3次元形状の単眼視画像計測法の汎用化に向けた研究

Generalization of single vision image measurements for 3-D shapes

北海道大学大学院工学研究科 学生員 三戸部佑太 (Yuta Mitobe) 正 員 北海道大学大学院工学研究科准教授 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. **はじめに**

海岸工学において、消波構造物の安定実験や消波ブロックの 飛散状況の評価などを行う場合、構造物の変位や変形を十分に 数値的に評価することが難しく、そのことがそのような実験や 構造物の管理にかかる労力を大きなものとしている。そこで著 者ら(2009)¹⁾は、1台のプロジェクターと1台のカメラを用い た新たな画像計測法を提案した。これはプロジェクターからカ ラーパターン (図-1 参照)を物体に投影し、それをカメラで 撮影することでその物体表面の3次元座標を取得するものであ り、この方法により物体の3次元計測を容易に行うことが可能 である。本計測法は固体および液体両方の3次元表面形状計測 を可能とするものであり、土木工学分野において広い範囲での 適用が期待されるものであるが、その適用実験は実験室内にお いてのみ行われており、その屋外計測への適用性は示されてい ない。そこで本論では屋外における計測実験を行い、その適用 性の検証を行った。

また本研究は、本計測法による自動計測もその目標としてい る。計測は、キャリブレーションによりプロジェクターとカメ ラの位置関係を取得し、プロジェクターから照射したカラーパ ターンの物体表面での反射光をカメラにより撮影し、撮影した 画像の解析により計測対象の3次元座標を計算する、という3 つの手順からなる。通常、本計測法ではカメラとプロジェク ターの位置関係が変化するたびに再度キャリブレーションを行 う必要があるが、カメラとプロジェクターの位置関係を正確に 制御することでこれを省略することが可能である。また、画像 の解析は撮影画像中におけるカラーパターンの各ブロックの抽 出およびその重心の座標の計算、撮影画像中のブロックと投影 画像中のブロックのマッチング、各ブロックの物体表面におけ る実座標の計算の順に行う。ここで撮影画像と投影画像でのブ ロックのマッチングはその色の配列から目視による判断で行わ れており、この過程を自動化することで画像の解析を自動で行 うことができる。そこで本論では、カメラとプロジェクターの 位置関係を制御することによる再キャリブレーションの省略と ブロックのマッチングの自動化について述べる。



図-1 投影するカラーパターン

2. 計測方法

プロジェクターからカラーパターンを物体に照射しその物体 表面での反射光をカメラにより撮影する過程にピンホールモデ ルを適用することで(図-2参照)、カラーパターン中の各ブ ロックの物体表面における実座標を、その投影画像中での座標 と撮影画像中での座標およびプロジェクターとカメラの位置関 係から計算することができる(著者ら 2009¹⁾)。また、キャリ ブレーションはカメラおよびプロジェクターの奥行き方向に垂 直に立てた実座標が既知であるグリッドにカラーパターンを投 影しそれをカメラで撮影し、さらにグリッドを奥行き方向に平 行移動したものに対しても同様に投影および撮影をすることに より行う。これによりカメラとプロジェクターおよび実座標系 の3次元的な位置関係を取得することができる。



3. 屋外における計測実験

屋外では、その時間帯や天候、周囲の状況により、光学的環 境が大きく変化する。本実験では、夜間における路面形状計測 と日中における車庫の計測を行い、本計測法の屋外における計 測への適用性を検証した。

3.1 路面形状計測

(1) 実験条件

路面形状の計測は、午後8時から行い、天候は小雨であった。 プロジェクターおよびカメラは建物の2階に設置し、建物前面 の車道に対し路面形状の計測を行った(図-3参照)。なおプ ロジェクターは輝度 5000 ルーメンのものを使用し、キャリブ レーションは 20cm 間隔で格子点をうった 1820×910×100mm のスチレンボードによって行った。本計測法による計測結果と 3 次元スキャナによる計測結果を比較し、その精度を検証した。



(b) 撮影画像 図-3 計測対象の路面

(2) 実験結果

計測結果を図 - 4 に示す。計測結果は、道路横断方向の変化 をみるため縦横比を調整し、3 次元スキャナにより計測した結 果とともに表示している。ほぼすべての点で3次元スキャナと 同等の結果が得られており、本計測法による計測値の3次元ス キャナとの誤差を計算すると、その確率密度分布(図-4b)か ら誤差ピークはおよそ0.5cm であった。



図 - 4 路面形状の計測結果

3.2 車庫の計測

(1) 実験条件

次に日中における車庫の形状計測を行った。計測は午前11 時30分から行い、天候は曇りであった。プロジェクターは輝度12000ルーメンのものを使用し、キャリブレーションは路面 計測と同様に200m間隔で格子点をうったスチレンボードを用いて行った。

(2) 実験結果

日中など周囲の光が強くカラーパターンが撮影画像にはっき りと写らない場合でも、カラーパターンを投影したときに撮影 した画像と何も投影していないときに撮影した画像の差をとる ことにより、カラーパターンの色を撮影画像から抽出すること ができる。またこの方法により、物体表面の色に場所により違 いがある場合でも適切に色の抽出を行うことができる。

本実験で撮影した、カラーパターン投影時の画像と何も投影 していないときの画像、および画像の差を取って行った色の抽 出の結果を図 - 5 に示す。車庫の表面および車庫前面にあるア スファルト部分でカラーパターンが適切に抽出されていること がみてとれるが、土や草の部分ではカラーパターンを適切に抽 出することができず、またカラーパターンの投影されていない 場所においても色の誤抽出が多く発生した。これは草が風によ り揺れることや日光など周囲の環境が時々刻々と変化すること によるものであると考えられる。

図面から再現した車庫の3次元画像に計測結果をプロットし、 適切に計測が行われているかを検証した(図-6参照)。これ によりその精度を数値として与えることはできないが、その形 状・大きさともにほぼ一致し、適切に計測できていることがわ かった。



図-5 車庫の画像の解析



図-6 車庫の計測結果と図面から再現した形状との比較

3.3 **まとめ**

路面形状計測により夜間などカラーパターンが十分に撮影画 像に写る場合、屋内と同様の解析方法により計測が可能である ことがわかった。また車庫の計測により、日中などカラーパ ターンが撮影画像にほとんど写らない場合でもカラーパターン を投影していない画像との差を取ることにより計測が可能であ ることが明らかになった。今後は船体の動揺試験に本計測法を 適用し、その屋外における動的計測への適用性を検証していく (図 - 7 参照)。



図-7 船体動揺試験への適用

4. **計測の自動化**

次にカメラとプロジェクターの位置関係を正確に制御することによる再キャリブレーションの省略およびブロックのマッチングの自動化について述べる。

4.1 再キャリプレーションの省略

図 - 8 に示す装置によりカメラとプロジェクターの位置関係 を制御し再キャリプレーションなしでの計測を行う。この際に 発生すると予測される誤差について、数値実験および実際に装 置を使用した計測実験により検証した。



図-8 実験装置

(1) 数值実験

数値実験ではまずカメラとプロジェクターの位置関係が既知 である状態からカメラの方向を変化させ、その変化量から計算 したカメラの向きを用いて計測を行う場合の計測結果とピン ホールモデルから計算される物体表面における実座標の理論値 を比較した。このときプロジェクターを実座標系の原点におき その投影軸を Y 軸に一致させ、Y 軸に垂直な壁面の形状を 6× 10 に配列した 60 個の点を投影することで計測する場合につい て計算を行った(図 - 9a 参照)。その結果、計測値と理論値は 完全に一致し、プロジェクターに対するカメラの向きが変化し た場合でもその正確な変化量が得られていればその値から計測 を行うことが可能であることが確認された(図 - 9bc 参照)。

次にカメラの方向に微小なずれが生じた場合の誤差の大きさ

を計算し、その大きさおよび誤差の小さくなる時のカメラとプロジェクターの光軸のなす角度について調べた。このとき上述の計算と同様に実座標系の原点においたプロジェクターから Y軸に垂直に設置した壁面に 6×10 に配列した 60 個の点を投影し、その形状を計測する場合について計算を行った。なお、カメラの向きに平均0°、標準偏差 1°の正規分布の乱数をずれとして与えたときの60 個の点の誤差を 100000 回計算し、その600000 個のデータの二乗平均平方根 (RMS 値)をプロジェクターから壁面までの距離 ty で正規化した値を誤差の大きさとした。計算は以下の3つの条件で行った。なおカメラは常に X軸上にあるようにその位置を決定した。

壁面位置を t_y=10 としカメラとプロジェクターの光軸のな す角度 を 40°から 50°まで変化させた場合

=46°とし壁面位置を t,=5~20 まで変化させた場合

カメラ位置を X=5 に固定し壁面位置を ty=5~20 まで変化 させた場合

条件の計算結果から誤差が最も小さくなるのは光軸のな す角度が46°の時であることが分かった(図-10a)。また条件の計算結果からが一定であるときの誤差の大きさは壁面の位置に対しほぼ一定であり、このことからカメラの方向にず れが生じた際の誤差の大きさはプロジェクターから物体までの 距離ではなく、光軸のなす角度により決まるものであると考え られる(図-10b)。条件では壁面の位置に対して誤差の大きさが大きく変化する結果が得られたが(図-10c)、この計 算条件では壁面の位置に対しカメラとプロジェクターの光軸の なす角度が変化するため(図-10d)それにより誤差が大きく なるものと考えられる。誤差の大きさは、ty=5のとき、つま リ壁面までの距離がプロジェクターからカメラまでの距離と同 等である場合壁面までの距離の4%程度であり、ty=20のとき 9%程度であった。



(2) 計測実験

次に実際に実験装置を用いて計測実験を行った(図-11 参 照)。装置前方約53cmの位置に実座標系の原点0をおき、そ の前後5cmにキャリプレーションボードを設置することでキャ リプレーションを行った。このときカメラとプロジェクターの 光軸のなす角度は約24°であり、これは数値実験によって求 められた微小な角度のずれに対する誤差が最小となる角度であ る46°より小さいが、実験装置の都合上このような条件で実 験を行った。まず、カメラの向きに上下方向-0.1°から 0.1°までずれ を与え、ty=10の平面の形状を計測しその 誤差を計算した。なおこのとき角度は上向きを正とした。次に カメラの角度を下向きに5°変化させ、実測値と再度キャリブ レーションを行い計測した結果、元のカメラとプロジェクター の位置関係から角度を変化させた後のカメラの位置・向きを計 算しそれにより計測した結果を比較した。

角度に微小なずれを与えた場合に生じる誤差の確率密度分布 を図-12a に、その誤差のピーク値の変化は図 - 12b に示す。誤 差のピーク値は =0.0375°のとき最小で 0.05cm 程度、

=-0.1°のとき最大で 0.4cm 程度となった。また、カメラの 角度を 5°変化させた場合の実測値、再度キャリプレーション を行い計測した結果、再キャリプレーションを行わずに計測し た結果をプロットしたものおよび二つの計測結果の実測値に対 する誤差の確率密度分布を図-13 に示す。理論上、再キャリプ レーションをせずに計測した場合でも再キャリプレーションを 行い計測した結果と同等の精度が得られるはずであるが、再 キャリプレーションを行ったものに比べ行わずに計測したもの は誤差が 0.1cm 程度大きくなる結果が得られた。これはカメラ の向きを変化させる時の回転軸の位置など、向きを変化させた 後のカメラの位置や向きを計算するのに必要な値を正確に見積 もることができていないことによるものであると考えられる。





図 - 13 再キャリブレーションなしで計測した結果(赤)と 実測値(青)および再キャリブレーションを行い計測した 結果(緑)の比較

4.2 ブロックのマッチングの自動化

(1) アルゴリズム

ブロックのマッチングは、投影画像での位置と撮影画像での 位置の対応が既知であるブロックを基準とし、それに投影画像 中で隣接しているブロックに対し、それに対応する撮影画像中 のブロックを以下の手順で捜すことにより行う。まず対応を捜 しているブロックと同じ色で、かつ撮影画像において基準とし ているブロックの重心位置から以下の式で定義される R を半径 とする円の内側に重心のあるブロックのみを候補とする。

$$R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} A_i} \tag{4}$$

ここでnは撮影画像中のブロックの数、A_iは撮影画像中の各ブ ロックの面積を表しており、これは撮影画像中のブロックの面 積の平均値を面積とする正方形の1辺の長さと等価である。以 上の条件を満たすものに対し、それが正しいブロックであると 仮定して実座標(x_k,y_k,z_k)の計算を行い、そのプロジェクター からカメラにいたるまでの光行距離 d_kと基準としたブロック の光行距離 d₀ との差 e_k、および基準とした点の実座標 (x₀,y₀,z₀)からの距離 D_kを計算する。

$$e_k = \frac{|d_k - d_0|}{d_o} \tag{5}$$

$$D_{k} = \sqrt{(x_{k} - x_{0})^{2} + (y_{k} - y_{0})^{2} + (z_{k} - z_{0})^{2}} \quad (6)$$

ここで光行距離の差 e_k は最初に基準としたブロックの光行距離 d_oによって正規化している。このとき、誤ったブロックに対し計算される実座標は基準とした点の実座標とは大きく異な リ光行距離の差およびその実座標系における距離は大きくなる ことが予想される。そのため e_k と D_k がともに最小になり、e_k が閾値 e_{th} を下回るものを対応するブロックと決定する。以上 の条件をまとめると次のようになる。

対応を捜しているブロックと同じ色のブロック 基準とするブロックから撮影画像中で半径 R 以内にある 基準とするブロックからの距離および光行距離の差が候 補となる点の中で最小

光行距離の差 e_k < e_{th}

この条件により対応するブロックが決定した場合、そのブロッ クを基準としさらにその隣接するブロックに対し対応するブ ロックを決定していく。これにより最初に基準とするブロック の対応のみ指定することでそのブロックから周囲のブロックの 対応を順に決定していくことができる。

(2) 適用

以上で示した方法を実際に計測時に撮影した画像に対し適用 しブロックのマッチングを行った。対象としたのは著者ら (2009)¹⁾が直方体ブロックを計測した際に撮影した画像およ びキャリブレーションに使用したグリッドを描いた平面を撮影

した画像である。どちらの画像も投影するカラーパターンの中 心にあるブロックの対応を最初の基準点として与え、e_{th}= 0.02 とした。マッチングを行い、その結果を用いて計測対象 の3次元座標を計算した結果を図-14に示す。平面を撮影し た画像ではブロックのマッチングが正しく行われているが、直 方体を撮影した画像では上部でマッチングのエラーが大量に発 生していることがわかる。これは基準とするブロックが同じ色 のブロックにはさまれている場合などで正しいブロックの対応 がえられないことがあり、さらにその誤って対応付けされたブ ロックを基準としその周囲のブロックの対応付けを行うために そのエラーが大きな範囲に広がったことによるものである。こ のようなマッチングのエラーは他のケースでも発生することが 予測されるため、本アルゴリズムによるブロックのマッチング を実用するに際し、そのエラーが他の点に影響し今回のような 大きなエラーになることを防ぐ方法が必要となることがわかっ た。







4.3 **まとめ**

数値実験によりカメラとプロジェクターの位置を正確に制御 することで再キャリブレーションを省略することが理論上可能 であることを確認した。計測実験においてはよい結果が得られ なかったが、これはカメラの位置や向きの変化を計算するため に必要な値が正確に見積もられていないためであると考えられ る。

また、ブロックのマッチングはエラーを伝播させないための 改良が必要であるものの、その自動化が可能であることを示し た。これらのことから本計測法の自動化が可能であることを明 らかにした。

5. 結論

屋外における計測を通して本計測法の屋外における静的な計 測への適用性を示した。今後、船体動揺試験への適用から屋外 における動的な計測への適用性を検証していく。

また、本計測法を自動化する方法について示し、その検証を 行った。これにより、計測の自動化が可能であることを明らか にした。

本計測法は今後の適用範囲の拡大および計測の自動化により、 より容易かつ土木工学においてより広い範囲で応用されるもの となる可能性を有するものである。

参考文献

1) 渡部靖憲、三戸部佑太: 固体・液体表面の3次元形状計測 法の開発、海岸工学論文集、第56巻、pp1466 - 1470、2009.