

# プロジェクターカメラ系表面形状計測法に対する 新たなマッチングアルゴリズムの提案

The proposal of new algorithm to instrumentation method of surface shapes with projector and camera

北海道大学工学部 4年 ○学生会員 森岡晃一 (Koichi Morioka)  
北海道大学院工学研究院 正員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

## 1. はじめに

物体あるいは液体表面形状の数値化は、工学における高精度化、高速化、低コスト化を経てイノベーションを支援する重要な技術である一方、近年においても確立された計測法は多くない。既に商品化されている2限視ステレオ計測法は一般に誤差が大きく光学環境に依っては計測が不能となる。3次元レーザースキャナは一定の精度が保証される一方、長時間に渡るスキャニング計測が必要であり、また製品自体が高価である短所を持つ。さらに両計測法は形状が時々刻々変化する移動表面を計測できないため、その適用範囲は限定的である。

Watanabe&Mitobe(2011)<sup>1)</sup>はプロジェクタとデジタルカメラから成る画像計測系において、投影ブロックパターンの物体表面上での反射光を投影した画像から、投影及び撮影軸の幾何学的関係をピンホールモデルで記述し、3次元表面座標を数値化する技術を提案した。この計測法は、瞬時の物体形状を高精度で定量化可能な時間分解能に優れたものであり、高速移動物体の動的計測を可能とする。一方、この手法はブロックパターンの色情報から投影及び撮影画像のマッチングを行うため、大変形する表面あるいは特定の光の波長を吸収する材質の表面に対して欠測が生じ、手動でマッチングを行う必要があり、実用化に至っていない。

本研究は Watanabe,Mitobe(2011)の方法をベースに新たに提案するマッチングアルゴリズムを導入し、その信頼性を評価すると同時に、複雑な表念形状をもつ物体並びに進行する波浪の水面形状計測に適用し実用性、応用性を検討し、本計測法の実用化を目指すものである。

## 2. 計測方法

本研究では Watanabe&Mitobe(2011)が開発した3次元表面形状計測法を用いて固体物体の表面形状を計測する(図-1 参照)。この計測法では、隣接する色のパターンがすべて異なるように配置したカラーブロック(図-2 参照)をプロジェクタから計測対象に照射し、その反射光をカメラで画像撮影し、予め決したプロジェクタ、カメラ座標系、そして実座標系との関係から物体表面におけるカラーブロックの座標を特定するものである。キャリブレーションにおいてプロジェクタ、カメラ座標系及び実座標系の幾何学的関係に基づき、未知数であるプロジェクタ、カメラ座標系それぞれの座標原点、光軸方向単位ベクトル、水平、鉛直方向単位ベクトル、焦点距離を取得する。撮影画像内のカラーブロックそれぞれに

ついて、対応する投影カラーブロックを取得した座標を基に特定し、物体表面における実座標を計算する。

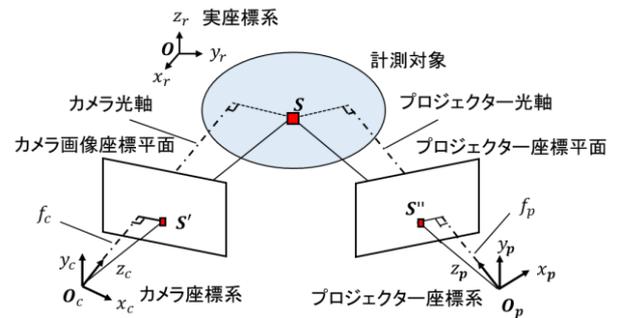


図-1 ピンホールモデルに基づく座標系

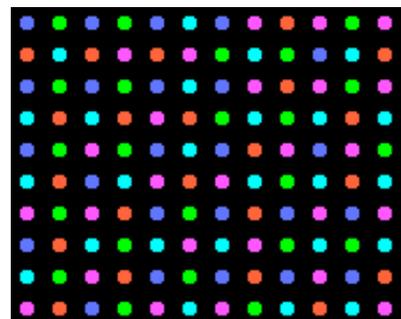


図-2 投影するカラーパターン  
(赤, 緑, 青, マゼンタ, シアン)

## 3. 実験方法

Watanabe&Mitobe(2011)と同一の手法により、任意形状物体に対する表面形状計測の手順を確認した。水平面の斜め上方にプロジェクタ及び高速カメラ(撮影解像度: 512x512pixels)を、プロジェクタレンズ面からの水平距離が90cm付近の点に計測対象をそれぞれ設置した(図-3)。テストケースとして、形状が容易にわかる湯沸かし器(幅22cm, 延長15cm, 高さ15cm)を対象とし、計測を行った。

まずカラーパターン投影方向に関して、グリッド間隔1.14cmの正方格子をプロジェクタレンズ面より90cmと95cmの位置に設置し、カラーパターンを照射した格子板をカメラで撮影し、キャリブレーションを行う。

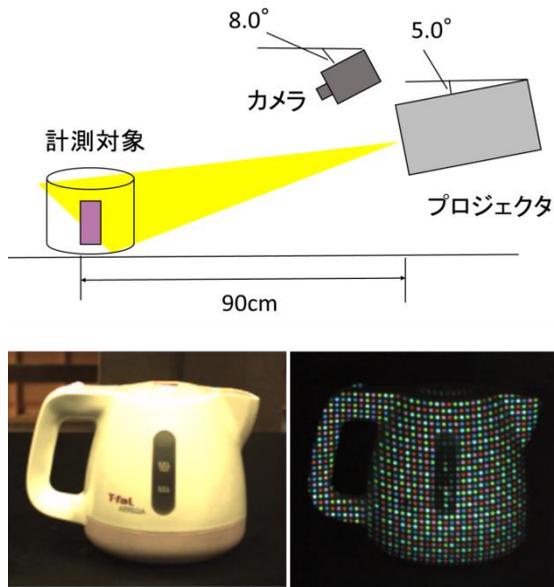


図-3 実験模式図(上)および撮影する湯沸かし器(左下)とカラーパターンを照射したもの(右下)

### 3. 結果

図-4 はカラーブロック位置における3次元座標をプロットしたものである。計測結果は曲率が変化する曲面をよく捉えており、また寸法も既知と同一であり矛盾なく計測されていることがわかる。

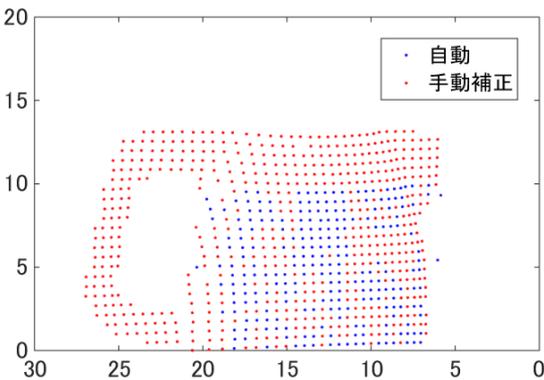
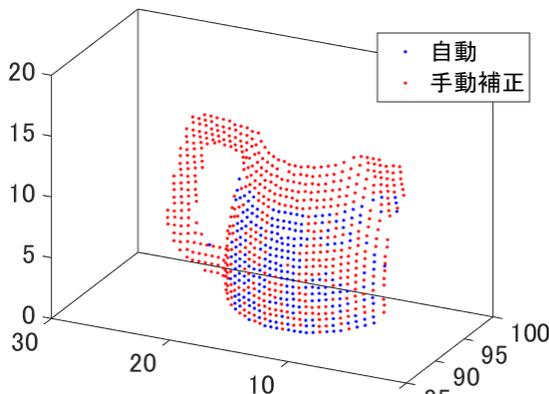


図-4 解析結果  
(a) 右斜め上視点(左下) (b) 正面視点(上)

一方、青プロットが自動、赤プロットが手動でマッチングされた計測点を表している。カラーブロックのマッチングは投影画像と撮影画像で対応がとれている任意のブロックを基準に、それと隣接するブロックを順次自動で対応させていく。しかし比較的色の暗い青やマゼンタのブロックは認識されないことが多く、表面形状が複雑な物体でも欠測が起りやすい。現状欠測が生じた場合は撮影画像と投影画像を比較して対応するブロックを手動でマッチング補正している。このテストケースでは758プロットの計測点の内、自動でマッチングされたのは230プロットであった。手動によるマッチング補正にも約1時間半近く時間を要し、このことから実用化に向けて改良が必要である。

本研究で提案する新たなマッチングアルゴリズムを次章で説明する。

### 4. マッチングアルゴリズム

任意のカラーブロック*i*について図-5のようにピンホールモデルを基に考える。

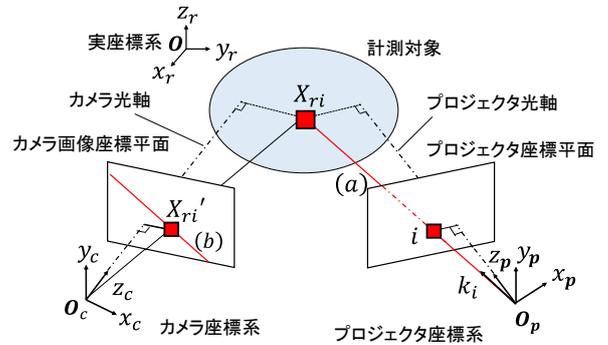


図-5 ピンホールモデルに基づく座標系  
(a) ブロック*i*の投影経路、(b) ブロック*i*の写影経路

ブロック*i*の投影方向の単位ベクトルを $k_i$ とすると、物体表面における実座標 $X_{ri} = (x_{ri}, y_{ri}, z_{ri})$ は次式により与えられる図-5(a)。

$$X_{ri} = O_p + t_2 k_i \quad \dots \textcircled{1}$$

$t_2$ はプロジェクタ原点と実座標間の距離を表す変数である。これを Watanabe&Mitobe(2011)のカメラ画像平面と実座標の関係式に代入、整理すると、図-5(a)の赤線で示したブロック*i*の投影経路は次式の一次関数として撮影画像平面に写影される(図-5(b))。

$$\begin{aligned} & x_c \{ -(k_i \cdot k_c)(O_c - O_p) \cdot (f_c \cdot j_c) \\ & + (k_i \cdot j_c)(O_c - O_p) \cdot (f_c \cdot k_c) \} \\ & + y_c \{ (k_i \cdot k_c)(O_c - O_p) \cdot (f_c \cdot i_c) \\ & - (k_i \cdot i_c)(O_c - O_p) \cdot (f_c \cdot k_c) \} \\ & + k_i (f_c i_c)(O_c - O_p) \cdot (f_c \cdot j_c) \\ & - k_i (f_c j_c)(O_c - O_p) \cdot (f_c \cdot i_c) = 0 \quad \dots \textcircled{2} \end{aligned}$$

撮影画像平面内の式②直線上にブロック*i*の物体表面における投影 $X_{ri}$ と同一色のブロックが存在すればプロジェクタ座標平面内のブロック*i*にマッチする。このとき投影経路は各ブロックにより異なるため、マッチングの候補がかなり限定される。まれに式②直線上に同一色ブ

ロックが複数存在する場合は、隣接する色の配列からマッチするブロックを特定し、撮影画像平面内における実座標 $(x'_c, y'_c)$ が取得できる。これを撮影軸、投影軸の幾何学的関係を基に距離 $t_2$ を求め式①から実座標 $X_{ri}$ を求めることができる。

## 5. まとめ

Watanabe&Mitobe(2011)の手法による物体の表面形状計測は高精度であることが確認できた。一方で形状によっては手動によるマッチングが必要で、実用化に向けては改善が必要である。今後は前述の新たなアルゴリズムを用いて固体物体を対象とした計測を行い、計測精度を検証していく必要がある。またその応用として動的自由水面、特に遡上波流れは沿岸部と比べて水深が小さい分乱れの影響を受けやすく波高は3次元的に変化するため、未解明な点が多い<sup>2)</sup>。本研究の計測法を用いて波浪の遡上過程への適用を目指す。

## 参考文献

- 1)YASUNORI WATANABE & YUTA MITOBE: AN IMAGING TECHNIQUE FOR MEASURING WAVE SURFACE SHAPES, Coastal Engineering Journal Vol. 53,pp549-565
- 2)M.Brocchini, T.E.Baldock: Recent advances in modeling swash zone dynamics: Influence of surf-swash interaction on nearshore hydrodynamics and morphodynamics, issue TOC Vol.46,pp1-20