ランダムドットを組み合わせた マルチスリットの投光による三次元形状計測*

—マルチスリット輝線の同定方法—

吉田久美子** 川末紀功仁***

Three-Dimensional Measurement Using Multiple Slits with a Random Dot Pattern
- Identification Method of Multiple Slits -

Kumiko YOSHIDA and Kikuhito KAWASUE

Single shot three-dimensional shape measurement system using multiple slits with random dots is introduced. In general slit-ray projection method, a laser slit is swept on the surface of an object. While the laser slit is being swept, the object and the position of the measurement apparatus should be stationary. So, this sweeping prevents the handheld measurement. In order to cope with this problem, three-dimensional measurement system has been developed to acquire instantaneous shape without sweeping the laser slit on the object. Multiple laser slits are projected on the object and many line segments of laser slits appear in a single image. In order to calculate the three-dimensional position using triangulation geometry, each line segment has to be identified to know the direction of the laser projection. In this paper, the robust identification method is introduced. Random dots projected along the slit are utilized to identify each line segment. Some points on the line segment are randomly sampled and template images surrounding the sampled points are set. The line segment is identified by using the pattern of the random dots in the template. Experimental results show the feasibility of our method.

Key words: multiple slits, random dots, identification, three-dimensional, shape measurement

1. 結 言

一般的に非接触で計測対象の三次元形状を取得するために、レーザなどの構造化光を投光し計測対象表面にあらわれた輝線をカメラで撮像する方法が用いられている。構造化光上の三次元座標は、レーザの投光方向とカメラの位置関係から三角測量の原理を用いて算出することができる。1本のスリット光を計測対象の表面上でスキャンする方法や異なるグレーコードパターンを時系列的に投影する方法^{1)~3)}が提案されており、高精度な計測が期待できるので従来から利用されている。また、明度が正弦波状に変化する格子パターンを計測物体に投影し、この格子パターンの位相を一定間隔でずらして複数回撮像する位相シフト法が提案されている⁴⁾。この方法では、位相接続を行うことによって対象表面が不連続な場合であっても、高い分解能で計測を行うことができる。しかしながら、これらの方法は複数枚撮像する必要があるため、対象が動いている場合や手持ちでの計測が必要な場合には不向きである。

1枚の画像から三次元形状を取得する手法として Microsoft の KINECT⁵⁾⁶⁾ のようにランダムドットパターンとデジタル画像相関を用いた手法が知られている。この手法はランダムドットを密にすることで空間分解能を向上することができる。しかしながら、ランダムドットは不連続な点によって構成される構造化光であるため、対象の縁など不連続部の認識に曖昧さが残る。図1は穴の開いた物体に照射されたランダムドット光(a)と、スリット光(b)の例を示す。ランダムドット光の場合は物

体の縁などの不連続部にランダムドット光が存在するとは限らない。また図中の拡大図のように、段差など不連続部の認識が困難で検出された点が縁に位置しているかどうかの判別も難しく、正確な形状をとらえるのには向いていない。一方、スリット光の場合は物体の縁や段差などの位置が輝線の形状に明確にあらわれ、拡大図のようにスリット輝線が不連続になっているようすから物体の不連続部が判断できる。

スリット光をスキャンさせずに計測する方法として、計測対象に複数本のスリット光を同時に照射する方法が検討されており、ロボット用小型距離画像センサなどが提案されている⁷⁾。この方法はスリット本数分の断面形状が一度に取得できるため、瞬間の形状を把握したい場合や生体のように静止させることが難しい対象の計測に有効である。

しかしながら、1枚の画像内に異なる投光方向を持つスリッ

Fig. 1 Image of random dots and slit-ray projected on the surface of object

* 原稿受付 平成 28 年 7 月 23 日

掲載決定 平成 28 年 12 月 17 日

** 正 会 員 宮崎大学大学院 (宮崎県宮崎市学園木花台西 1-1)

*** 宮崎大学工学部

ト輝線が混在することになるので、スリットの投光方向が画像内で交錯し、判別ができなくなる問題がある。そのため、計測対象表面にあらわれるスリット輝線の位置が隣接するスリット輝線との間隔内に納まるように計測レンジを制限するなどの工夫が必要である。そのほか、スリット光の本数に等しい数のレンズを用いて測定領域を分割し、各領域と画像センサを1対1で対応させる方法⁸⁾などが提案されている。しかしながら、さらに計測レンジを広げるにはそれぞれのスリット輝線を特定する手段が別途必要となる。スリット輝線特定の手段として、各スリット光の輝度や色相を変えることでスリット輝線を特定する方法^{9)~12)}が提案されているが、輝度を制御する必要性から高輝度に固定した構造化光の投光ができないため、外乱光や計測対象自体の色など計測環境の影響を受けやすい問題がある。

そこで著者らは、スリット輝線特定の手段としてマルチスリットと共にランダムドットを投光する三次元形状計測システムを試作した。

本システムにおいてランダムドット光は、スリット光が照射される範囲を網羅するように照射され、スリット輝線のおおのの周辺で固有のパターンを形成し、各スリット輝線の特徴づける。すなわち、ランダムドット光は各スリット輝線を識別し投光方向を特定するためのマーカーとして使用される。各スリット輝線の投光方向が特定されるとスリット本数分の三次元断面形状が一度に取得できることになる¹³⁾。

本論文ではランダムドット光を用いてスリット輝線の特定を効率よく行う方法について提案する。本手法を用いれば異なる投光方向を持つスリット輝線が画像内で混在しても各スリット輝線の特定が可能となる。また、スリット輝線の連続性を考慮することで物体の縁においても安定して処理を行うことができる。本手法ではスリット光の輝度や色相を変える必要がないので、レーザ投光器で構造化光を高輝度に固定して投光できる利点がある。

複数の物体にマルチスリットとランダムドットを投光し、各スリット輝線を特定（同定）する実験を行い、提案手法の有効性を確認した。

2. システムの構成

計測システムは、マルチスリットレーザ投光器、ランダムドットレーザ投光器およびカメラより構成される。図2に計測時のイメージを示す。マルチスリット光およびランダムドット光は光源の前に複数のスリットや一律のパターンを持つランダムドットを発生させる回折光学素子を配置することによって生成される。様々なスリット本数の回折光学素子が市販されており、状況に応じて選択する。ランダムドットレーザ投光器は多くのスポット光をランダムに発生させるもので、回折光学素子に一律のパターンを持つ。マルチスリットレーザ投光器とランダムドットレーザ投光器は計測対象に対し同方向から照射するように配置する。また、カメラは一定の距離において視線方向がスリット平面と交差するように設置する。カメラにはレーザの波長域周辺のみを透過するバンドパスフィルタを装着している。図3(a)のような赤、白、黄色の三種類のボールを撮影した例を示す。図3(b)はバンドパスフィルタ無しで撮影した画像で、図3(c)はバンドパスフィルタを装着し撮影した画像を示す。バンドパスフィルタを装着した画像は対象の色に影響を受けずマルチスリットとランダムドット光を鮮明に撮影できている。このように、高輝度に固定した構造化光とバンドパスフィルタ

の併用により、外乱光や計測対象自体の色など計測環境の影響を受けにくい。

図2の壁や計測対象上の赤いラインは照射されたスリット輝線のように示す。ランダムドットレーザ投光器は、マルチスリット光が照射される範囲を網羅するようにスポット光を計測範囲全面に照射する。図2の右上に、照射されたマルチスリット輝線とランダムドット輝点の例を示す。マルチスリット輝線の周辺にランダムドット輝点が分布している。計測は、対象表面にあらわれたマルチスリット輝線とランダムドット輝点をカメラによって撮像することで実行される。本システムで取得した画像内には異なる投光方向を持つ複数のスリット輝線があらわれる。図4(a)は壁と本システムの間に配置した物体を撮像した画像を示す。黄色い実線で囲んだ部分は配置した物体の位置をあらわす。スリット光はカメラの視線に対して右後方から壁に向かって投光されている。黄色い点線で囲んだ部分は壁上の領域で、スリット輝線が物体によって分断されている。分断されたスリット輝線は物体がレーザ光源に近い位置にあるので画像内では右側にシフトされている。図4(b)は撮像した画像からスリット輝線のみ抽出した画像を示す。スリット輝線の画像のみではおのおののスリット輝線の識別が困難であるので、スリットの投光方向の判断は難しい。1枚の画像から三次元形状を得るためには、各スリット輝線を識別し投光方向を特定する必要がある。そこでランダムドット光を各スリット輝線識別のためのマーカーとして使用する。本システムではスリット光が照射される範囲を網羅するようにランダムドット光を照射するため、分断されたスリット輝線に対しても周辺のランダムドットパターンから識別が可能となる。スリット輝線が識別され投光方向が特定されると計測対象の三次元形状は、スリット輝線の座標値から三角測量の原理を用いて算出される¹³⁾。

Fig. 3 Effect of bandpass filter

Fig. 4 Scene with an object and projected multiple slits

Fig. 5 Measurement flow for Initial setting (Basic image)

3. マルチスリット輝線の特特定方法

1枚の画像に記録された多数のスリット輝線について、一つのマルチスリットプロジェクタから分岐されたどのスリットによるものかを特定する処理が必要である。特定するためには、マルチスリット輝線とランダムドット輝点の位置関係およびアドレス（ライン番号）を記録した基準画像と計測画像を対比する同定処理を行う。以下にスリット輝線の特定方法について説明する。

3.1 基準画像の作成とエピポーラ方程式の算出

図5に基準画像の作成とエピポーラ方程式^{14) 15)}を算出するためのフローを示し、この流れに沿って説明する。まず、図6(a)に示すように、計測範囲を網羅する大きさの壁や平面に対し、スリット光およびランダムドット光を照射する。計測システムと平板までの距離を変えながら平板上にあらわれたスリット輝線およびランダムドット輝点の画像を j 枚($j \geq 2$)撮像する。これらの画像を基準画像と呼ぶ。また、実際の計測時に撮像する画像を計測画像と呼ぶ。

図7に示すように計測画像内のある点 (u', v') に対応する点は、基準画像 (u, v) 上ではエピポーラ線上に存在する。エピポーラ線の関係式を式(1)に示す。

$$\begin{bmatrix} u' & v' & 1 \\ m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

このエピポーラ線の関係式における $m_{11} \sim m_{32}$ は、計測画像

(a) System setup for basic image capture

(b) Basic images

Fig. 6 Preparing basic images

Fig. 7 Correspondence point on the Epipolar line

と基準画像間の回転および並進に関する情報からなる行列で、距離を変えて撮像した基準画像間で共通する点を8点以上対応づけることによって算出することができる。 $m_{11} \sim m_{32}$ が決まると、計測画像内の点 (u', v') に対するエピポーラ線 E の式は式(1)を変形し以下ようになる。

$$(u' m_{11} + v' m_{21} + m_{31}) u + (u' m_{12} + v' m_{22} + m_{32}) v + u' m_{13} + v' m_{23} + 1 = 0 \quad (2)$$

次に基準画像の各スリット輝線 L_n に対しては図6(b)のように $n = 1 \sim s$ (s は投光するスリットの本数)のアドレスを設定する。ここで、アドレスはマルチスリットプロジェクタから分岐されたスリット輝線を区別するために付与する値を示す。この基準画像上の各スリット輝線を基準スリットとよぶ。また各基準スリットに対して直線の式を算出しておく。以上の初期設定は、カメラとレーザ投光器の位置関係に変更がない限りは省略できる。

3.2 計測画像上でのスリット輝線の同定方法

図8にスリット輝線同定のフローを示す。計測対象にマルチスリット光とランダムドット光を照射し撮像する。図9(a)は撮像された計測画像のイメージを示す。

撮像された計測画像からスリット輝線（総数 g 本）を抽出し、

ラベリング処理によってそれぞれの輝線にラベル付け ($0 < m \leq g$) する。ここで、ラベル m は計測画像から抽出した連続した輝線に対してコンピュータによって自動的に付加された番号である。アドレスの同定はラベル付けされたスリット輝線ごとに行う。輝線 (ラベル m) 上からランダムに f 個の点 A_k ($k=0 \sim f$) をサンプリングする。すべての点について処理するのではなくランダムにサンプリングした複数点について処理を行うことで処理の高速化を図っている。サンプリングした点 $A_k(u'_k, v'_k)$ を中心に周辺の画像からテンプレートを作成する。テンプレートには、点 A_k を特徴づけるランダムドット輝点が含まれる。図 9(b) に作成された点 A_k のテンプレートの例を示す。点 A_k に対するアドレスの同定は、別途準備しておいた基準画像から、点 A_k のテンプレートに含まれるランダムドット輝点と類似度の高い位置を探索することにより行う。輝線上の点 A_k に対応する点は、基準画像内でエポポーラ線 E_k 上に存在する。点 $A_k(u'_k, v'_k)$ に対応するエポポーラ線 E_k は、初期設定で求めたエポポーラ線の式 (2) から算出される。

Fig. 8 The flow of the measurement process

Fig. 9 Identification method of each line segment

また、計測画像の点 A_k はスリット輝線上の点であるため、基準画像内で点 A_k の対応点が存在する範囲は、図 9(c) に示すようにエポポーラ線 E_k と各基準スリットの直線の交点 $p_1(u_1, v_1) \sim p_n(u_n, v_n)$ に限定される。これらの交点に対し、テンプレートマッチングを実行し、マッチングの評価値の高い対応点を選定し候補アドレスを決定する。マッチングの評価値 V_n は、以下の式¹⁶⁾を用いた。

$$V_n = \frac{\sum_{j=-N/2}^{N/2} \sum_{i=-M/2}^{M/2} \{I_{A_k}(u'_k+i, v'_k+j) \cdot I_n(u_n+i, v_n+j)\}}{\sqrt{\sum_{j=-N/2}^{N/2} \sum_{i=-M/2}^{M/2} I_{A_k}(u'_k+i, v'_k+j)^2} \sqrt{\sum_{j=-N/2}^{N/2} \sum_{i=-M/2}^{M/2} I_n(u_n+i, v_n+j)^2}} \quad (3)$$

ここで、 M 、 N はテンプレートのサイズで、 L_k および I_n はそれぞれ計測画像と基準画像での輝度値である。

輝線上でランダムにサンプリングした f 個の点すべてに対し候補アドレスを決定する。 f 個の点の評価値を比較し最も評価値の高い点のアドレスを最終的なアドレスとして決定する。以上により輝線 (ラベル m) のアドレスが特定される。特定されたスリット輝線のアドレスからスリットの投光方向が決まり、三角測量の原理によりスリット輝線の三次元座標が求められる¹³⁾。

マルチスリットとランダムドットレーザ投光器の光軸が一致していないことから、スリット輝線とランダムドット輝点は照射距離の変化に応じて照射位置に若干のずれが生じる。しかし、図 2 に示す通り、ランダムドットレーザ投光器をスリットの方角に対し鉛直線上に配置することによって、ランダムドットの照射位置はスリットの向きと同方向のみにずれるので、スリット輝線の同定に影響しないようにしている。

3.3 スリット輝線の連続性を考慮したテンプレート領域の設定

本手法では、テンプレート作成の際にスリット輝線の連続性を考慮しテンプレートの範囲を設定することで、スリット輝線同定の信頼性を高めている。図 10 は壁面の前に置かれた物体にランダムドット光とスリット光を照射した例を示す。通常は、輝線上の点 A に関するテンプレートは、 A を中心に、指定した

Fig. 10 Template image at discontinuous area

サイズで作成する。ただし、物体の縁のほうに位置する点では、図 10(a) の青枠で示すようにテンプレートが物体側と壁面側の両方のランダムドット輝点を含み、テンプレートマッチング処理において誤対応の要因となる。提案するシステムでは計測対象の連続性はスリット輝線の連続性より判断できるので、テンプレート領域の設定に利用している。図 10(b) に示すようにスリット輝線の不連続位置周辺でテンプレートを作成する際、テンプレートを輝線の連続性を考慮して設定する。これにより壁面側のランダムドット輝点のみを含んだテンプレートと物体側のランダムドット輝点のみを含んだテンプレートに分けて作成することが可能となる。すなわち図 10(b) のように壁面側 B と物体側 C の位置でそれぞれのランダムドット輝点のみを含んだテンプレートが作成される。

以上のように、スリット輝線の連続性を考慮することでランダムドットのみでは困難であった計測対象の輪郭部の判別が明確になり、スリット輝線の同定処理の信頼性を高めている。

4. 実験

4.1 各スリット輝線の同定実験

提案するスリット輝線同定の効果を確認するために実験を行った。図 11 に実験に使用した計測システムを示す。実験用のデバイスは 25 本のスリットを投光するマルチスリットレーザ投光器 (波長 660 nm, 80 mW), ランダムドットレーザ投光器 (波長 660 nm, 50 mW), レーザの波長域を透過するバンドパスフィルタ (中心波長 675nm, 半値幅 40nm) を装着したカメラ (Basler acA1300 130 万画素 60 fps) を使用した。カメラとレーザ投光器の基線長は 450 mm, 計測システムから計測対象までの距離は約 1.8 m で実験を行った。データの処理手法は C 言語で実装し、計算機環境は、ノート型パソコン CPU AMD A10 (2.0Ghz) 実装メモリ 4GB である。図 12(a) に計測対象の写真、(b) に計測画像、(c) に基準画像の例を示す。計測画像では、複数のスリット輝線とランダムドット輝点を確認できる。基準画像は平面までの距離を変えて 3 枚作成した。各基準画像には図 12(c) の例に示すように 25 本のスリット輝線 L_n に対してアドレス $n=1 \sim 25$ が割り当てられる。また、テンプレートマッチングにおいて、計測画像のテンプレートのサイズは 41×41 , スリット輝線ごとにランダムにサンプリングする点は 10 点とした。これにより、処理するデータ数が削減され、処理時間は 20 分の 1 の 15 sec になった。サンプリングした 10 点に対し複数の候補アドレスが割り当てられた輝線を例に、アドレス同定の結果を説明する。図 13(a) の円柱に照射されたスリット輝線 (ラベル $m=31$) 上で、ランダムにサンプリングされた 10 点のうち最初の 1 点 ($k=0$), 点 A_0 を例に示す。

Fig. 11 Measurement system

Fig. 12 Measurement image and basic image

Fig. 13 Identification method of line segments

図 13(b) の基準画像上に描かれた黄色い線は、点 A_0 から算出されたエピソード線を示す。また、青い四角で囲んだ部分はエピソード線と基準スリット $L_1 \sim L_{25}$ の直線の式から算出された交点を示す。点 A_0 の対応点は算出された 25 個の交点の中からマッチング評価値の高い点を選択され、輝線には候補アドレスが割り当てられる。ここでは、交点 p_9 の評価値が最も高く、評価値 V_9 は 0.378 であった。したがって、輝線 (ラベル $m=31$) の候補アドレスは L_9 と割り当てられた。ランダムにサンプリングされた残りの 9 点についても同じ処理を行い、最終的には点 $A_0 \sim A_9$ におおのに対し選定された候補アドレスの中から、評価値 V_n が最も高いアドレスを選定し、その輝線のアドレスとして決定する。表 1 にランダムにサンプリングされた 10 点に対し割り当てられた候補アドレスと評価値を示す。

正しいアドレスは L_9 であるが $A_0 \sim A_9$ の 10 点には L_9 以外にも L_1 と L_{15} の候補アドレスが間違っ割り当てられている。ただし、正しく割り当てられた点の評価値は間違っ割り当てられた点の評価値より高く、3 倍以上となる点が複数存在している (赤枠部分)。この例では最終的に輝線 (ラベル $m=31$) のアドレスとして、評価値が最も高い A_9 のアドレス L_9 が正しく割り当てられた。

このように 1 本の輝線について、複数回の判定を行うことで処理のロバスト性を高めている。

図 14 に計測対象に照射されたスリット輝線の正しいアドレスを示す。また、図 15 に提案する方法によるアドレスの割り当て結果を示す。アドレス番号が色分けして表示されており、この画像では、撮像されたすべての輝線に対し適切にアドレスが割り当てられたことが確認できる。

Table 1 Allocated slit address and evaluation value

Point No. (k)	Randomly selected points (A_k)	Slit address candidate	Maximum evaluation value (V_n) in cross points ($p_1 \sim p_{25}$)
0	A_0	L_9	0.378 (V_9)
1	A_1	L_9	0.517 (V_9)
2	A_2	L_9	0.244 (V_9)
3	A_3	L_9	0.404 (V_9)
4	A_4	L_9	0.266 (V_9)
5	A_5	L_9	0.624 (V_9)
6	A_6	L_9	0.625 (V_9)
7	A_7	L_{15}	0.169 (V_{15})
8	A_8	L_1	0.155 (V_1)
9	A_9	L_9	0.651 (V_9)
Actual address		L_9

Fig. 14 Addresses of slits projected on the object (Actual address)

Fig. 15 Line segment with estimated slit address

Fig. 16 Reconstructed image from measured data

(a) Line segments of the discontinuous area

(b) Example of the template image surrounding point B and point C

Fig. 17 Set of the template image in discontinuous part of line segments

もし同じ輝線上で異なる複数のアドレスが割り当てられ、かつそれらの評価値が設定した閾値を超える場合は、その輝線上のすべての点に対しアドレスの割り当てを行い画面上に色分けして表示する。その表示結果から人為的な判断と修正を行う。図 16 に以上の割り当て結果を利用して、レーザスリット上の点を実座標に変換し再構築した画像を示す。

4.2 スリット輝線の連続性を考慮したテンプレートの効果

スリット輝線の連続性を考慮したテンプレート範囲の設定が評価値に与える効果を確認した。図 17(a) の壁面の輝線 (ラベル $m=23$) と立方体上の輝線 (ラベル $m=35$) の端点 B, C に対し、図 17(b) のようにスリット輝線の連続性を考慮せずにテンプレートを作成した場合 (オレンジの枠) と考慮して作成した場合

Table 2 Difference of evaluation values on considering the discontinuity of the line segment

Point(Label number)	Consideration of the continuity of the line segment	
	No	Yes
B ($m=23$)	0.228	0.441
C ($m=35$)	0.199	0.267

(緑の枠)の評価値を算出した。表2に算出された評価値を示す。両輝線ともスリット輝線の連続性を考慮することによって評価値が向上しており、スリット輝線の連続性を考慮したテンプレート領域の設定はスリット輝線同定の信頼性を高めるのに有効であることが確認できた。

5. 結 言

マルチスリットと共にランダムドットを投光することで、1枚の画像から三次元形状を取得するシステムを試作した。本論文では計測システムの概要を示し、スリットの投光方向を特定するアルゴリズムを提案した。

以下に、本論文のまとめを示す。

- (1) 各スリット輝線を特定するために、スリット輝線の周辺に分布するようにランダムドットを投光するシステムを試作した。
- (2) ランダムドットの照射位置はスリットの向きと同方向にのみにずれるように、ランダムドットレーザ投光器をスリットの方角に対し鉛直線上に配置し、スリット輝線の同定に影響しないようにした。
- (3) ランダムドット光を各スリット輝線のアドレスを同定するためのマーカーとして用い複数存在する各スリット輝線の特定を効率よく行うアルゴリズムを試作した。
- (4) 撮像された各スリット輝線上の対応点の探索はエッジ線と基準画像上の各スリット輝線との交点を求めることで候補を絞り処理の信頼性を高めた。
- (5) マルチスリット光とランダムドット光を組み合わせることで、ランダムドット光だけを用いる手法における不連続部のあいまいさを改善できる。具体的には、物体輪郭など画像内の不連続部においては、スリット輝線の連続性を考慮しテンプレート領域を設定することで、スリット輝線同定の信頼性を高めた。

本計測システムの実用例としては、化学プラントの配管など管状物体の計測を想定している。配管計測においては配管製作図面の作成のために、管軸の方向や径、隣接する配管などとの

位置関係の取得が必要である。本システムは、マルチスリットの長手方向に対して垂直方向の空間分解能が低い。しかしながら配管は、管軸方向に形状の変化が少ないので、マルチスリットを管軸方向に対し垂直に投光することで、得られる複数断面の配列方向と形状から管軸の方向と径を効率的に把握することができる。

本論文では、ランダムドットをスリット輝線の同定に利用する方法を提案したが、KINECTのようにランダムドット自体の三次元座標を取得する機能を付加することで、マルチスリット投光法とランダムドット投光法の双方の長所を活かした計測が実現できる。

参 考 文 献

- 1) I. Ishii, K. Yamamoto, K. Doi and T. Tsuji: High-Speed 3D Image Acquisition Using Coded Structured Light Projection, In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (2007) 925.
- 2) R. J. Valkenburg and A. M. McIvor: Accurate 3d Measurement Using a Structured Light System, Image and Vision Computing, **16**, 2 (1998) 99.
- 3) J. L. Posdamer and M. D. Altschuler: Surface Measurement by Space-Encoded Projected Beam Systems, Computer Graphics & Image Processing, **18**, 1 (1982) 1.
- 4) 井上学, 和田俊和: 信念伝搬型位相シフト法による三次元形状計測, 電子情報通信学会技術研究報告, **112**, 385 (2013) 305.
- 5) Z. Zhang: Microsoft Kinect Sensor and Its Effect, IEEE Multimedia, **19**, (2012) 4.
- 6) C. Mutto, P. Zanuttigh and G. Cortelazzo: Time-of-Flight Cameras and Microsoft KINECT, Springer, (2012).
- 7) 岩崎一也, 寺林賢司, 梅田和昇: マルチスリットレーザプロジェクタを用いた超小型距離画像センサの構築, 日本機械学会論文集C編, **79**, 803 (2013) 212.
- 8) 馬場充, 小西忠孝, 小川慎太郎, 岩井美貴子: 3次元形状測定高速化のための「領域分割式マルチスリット光符号化法」の提案, 計測自動制御学会論文集, **34**, 8 (1998) 898.
- 9) Z. J. Geng: Rainbow Three - Dimensional Camera: New Concept of High - Speed Three - Dimensional Vision Systems, Optical Engineering, **35**, 2 (1996) 376.
- 10) K. L. Boyer and A. C. Kak: Color-Encoded Structured Light for Rapid Active Ranging, IEEE Transactions. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **PAMI-9**, 1 (1987) 14.
- 11) N. G. Durdle, J. Thayyoor and V. J. Raso: An Improved Structured Light Technique for Surface Reconstruction of the Human Trunk, IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, **2** (1998) 874.
- 12) E. M. Petriu, Z. Sakr, H. J. W. Spoelder and A. Moica: Object Recognition Using Pseudo-Random Color Encoded Structured Light, Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2000. IMTC 2000. Proceedings of the 17th IEEE, **3** (2000) 1237.
- 13) 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂, (1992) 94.
- 14) 徐剛, 辻三郎: 三次元ビジョン, 共立出版, (1998) 61.
- 15) 徐剛: 最新 3次元写真計測システム, 日本写真学会誌, **67**, 5 (2004) 445.
- 16) L. D. Stefano, S. Mattoccia and F. Tombari: ZNCC-Based Template Matching Using Bounded Partial Correlation, Elsevier, Pattern Recognition Letters, **26**, 14 (2005) 2129.