

自動マッチングアルゴリズムによるプロジェクタ - カメラ系表面形状計測

Projector-camera imaging measurements of surface shapes using automatic matching algorithm

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 森岡晃一 (Koichi Morioka)
 北海道大学大学院工学研究院 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ン計測が必要であり、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)¹⁾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)¹⁾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、複雑な表面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

2.1 計測原理

本研究でベースとしている Watanabe&Mitobe¹⁾が開発した3次元表面形状計測法を概説する。この計測法では隣接する色が全て異なるように配置したカラーパターン(図-1下参照)をPCプロジェクタから計測対象に照射し、物体表面上の反射光を視軸の異なるカメラで撮影する。プロジェクタによる投影、およびカメラによる撮影に対してピンホールモデルを適用すると(図-1上)に示すプロジェクタ座標、カメラ座標、そして実座標の幾何関係を与えることができる。実スケールを記入したキャリブレーショングリッドボードに投影したカラーパターンの撮影画像をもとに、各座標間数値的關係、即ち各座標原点(O_p, O_c, O)、光軸ベクトル(k_p, k_c)、焦点距離(f_p, f_c)を決定する(図-1上参照)。異なる色を持つ隣接するカラーパターン配置から個々の投影ドット

と撮影画像上のドットを同定できれば、キャリブレーションにおいて取得した光学的更正値をもとに物体表面上の投影ドットの3次元座標を決定することができる。

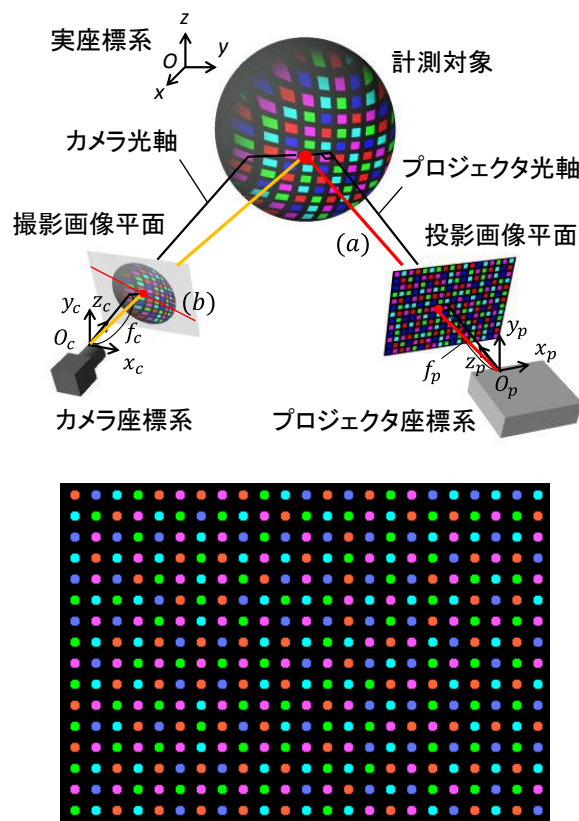


図-1(上)ピンホールモデルに基づく各座標系；
(下)投影するカラーパターン

Watanabe&Mitobe¹⁾は、任意形状の固体表面並びに自由水面の計測に適用し、実践的な精度を確認している。一方、表面形状が複雑な物体を対象とする場合、隣接するカラーパターンが変形し検索が困難となり、マッチングが自動的に行えなくなるケースが発生する。この場合手動によるマッチングが必要となるが、この過程を省き実用化へ結びつけるためのマッチングアルゴリズムを以下に示す。

2.2 マッチングアルゴリズム

任意のカラードット i の投影軸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 $X_i(x_i, y_i, z_i)$ は次式により与えられる。

$$X_i = O_p + t_i k_i \quad (1)$$

t_i はプロジェクタ原点とカラードット i の実座標間の距離を表す変数である。これを Watanabe&Mitobe¹⁾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-

1 上の赤線(a)で示したカラードット i の投影直線は次の一次関数として撮影画像平面上に写影される (図 - 1 上赤線(b)参照)。

$$\begin{aligned} & x'_c \{ -(k_i \cdot k_c)(O_c - O_p) \cdot j_c + (k_i \cdot j_c)(O_c - O_p) \cdot k_c \} \\ & + y'_c \{ (k_i \cdot k_c)(O_c - O_p) \cdot i_c - (k_i \cdot i_c)(O_c - O_p) \cdot k_c \} \\ & + f_c \{ (k_i \cdot i_c)(O_c - O_p) \cdot j_c - (k_i \cdot j_c)(O_c - O_p) \cdot i_c \} = 0 \quad (2) \end{aligned}$$

ここで、 (x'_c, y'_c) は撮影画像座標、 (i_c, j_c) はそれぞれカメラ座標系の x 、 y 軸方向単位ベクトルを表す。その他の変数は図 - 1 上を参照頂きたい。撮影画像平面内の(2)直線上にカラードット i の物体表面における投影 X_i と同一色のカラードットが存在すればプロジェクタ座標平面内のカラードット i と同定できる。投影画像平面内の各カラードットの投影直線はそれぞれ異なるため、マッチングの候補はある程度限定することが出来る。これら候補の内、隣接する周辺の色配列が同一のドットを決定し、撮影軸、投影軸の幾何学的関係をもとに距離 t_i を求め、(1)式から実座標 X_i を求めることができる。

3. 結果

3.1 3次元復元

本計測アルゴリズムを検証するテストケースとして、平面、曲面を含み形状が既知であるコンクリートブロック (図 - 2 左) を対象に形状計測を行った。対象にプロジェクタからカラーパターンを照射した画像 (図 - 2 右) から前章の方法で全カラードット位置のマッチングを行い、各ドット位置の空間座標をプロットしたものが図 - 3 である。

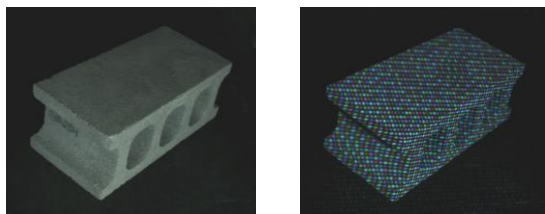


図 - 2 計測対象のコンクリートブロック(左)とカラーパターン投影画像(右)

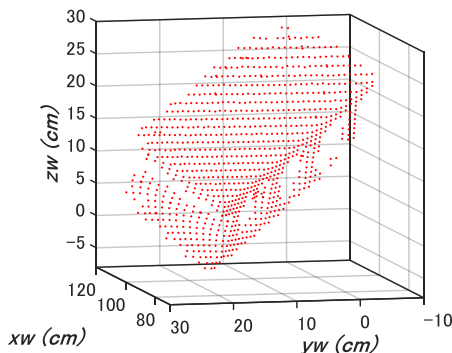


図 - 3 投影ドット座標をプロットした計測結果

撮影画像から抽出されたカラードットが 1019 個、その内自動マッチングされたのは 962 個あり、マッチング率は 94.4% とかなり高い水準に至った。また、対象の実寸が幅 39.0cm、延長 19.0cm 高さ 15.0cm であるのに対し、該当するプロット間距離はそれぞれ 38.78cm、18.75cm、14.87cm となり、計測された全ての座標は既

知のブロック形状と矛盾ないことがわかる。

3.3 計測精度検証

一方、カラードットは対象の頂点位置に相違なく投影されているわけではないため、次節で本計測法の精度検証について述べる。

コンクリートブロック上面に図 - 4 左の画像のように 0.75cm 間隔のグリッドを、縦 16 個、横 15 個設置し、本計測によって実座標を取得する。その際、各グリッドは前述のマッチングアルゴリズムで直接求めることはできないため、以下の手法を用いる。

図 - 4 右は任意グリッド $G(x_G, y_G, z_G)$ とこれを囲む最近傍のカラードット投影 A 、 B 、 C 、 D を模したもので、グリッドを交点として 4 つの四角形領域に分割する。投影による実座標はマッチングアルゴリズムから取得するため、各領域の面積を求める。図 - 4 右のように各実座標にそれぞれから最も遠い位置にある同色領域の面積をかけることで、グリッドとの距離に近い実座標から順に重みをつけて次式でグリッドの実座標を解く。

$$G(x_G, y_G, z_G) = \text{lm}\{(l-a)(m-b) \cdot A + (l-a)b \cdot B + ab \cdot C + a(m-b) \cdot D\} \quad (3)$$

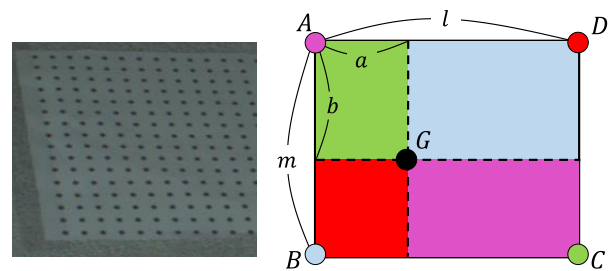


図 - 4 対象に設置したグリッド(左)とこれにカラーパターンを照射した模式図(右)

これをもとに隣接するグリッド間距離を算出し、既知との差の絶対値をエラーとして、標準偏差、二乗平均平方根を求めた結果が図 - 5 である。

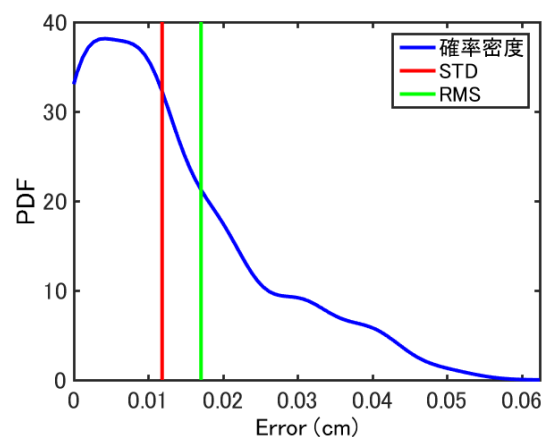


図 - 5 計測誤差の確率分布図

標準偏差は 1.18×10^{-2} cm、RMS は 1.70×10^{-2} cm となり、1/100cm 程度の誤差が確認され、自動計測に対する信頼性が裏付けられた。

4. 複数画像による三次元復元

3. で述べたように、本計測アルゴリズムを用いること

で、撮影画像から抽出されたカラードットのほとんどは矛盾なく三次元復元できる。一方で、それは照射されている表面に限定されるため、どの角度から見ても完全な形状復元はされていない。そこで、ある角度から撮影し取得した実座標群に、別角度から取得した実座標群を回転、平行移動させることで、これらを合成し1枚の画像では写らない部分の実座標を補完する方法を述べる。簡単のため、別角度から得た2つの実座標群について、固定させる実座標群を固定座標、移動させる実座標を移動座標と定義する。全ての固定座標を、図-6左のように最近傍の3点で構成されるS個の三角形に分割し、それぞれの法線ベクトル n_i 、重心 p_i ($i=1, 2, 3 \cdots S$)を求める。次に移動座標について、移動前後の実座標をそれぞれ X_j 、 X'_j ($j=1, 2, 3 \cdots T$) とすると、移動後の実座標は次式で表される。

$$X'_j = \begin{pmatrix} x'_j \\ y'_j \\ z'_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、図-6右は分割した三角形の一つを簡単に表したものである。 δ は移動する実座標と分割平面との距離を表し、次式で与える。

$$\delta = |(X'_j - P_i) \cdot n_i| \quad (5)$$

別角度からの撮影で取得した実座標であり、同一箇所に投影されていないため、実座標どうしを一致させるのではなく、移動後の実座標と固定座標の三角形分割平面の距離が最小となるような回転、併進ベクトルの各成分について、最小二乗法を用いて以下の式で解く。

$$\delta^2 = \sum_i^S \sum_j^T |(X'_j - P_i) \cdot n_i|^2 \quad (6)$$

(6)式で得た回転、併進ベクトルから X'_j を求め、これを繰り返し計算によって固定座標に近似していく。

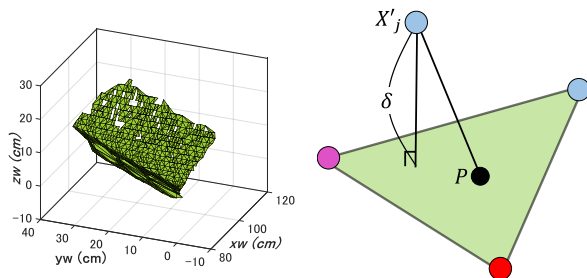


図-6 三角形分割した固定座標(左)と分割面と移動後の実座標 X'_j の模式図(右)

5. 自由水面への適用

前述の章で固体の表面形状計測に対する信頼性が確認され、その応用として本計測法を自由水面への適用を考える。水面にカラーパターンを投影させるために白色粒子で着色し、実験には可変勾配ダムブレイク水槽を使用し、遡上過程における水面計測を行う。

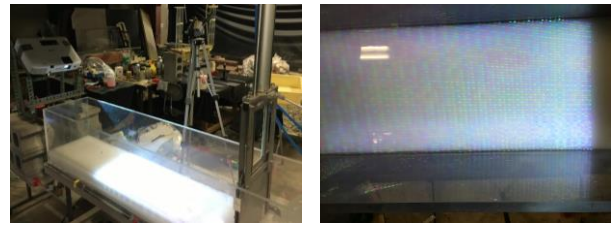


図-6 ダムブレイク水槽(左)とカラーパターンを照射した水面(右)

6. おわりに

プロジェクタ-カメラ系形状計測法に新たな自動マッチングアルゴリズムを導入し、平面、曲面をもつ物体を対象に、計測試験、精度の検証を行った。その結果高い自動化率、計測精度を確認することができた。今後は5.で述べたように応用として形状が複雑かつ動的な自由水面、特に遡上過程へ適用し、3次元的に時々刻々変化する波高計測を目指す。

参考文献

- 1) YASUNORI WATANABE & YUTA MITOBE: AN IMAGING TECHNIQUE FOR MEASURING WAVE SURFACE SHAPES, Coastal Engineering Journal Vol. 53, pp549-565