のものに対して曲げ加工を施して 3 次元形状を持つ計測対象物として変位計測し、その解析結果を投影する。

本実験の実験環境を図 13 に示し、計測試料を図 14 に示す。図 13(a) は実験環境の写真であり、図 13(b) はその構成図である。図 14(a) は計測試料として用いた曲げ加工された低炭素鋼板であり、試料の裏面にはレーザ変位計が設置してある。また図 14(b)では計測対象物を横から見た図であり、鉄板が曲げ加工されていることが確認できる。この鉄板を試作システムから 580 mm の場所で固定し、工業用ドライヤで加熱する。鋼板を加熱して発生する熱変形の様子を加熱直前の鋼板の形状を基準として変位を求めて投影した。3.1 節の実験と同様に、3 次元計測して求めた変位分布を投影することを 2.5 s 間隔で繰り返した。この時、レーザ変位計の示す変位の値と試作システムの計測値から算出する変位の値を比較した。

鋼板の熱変形の様子を示したものが図 15 である。図 15(a)から図 15(g)はそれぞれ加熱後から 0 s, 50 s, 75 s, 100 s, 110 s, 150 s, 200 s 経過した 7 つの段階の熱変形の様子を示している。加熱していない図 15(a)では変位は得られず、変位 0 mm を表す緑の表示がされている。工業用ドライヤで 50 s 間加熱した図 15(b)では、加熱部分付近がごくわずかなプラス方向に変位して盛り上がっていることが視覚的にわかるが、加熱部分付近以外の変形を視認することはできない。図 15(c)の示す加熱初めから 75 s 経過した画像では、加熱部分付近がプラス方向に変位して、赤色に投影されていることがはっきりとわかり、加熱部分ではない右側の面では、マイナス方向に変位して青色に投影されていることがわかる。図 15(d)の示す加熱開始から 100 s 経過した画像は、工業用ドライヤでの加熱を中断した直後の画像であり、本

(a) Photograph

(b) Schematic diagram

Fig. 13 Experimental setup (bent plate)

(a) Photograph of object (back side view)

(b) Photograph of object (side view)

Fig. 14 Experimental object (bent sheet)

実験中でのおよそ最大の変位が得られている様子である。この時、鉄板の加熱部分付近ではプラス方向に変位して、盛り上がっていることを確認できる。また、加熱部分の面ではない右側面の端のほうでは、マイナス方向に変位して青くなっている。加熱開始から 110 s 経過した図 15(e)の画像では、加熱で得られた熱変形が、加熱を中断したことによる冷却によって、元の形状へ戻っていることを確認することができる。加熱開始から 150 s 経過した図 15(f)の画像では、加熱で得られた熱変形が、冷却によってほとんど元の形状へ戻っており、加熱しなかった右側の面の右端がプラス方向に変位して赤色に投影されていることが確認できる。加熱を中断してから 200 s 経過した図 15(g)の画像では鋼板全域がほぼ加熱開始時の形状へ戻っていることがわかる。

Fig. 15 Result of mapping (bent sheet)

なお、図 11 と図 15 の周期的なパターンは、キャリブレーションに用いた完全拡散面と計測試料の金属表面で、格子パターンの反射の仕方が異なることにより発生する周期的な計測誤差である。この周期パターンについては、本実験の内容とは直接関係しないので言及しない。

図 16 は加熱開始から計測したレーザ変位計の示す値と、レー

Fig. 16 Comparison of the amount of displacement calculated from the measurement results and the value indicated by the laser displacement meter (bent sheet)

ザ変位計の示す位置と対応した点における試作システムが算出する変位の値を比較したものである。図 16 中の A から G の時刻はそれぞれ図 15(a)から図 15(f)と対応しており、レーザ変位計の示す値と試作システムが算出する値はほぼ一致している。

3.3 考 察

3.1 節と 3.2 節の結果から、平面的な鋼板の熱変形の様子だけではなく、3次元形状を持った鋼板を計測した場合でも、レーザ変位計の示す値と試作システムが算出する値はほぼ一致しており、提案手法における3次元的な変形状態をカメラの視野内で把握することが可能であると確認できた。レーザ変位計の示す値と比較することで、部材の加熱中や冷却過程、完全冷却時における変形の様子を良好な精度で計測できることと、実物上での可視化が可能であることが示された。加熱によって計測領域内で発生している熱変形の挙動をリアルタイムに実物上で視認することで、溶接などの作業と、加熱を伴う作業によって発生した熱変形を把握することを同時に行えることにより、作業中における製品の補正などをより効率的に行えるようになると思われる。

4. 結 言

本論文では、開発した 3DM-PM システムを利用して、低炭素鋼の平板が熱変形する様子を 3次元計測し、プロジェクションマッピングによって実物上で変位分布を可視化した。さらに、3次元形状を持った計測対象物として、同種の低炭素鋼の平板に曲げ加工を施したものが熱変形する様子を 3次元計測し、得られた変位分布を実物上で可視化した。この時、レーザ変位計の示す値と 3DM-PM システムで算出した変位を比較したところ、ほぼ一致しており、計測面内で熱変形によって発生した変位の挙動をリアルタイムに可視化することは、工業製品の製品検査の場面での作業者の負担を減らす役目だけでなく、熱変形の発生のメカニズムのさらなる解明などにも役立つと考えられる。

本論文では、変位分布の投影について取り上げたが、3DM-PM システムでは 3次元計測結果から得られる様々な解析結果を実物上で可視化することができる。例えば、製品検査の段階で計測値と設計値の差を投影したりすることはとても有効であると考えられる。今後、変位分布以外の投影についても実現させていきたい。

参 考 文 献

- 1) 吉澤徹 編：光三次元計測 (第二版), 朝倉書店, (2007) 85.
- 2) K. Liu, Y. Wang, D. Lau, Q. Hao, L. Hassebrook: Dual-Frequency Pattern Scheme for High-speed 3-D Shape Measurement, *Opt. Express*, **18**, 5, (2010) 5229.
- 3) Y. Gong, S. Zhang: Ultrafast 3-D Shape Measurement with an Off-the-Shelf DLP Projector, *Opt. Express*, **18**, 19, (2010) 19743.
- 4) J. S. Hyun, S. Zhang: Superfast 3D Absolute Shape Measurement Using Five Binary Patterns, *Opt. Lasers Eng.*, **90**, (2017) 217.
- 5) 野本敏治, 武市祥司, 青山和浩: 溶接変形の予測に基づく精度管理システムに関する研究, 日本造船学会, **1997**, 181, (1997) 249.
- 6) 清水英樹: 大型構造物向け三次元計測技術とその評価, 溶接学会誌, **72**, 4, (2003), 238.
- 7) 柴原正和, 恩田尚弘, 伊藤真介, 正岡孝治: 溶接中における三次元変形の全視野計測, 溶接学会, **28**, 3, (2010), 338.
- 8) M. Takada, M. Takeuchi, E. Suzuki: Real-Time Navigation System for Sentinel Lymph Node Biopsy in Breast Cancer Patients Using Projection Mapping with Indocyanine Green Fluorescence, *Breast Cancer*, **25**, (2018) 650.
- 9) 古賀快尚, 谷卓也, 宮本真吾, 福原俊一: 切羽プロジェクションマッピングシステムの開発と運用, 大成建設技術センター報, **52**, (2019) 54.
- 10) 藤垣元治, 森本吉春: 計測結果又は解析結果投影装置及び方法: 日本国特許, 3259031, (1999).
- 11) 岩井一能, 藤垣元治, 森本吉春, 米山聡: 実時間形状計測および計測物体上への計測結果投影システムの開発, 日本機械学会 2001 年度年次大会講演論文集, **6**, 1, (2001) 207.
- 12) Y. Yasumuro, M. Imura, Y. Manabe, O. Oshiro, K. Chihara: Projection-Based Augmented Reality with Automated Shape Scanning, *Proc. SPIE*, **5664**, (2005)555.
- 13) J. Chen, T. Yamamoto, T. Aoyama, T. Takaki, I. Ishii: Real-Time Projection Mapping Using High-Frame-Rate Structured Light 3D Vision, *SICE J. Control, Meas. Syst. Integr.*, **8**, 4, (2015) 265.
- 14) Q. Y. Gu, I. Ishii: Review of Some Advances and Applications in Real-Time High-Speed Vision: Our Views and Experiences, *Int. J. Autom. Comput.*, **13**, 4, (2016) 305.
- 15) B. Ahmed, J. H. Lee, Y. Y. Lee, K. H. Lee: Projector Primary-Based Optimization for Superimposed Projection Mappings, *J. Electron. Imaging*, **27**, 1, (2018) 011011.
- 16) G. Narita, Y. Watanabe, M. Ishikawa: Dynamic Projection Mapping onto Deforming Non-Rigid Surface Using Deformable Dot Cluster Marker, *IEEE Trans. Vis. Comput. Gr.*, **23**, 3 (2017) 1235.
- 17) Y. Li, X. Su, W. Chen: Editable Projection Display Technology of Free-Form Surfaces Based on Height Information (in Chinese), *Acta Opt. Sinica*, **38**, 8, (2018) 0815026.
- 18) 藤垣元治, 森本吉春: 全空間テーパー化手法による格子投影三次元形状計測, 実験力学, **8**, 4 (2008) 402.
- 19) M. Fujigaki, Y. Oura, D. Asai, Y. Murata: High-Speed Height Measurement by a Light-Source-Stepping Method Using a Linear LED Array, *Opti. Express*, **21**, 20 (2013) 23169.
- 20) M. Fujigaki, T. Sakaguchi, Y. Murata: Development of a Compact 3D Shape Measurement Unit Using the Light-source-stepping Method, *Opt. Lasers Eng.*, **85**, (2016) 9.
- 21) Y. Akatsuka, M. Fujigaki, T. Matui: Three-Dimensional Shape Measurement Using Optimal Number of Phase-Shifting Steps Based on Light-Source-Stepping Method, *Adv. Exp. Mech.*, **2**, (2017) 105.
- 22) S. Suzuki, Y. Akatsuka, W. Jiang, M. Fujigaki, M. Otsu: Development of Quick Three-Dimensional Shape Measurement Projection Mapping System Using a Whole-Space Tabulation Method, *Appl. Sci.*, **9**, 20, (2019) 4408.