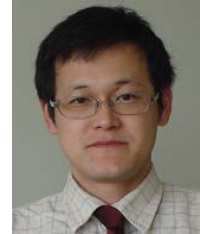


画像解析を用いた護岸消波工の積層構造分析技術の開発と維持管理及び長寿命化への応用

一井 康二¹・玉木 徹²

¹広島大学大学院工学研究科（〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1）

²広島大学大学院工学研究科（〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1）



現在、護岸消波工を含めた海岸保全施設の維持管理方法は、補修箇所発見後に対応を図る「事後保全型」であり、目視点検を中心に実施するため労力やコスト・時間が多大にかかる。そのため、維持管理方法の合理化が必要であり、少ない労力で消波工の現状を把握し、ブロックの移動や破損が生じている弱点箇所を検出し、将来の変状を予測できる手法が必要である。

そこで本研究では、画像解析技術を用いてブロックの形状・配置を手軽に把握する手法を検討する。そして、消波ブロックを対象とした画像解析による個々のブロック配置の評価、及び安定性評価手法を検討した結果を報告する。

キーワード 画像解析，消波ブロック，維持管理

1. はじめに

通常、海岸保全施設は計画・設計時に設定された機能を長期にわたって十分に発揮しつつ、使用されなければならない。しかし、これらの既存施設の多くは老朽化が進行しており、維持管理費用や更新費用が今後増大することが予想される。テトラポッドに代表される護岸消波工・消波ブロックについても、護岸背後部の高度利用が進むにつれて、維持管理技術の重要性が年々高まりつつある。消波ブロックの維持管理の際には以下の点に留意する必要がある。

- 1) ブロックの沈下・散乱による天端高さ不足や突起部への応力集中によるブロック自体の破損が、防護機能の低下に直接つながる。
- 2) 一箇所のブロックの変位が周囲ブロックの変位を誘発し、連鎖的に大規模な変形につながる危険性がある。
- 3) かみ合わせの不十分な孤立状態の消波ブロックは外力を受けることで移動し、護岸上部工や防波堤ケーソン部に衝突し、想定外の被害をもたらす場合がある。

現在、護岸消波工を含めた海岸保全施設の維持管理方法は、補修箇所発見後に対応を図る「事後保全型」であり、目視点検を中心に実施するため労力やコスト・時間が多大にかかる。そのため、維持管理方法の合理化が必

要であり、少ない労力で消波工の現状を把握し、ブロックの移動や破損が生じている弱点箇所を検出し、将来の変状を予測できる手法が必要であると考えられる。

そこで本研究では、画像解析技術を用いてブロックの形状・配置を手軽に把握する手法を検討する。そして、消波ブロックを対象に画像解析による個々のブロック配置の評価、及び安定性評価手法を提案する。

2. 画像解析技術による消波ブロックの3次元復元

本研究では、BundlerとPMVS-2という画像解析ソフトを用いて、実験時テトラポッド模型の3次元形状復元を行った。2つのソフトの役割と解析の流れを図-1に示す。

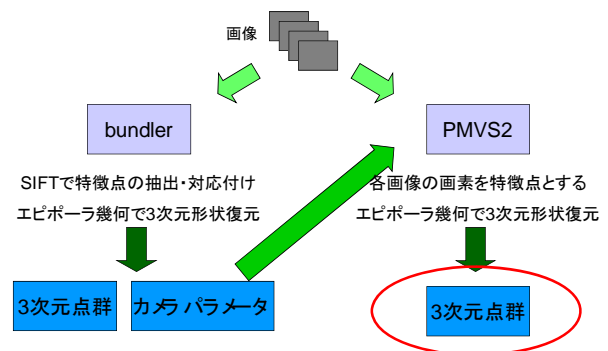


図-1 データ処理の流れ

Bundler は入力情報として対象物を写した複数枚の写真を用い、各写真で特徴点を検出していく。そして、写真間での比較を行い特徴点情報の一致を基にカメラの3次元位置情報と対象物の3次元形状情報を出力する。ここで出力される3次元形状情報はわずかで、対象物の形状が分かるほど正確な情報ではない。そこでさらに、PMVS-2を用いて対象物の詳細な3次元形状復元を行う。Bundler で出力されたカメラの位置情報と写真を入力情報として用いて、詳細な3次元形状復元を行う。3次元形状の復元は方向づけられた点の集合で行われ、各点の3次元座標値と各点の表面法線情報、色情報 (RGB) の九つが出力される。

画像解析に用いる画像は特定の位置から撮影する必要はない。この点が、既往の手法と大きく異なる点であり、現場での運用を容易かつ安価に可能とする。モルタル製の消波ブロック模型を対象に、3次元形状復元に用いた写真の例を図-2 に、復元結果を図-3 に示す。3次

元形状は、非構造 3D 三角形メッシュの処理・編集ソフト「MeshLab」を用いて可視化している。

消波ブロックの3次元形状が得られると、他の時期の同じ場所の消波ブロック群との配置変化の有無を確認することが原理的に可能となる。ここで、実際に配置変化の有無を確認するためには、得られた3次元形状の点群データと他の時期の点群データを比較するための重ね合わせ手法が必要となる。本研究では、3次元点の特徴量であるspin-imageにもとづき、keyscaleという新たな概念を提案して、重ね合わせのスケールを調整する手法を提案した。すなわち、通常の3次元形状復元では、点群のスケールの指標がなく、別途マーカー等を現地に設置して、スケールの調整を目視で行う必要がある。これは、実際の応用面においては煩雑な作業であるが、提案手法によりスケール調整が自動化できることとなった。スケール調整結果の例を図-4に示す。



図-2 3次元形状復元に用いたデジタルカメラ画像の例

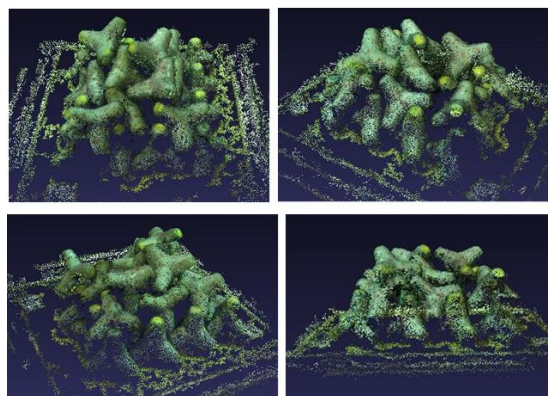


図-3 モルタル製消波ブロック模型の3次元形状復元結果の例

スケール合わせ前

8月の点群 keyscale=0.04

10月の点群 keyscale=0.3



スケール合わせ後

8月の点群 keyscale=1

10月の点群 keyscale=1



図-4 keyscale を用いた3次元復元結果のスケール調整の例
(異なる時期の撮影画像でも同スケールのブロックが復元できるように自動で調整)

3. 消波ブロックの形状を考慮した重心位置の把握

消波ブロックの形状を考慮し、頂点部の検出プログラムを作成した。テトラポッド頂点部の形状特性が「平坦で円形」であることに着目すると、頂点中心点と頂点中心点から半径 $R/2$ の円周上にある点を用いて外積計算を行った結果は、外積ベクトルが一致するか頂点中心点から対象位置になるはずである。また、外積ベクトルは頂点中心と重心を結んだ線分上に存在するはずである。そこで、外積計算結果を用いて頂点中心点から重心方向に移動した位置でのテトラポッド表面上の点の検索を行い、ある程度の点の存在が確認された時、頂点部と判断した。付録に頂点部検出方法の詳細を示す。

図-5 に、模型実験結果において目視で頂点部を抽出したものを一種の正解として示し、図-6 に自動化したプログラムで頂点部を抽出した結果を示す。いくつか抽出できなかったものや、誤抽出したものが存在するが、それなりの精度では抽出できていると解釈できる。

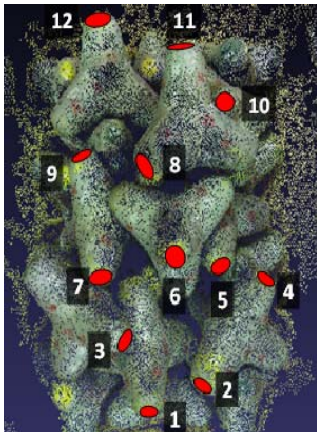


図-5 目視による頂点部抽出結果

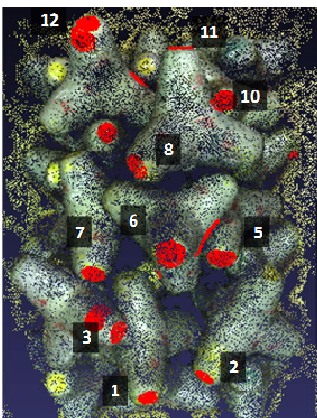


図-6 提案プログラムによる自動抽出結果

テトラポッドの頂点部のみを精度よく抽出することが出来れば、重心位置の推定も可能である。頂点部は「円形で平坦」という形状特性を持っているため、頂点中心と頂点部円周上の点を用いて外積計算をすると外積方向が一致する。この外積方向は頂点中心点から重心点までのベクトル方向と一致するため、外積ベクトルと頂点中心から重心までの距離を用いて計算が可能である（図-7）。重心位置 G の座標値は次式により求まる。

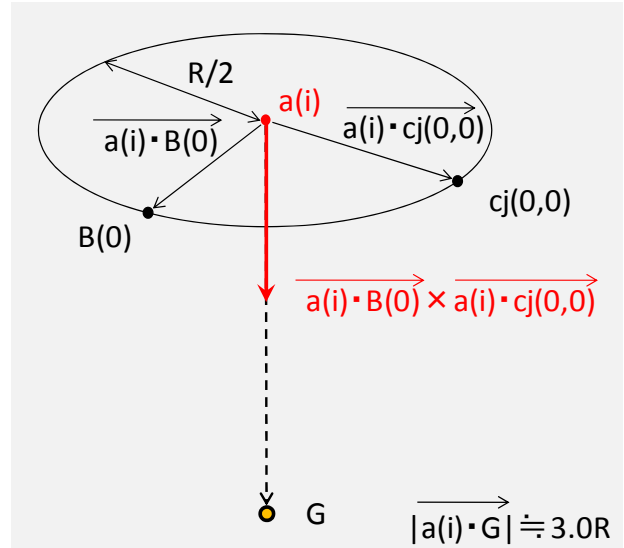


図-7 頂点部と重心位置の関係

$$G = \frac{|a(i) \cdot G|}{|a(i) \cdot B(0) \times a(i) \cdot cj(0,0)|} \cdot \overrightarrow{a(i) \cdot B(0) \times a(i) \cdot cj(0,0)} + a(i)$$

4. 重心位置に基づく安定性評価

安定性の評価指標の検討のため、模型実験を5ケース実施した。実験では、図-8 に示すように傾斜土槽を用いてテトラポッドに一方向の外力を加え、変位状況を確認した。

ブロックの重心位置変位の有無、ブロックが変位した時の傾斜角度、各ブロックと隣接（接触）ブロックとの重心間距離、接触点数のデータをまとめたグラフを図-9 に示す。今回の実験結果では、重心間距離（平均値） L_g が 4.5cm 以下の配置にあるブロックは動かず、安定しているという結果になった。

ブロックの重心間距離が小さいとき、ブロックは密な状態にあるため、安定性が高いと考えられることと調和的な結果である。ここで、安定性を確保できる重心間距離は外力の大きさに依存することが予想される。しかし、

本研究により、デジタルカメラの画像から、消波ブロックの頂点部の検出によって重心位置を検出することができることが確認できたため、画像解析により消波ブロックの安定性指標を自動的に分析できる見通しが得られたといえる。

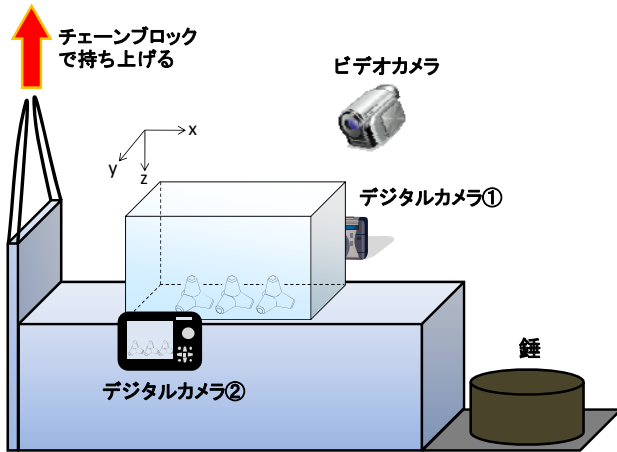


図-8 模型実験概要

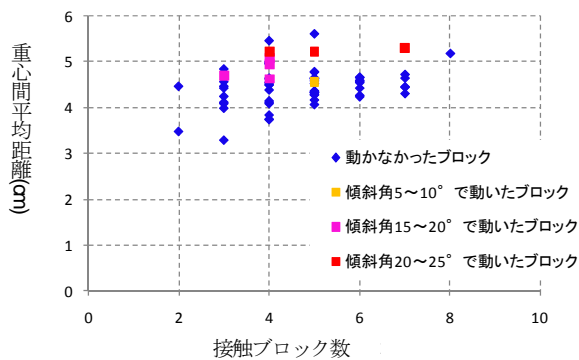


図-9 実験結果

5. おわりに

本研究では、画像解析技術を用いてブロックの形状・配置を手軽に把握する手法を検討し、消波ブロックの安定性評価手法についての提案を行った。

まず、安価なデジタルカメラ画像により消波ブロックの形状を3次的に復元できることを確認し、keyscaleの概念を用いることで異なる時期に撮影した画像による形状復元結果のスケールを自動的に調整できることを示した。この結果、異なる時期における消波ブロックの状況を3次的に容易に比較可能となった。

また、安定性評価のため、消波ブロックの形状を考慮した頂点部および重心位置の検出方法を提案した。推定精度に課題は残るものの、提案手法が有効であることを模型実験により確認した。さらに、外力を与える模型実

験により、重心間距離が安定性の指標となりえることを示し、提案手法が安定性評価の手法としても有効であることを確認した。

概ね、本研究により提案手法の実用化に向けての道筋は提案できたものの、推定精度等に課題が残っている。今後、推定精度を向上させ、実際の消波工の維持管理の合理化および長寿命化につなげていきたい。

謝辞：本研究は、株式会社不動テトラより消波ブロック模型の貸与などの協力を頂いたほか、谷川俊介君（現中電技術コンサルタント）、石田裕章君（現五洋建設株式会社）などの広島大学の学生を含む多くの方々の協力のもと遂行されたものです。ここに記して謝意を表します。

付録 ベクトル外積を用いた頂点部検出方法

テトラポッド頂点部の形状が「平坦で円形」であることを考えると、頂点中心点と頂点中心点から半径R/2の円周上にある点を用いて外積計算を行った結果は、外積ベクトルが一致するか頂点中心点から対象位置になるはずである。また、外積ベクトルは頂点中心と重心を結んだ線分上に存在するはずである。そこで、外積計算結果を用いて頂点中心点から重心方向に移動した位置でのテトラポッド表面上の点の検索を行い、ある程度の点の存在が確認された時、頂点部と判断した。以下に頂点部検索プログラムのフローを説明する。

① 「fileA」と「fileB」の準備

画像解析結果のデータを編集し、頂点部検索プログラムの入力データとして使用する「fileA」と「fileB」を作成・準備する。なお、「fileA」と「fileB」は同一の内容で、復元されたブロックの表面の点の3次元座標が格納されている。

② データ入力

n：座標データのデータ数

R：画像解析結果スケールでのテトラポッド頂点部直径

H：頂点中心点から重心方向への移動量

m：外積計算結果比較時の許容誤差基準

m0：外積計算結果による判定時の判定基準

m1：外積計算結果を用いて頂点中心点から重心方向に移動した位置でのテトラポッド表面上の点検索時の許容誤差基準

m2：外積計算結果を用いて頂点中心点から重心方向に移動した位置でのテトラポッド表面上の点検索による判定時の判定基準

の値を入力する。

③ 「fileA」から座標データの読み込み

まず、「fileA」から1点分の座標データを基準点 $a(i)$ として読み込み、 $a(i)$ を頂点部中心の座標であると仮定し、 $b(j)$ 座標との位置関係を調べていく。データ数が多いため基準点とする $a(i)$ 座標データを上から順番に一行ずつ読み込み計算している。

④ 「fileB」から座標データの読み込み

「fileB」から1点分の座標データを対象点 $b(j)$ として読み込む。

⑤ $a(i)$ と $b(j)$ の距離 $L < D$ なら $A(k)=b(j)$ として格納

D は仮想点作成時の $a(i)$ から仮想点までの距離で、 $a(i)$ との位置関係を調べる際に D 以上離れている場所にある $b(j)$ は対象としないため検索範囲を予め限定しておく。 D は H と R' を用いて以下の式によって決定する。ここで、 H は仮想点を作成する際に用いる $a(i)$ から重心方向への移動量で、 R' は $a(i)$ から重心方向へ H 移動した位置での円直径である。

$$D = \sqrt{H^2 + (R'/2)^2}$$

D の決定には R と H 、 R' の関係を、対象とするテトラポッドの形状に基づき明確にしておく必要がある。

⑥ $a(i)$ と $A(k)$ の距離 $L2=R/2$ なら $B(kk)=A(k)$ として格納

外積計算は $a(i)$ から $R/2$ の距離にある点のみを対象とするため、 $A(kk)$ の中から $R/2$ の距離にある点のみを抽出し、 $B(kk)$ として格納する。プログラムの中では抽出範囲を $R/2-R/10$ から $R/2$ の距離と設定している。

⑦ $\overrightarrow{a(i) \cdot B(0 \sim kk)}$ と 90 度の位置関係にある $B(kk)$ を $cj(kk, k3a)=B(kk)$ として格納

$\overrightarrow{a(i) \cdot B(0)}$, $\overrightarrow{a(i) \cdot B(1)}$, ..., $\overrightarrow{a(i) \cdot B(kk)}$ の kk 個のベクトルに対してそれぞれで 90 度の位置にある $B(0 \sim kk)$ を $cj(kk, k3a)$ として格納する。外積結果比較時に外積の大きさと方向を比較するため、2 つのベクトルがなす角が 90 度の時のみに限定した。

⑧ $\overrightarrow{a(i) \cdot B(0 \sim kk)}$ と $\overrightarrow{a(i) \cdot cj(kk, 0 \sim 1)}$ で外積計算

$$\overrightarrow{a(i) \cdot B(0 \sim kk)} \times \overrightarrow{a(i) \cdot cj(kk, 0)}$$

と

$$\overrightarrow{a(i) \cdot B(0 \sim kk)} \times \overrightarrow{a(i) \cdot cj(kk, 0)}$$

の計算を行う。

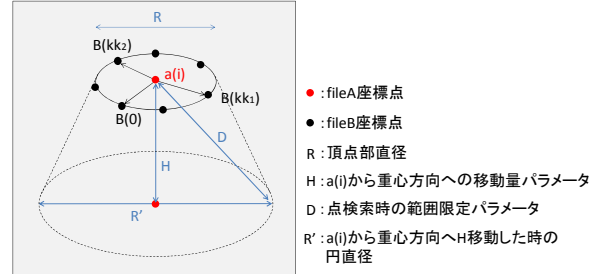


図-11 各パラメータの概要

⑨ 判定 1

$$\overrightarrow{a(i) \cdot B(0 \sim kk)} \times \overrightarrow{a(i) \cdot cj(kk, 0)}$$

と $\overrightarrow{a(i) \cdot B(0 \sim kk)}$

$\times \overrightarrow{a(i) \cdot cj(kk, 0)}$ の計算結果より、両者の外積ベクトルの比較を行う。

図-12 に示す例のように、 $cj(0,0)$ と $cj(0,1)$ が $a(i)$ を中心に対称の位置にあった場合、外積ベクトルの方向は $a(i)$ を中心に逆となることも考慮し、比較を行う。比較を行う際の許容誤差は、成分毎に $[\overrightarrow{a(i) \cdot B(0 \sim kk)} \times \overrightarrow{a(i) \cdot cj(kk, 0)}]m$ として設定し、比較を行う両者の差がこの許容誤差内にある数($k3b$)を数える。そして、外積結果の判定条件は、

$$\left(\frac{k3b}{kk}\right) > \left(\frac{m_0}{10}\right)$$

とした。つまり、 kk 個ある外積ベクトル比較対象のうち、 m_0 割以上が許容誤差範囲内であれば次の Step へ移る。 m_0 割を満たさない場合は次の $a(i)$ へ移る。

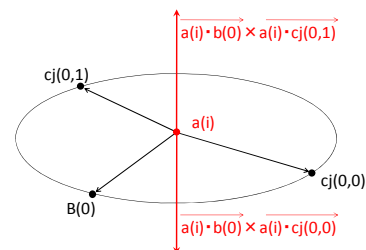


図-12 外積方向の例

⑩ B(kk)を用いて仮想点 OB1(kk)を作成

判定条件1を満足した時、 $c_j(0-kk)$ を用いて図-13に示すような仮想点 $OB1(0-kk)$ を作成する。 $a(i)$ が頂点中心である時、 $a(i)$ から重心方向へ H だけ移動した点を中心とした半径 $R'/2$ の円の円周上には点が存在するはずである。そこで、その円周上で仮想点 $OB1(kk)$ を作成し、周りの点との距離計算を行い判定条件2で判定を行う。仮想点 $OB1(kk)$ の作成は以下の手順により行う。

1. $c_j(0-kk)$ の座標値を $a(i)$ を基準として R'/R 倍に拡張 (図-13 上図の青色矢印)。

2. 1で作成した点を外積 $\overline{a(i) \cdot B(0)} \times$

$\overline{a(i) \cdot c_j(0,0)}$ 方向へ H だけ平行移動 (図-13

下図のオレンジ矢印)。

図-13には示していないが、2で $-\overline{a(i) \cdot B(0)}$

$\times \overline{a(i) \cdot c_j(0,0)}$ 方向へ H だけ平行移動させた時の

仮想点も同様に作成する。

⑪ 判定2

作成した仮想点 $OB1(0-kk)$ と⑤で格納した $A(k)$ の間で距離計算を行い、両者間の距離が許容誤差範囲内(成分毎に R/m_1)にあるかどうかを調べる。 $OB1(0-kk)$ の1点に対して許容誤差内に1点以上 $A(k)$ の点が存在すれば1としその数(qq)を数えていく。 kk 個の仮想点全点で距離計算が終了した時、 kk 個のうち m_2 割以上の点で許容誤差内の点が存在する時、判定条件を満たしたとして $a(i)$ を頂点部中心点と判断する。判定条件を満たさない場合は次の $a(i)$ へ移る。つまり、仮想点による判定条件は、以下のようにした。

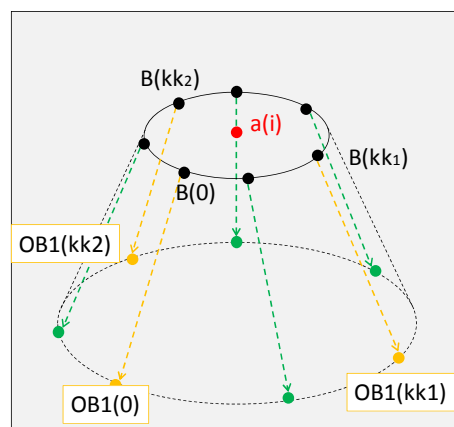
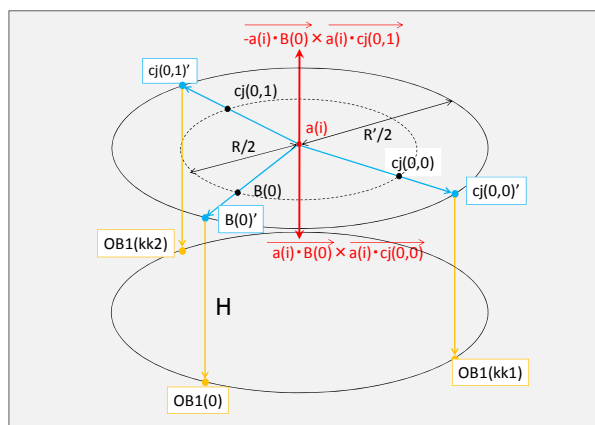
$$\left(\frac{qq}{kk}\right) > \left(\frac{m_2}{10}\right)$$

⑫ B(kk)各座標成分を出力

判定2を満足した $B(kk)$ の座標点情報を頂点部円周上に存在する点として出力する。

⑬ 判定3

「fileA」に座標データがあるかどうかを判定する。データがあれば次の $a(i)$ の読み込みへ移る。データが無い場合はプログラムを終了する。



- : fileA座標点
- : fileB座標点
- : B(0), c_j(kk1, kk2)を R'/R 倍した点
- : B(0), c_j(kk1, kk2)を用いて作成した仮想点 $OB1(0, kk1, kk2)$
- : B(0), c_j(kk1, kk2)以外を用いて作成した仮想点 $OB1()$

図-13 仮想点の作成過程

参考文献

- 1) 五明美智男, 塚和彦, 高山知司, 寺内潔, 高橋重雄: 消波ブロック被覆堤のブロックの安定性に関する現状調査, 海岸工学論文集, 第42巻, p901-905, 1995年.
- 2) 徐剛: 写真から作る3次元CG イメージ・ベースド・モデリング&レンダリング, 近代科学社(2001).
- 3) 金出武雄, “因子分解法による物体形状とカメラ運動の復元,” 電子情報通信学会論文誌, D-II, Vol.J76-D-II, No.8, pp.1497-1505 (1993).
- 4) David G. Lowe, “Object recognition from local scale-invariant features,” International Conference on Computer Vision, pp.1150-1157 (1999).
- 5) Bundler: Structure from Motion for Unordered Image Collections <http://phototour.cs.washington.edu/bundler/>
- 6) Patch-based Multi-view Stereo Software(PMVS - Version 2) <http://grail.cs.washington.edu/software/pmvs/>
- 7) A. E. Johnson, M. Herbert, “Using Spin Images for Efficient Object Recognition in Cluttered 3D Scenes,” IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 21, No. 5, pp.433-449 (1999).
- 8) 株式会社テトラ: テトラポッド設計要領, pp.1-14, 1996年