

サンゴ礁海域を対象とした 写真測量 (測深) 法の開発

DEVELOPMENT OF PHOTOGRAPHIC SURVEY ON A CORAL REEF

田中龍児¹・西 隆一郎²・佐藤道郎³・高江洲剛⁴

Ryoji TANAKA, Ryuichiro NISHI, Michio SATO and Tsuyoshi TAKAESU

¹学生会員 鹿児島大学大学院理工学研究科システム情報工学専攻 (〒890-0065 鹿児島市郡元1丁目21-40)

²正会員 博 (工) 鹿児島大学水産学部水産学科 (〒890-0056 鹿児島市下荒田4丁目50-20)

³正会員 工博 鹿児島大学工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元1丁目21-40)

⁴海上保安庁海洋情報部環境調査課環境調査官 (〒104-0045 東京都中央区築地5-3-1)

A nearshore zone characterized by coral reef has so much potential for fish habitat, marine activity and other ecological and recreational functions. However, a subaerial survey with high special resolution is still hard to conduct in the nearshore zone yet especially in depths shallower than several meters. Therefore, an aerial photogrammetry method is applied to a nearshore survey at Yoshiwara beach in Ishigakijima Island, Okinawa. The method uses a digital still camera with nearly 8 mega pixels of resolution and a series of aerial photographs of carbonate beach and coral reef which were taken from a Japan Coast Guard (JCG) helicopter. The original digital photograph is then modified to an orthogonal image by using some new techniques. In addition, a set of nearshore topography data surveyed by an aerial laser system had been applied as a reference data. The resulting map shows a typical character of real coral reef topography although there are some inconsistencies. Thus, in general the current method can be applicable to a nearshore survey with good cost performance.

Key Words : Sub-aquatic region, Digital camera, Bundle adjustment, Aerial photogrammetry, Laser data

1. まえがき

サンゴ礁海域は生態学的にも重要な自然環境であり、環境保全のためには流れの数値計算などを行う必要もあるが、流れのシミュレーションを行うのに必要不可欠な詳細な地形情報が存在しない場合が多い。一般にサンゴ礁のような浅海域の測深は、調査船の航行が可能な所ではGPSと音響測深器を用いる深淺測量を行うが、それ以外の場所では標尺を用いる水準測量方式の深淺測量を行っており、作業効率も悪くかつ危険も伴う。さらにサンゴ礁海域は岩礁や砂地が複雑に入り組んでおり、従来の測深法では地形を面的に表現することは困難である。なお最近では、航空機に搭載されたレーザーによる測深技術も開発されているが、まだ一般的な測量として利用されてはいない。

本研究における測量対象海域である沖縄県のサンゴ礁海域は海水の透明度が高く、これまで空中写真を利用した深淺測量が行われている¹⁾。しかし、一般の空中写真測量では専用航空機と熟練した専門の撮影技師が必要であり、それだけに精度の高い測量成果が得られるが、数

枚の写真で足りるような狭い範囲の測量には適さない。

したがって、ある程度広範囲の測量 (測深) を、比較的安価にかつ精度もある程度確保できる手法を開発する必要がある。筆者らはこれまで、民生用デジタルカメラ (以下デジタルカメラ) で撮影された斜め写真による浅海域の地形測量への利用を研究してきた (田中ら, 2006)²⁾。これまでの研究では、カメラの分解能や海水の透明度にもよるが、測量地域を取り囲むように標定点 (地上基準点) を配置し、屈折率による水深の補正をほどこせば、陸地における空中写真測量と変わらない精度で図化が可能であることがわかっている。しかし、標定点の設置は時間的にもコストの面からも制約が起きるので、可能な限り設置を少なくする方法の開発が望まれる。

本研究においては、サンゴ礁海域の図化を目的として、ヘリコプターから撮影された一対の斜め写真を用いて、標定点を全く設置せず、地形図等から読み取った座標をバンドル調整計算の初期値として与え、繰り返し法により外部標定要素を求めるという手法で、写真測量 (測深) の開発を試みた。精度の面では若干の問題が残っており、完全な実用化段階には至っていないが、一般の空中写真測量よりも手軽で経費の掛からない有効な手法と

考えられるので次章以降で説明する。

2. 内部標定と外部標定

図化作業までの順序は、内部標定、外部標定の順序で行う。図-1に本手法のフローチャートを示す。

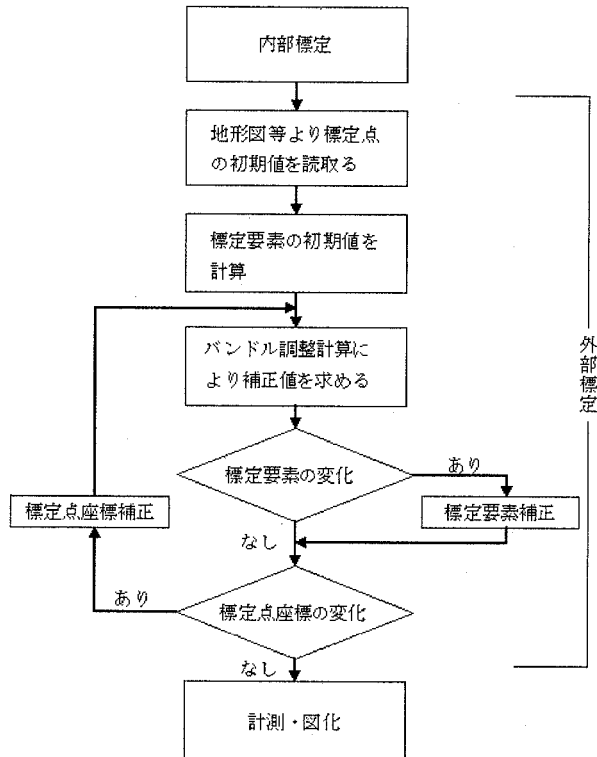


図-1 本手法の流れ

(1) 内部標定

使用したカメラの内部標定は、まず写真-1に示すターゲットをデジタルカメラで撮影し、二値化処理により黒丸のみを抽出し、その面積重心座標を画像処理により求め、次に主点からの距離に対するひずみ（ディストーション値）を求め、次式に当てはめて最小二乗法によりラジアルディストーション係数を算出する。

$$d = a_1 r + a_3 r^3 + a_5 r^5 \quad (1)$$

写真座標の補正量は次式を用いる。

$$\Delta x = \Delta x_p - x(a_3 r^2 + a_5 r^4) \quad (2a)$$

$$\Delta y = \Delta y_p - y(a_3 r^2 + a_5 r^4) \quad (2b)$$

ここで、 d はラジアルディストーション値、 a_1, a_3, a_5 はそれぞれラジアルディストーションの1次、3次および

5次の係数、 r は写真主点からの距離、 $\Delta x, \Delta y$ は写真座標 x, y の補正量、 $\Delta x_p, \Delta y_p$ は主点位置の補正量である。

また、ラジアルディストーションの1次の係数は、焦点距離の補正量として考慮に入れて計算する。表-1に算出したディストーション係数を示す。

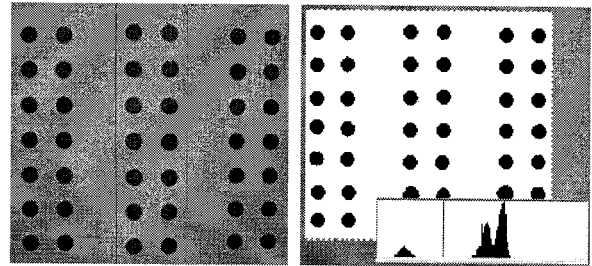


写真-1 内部標定用ターゲットと二値化の状態

表-1 ディストーション係数

1次	2次	3次
-8.123×10^{-5}	3.897×10^{-6}	-4.755×10^{-8}

(2) 外部標定

外部標定要素はバンドル法により算出するが、バンドル法に用いる外部標定要素の初期値は、斜め写真の場合、図化機に付属した斜め写真支援機能を用いて、カメラの位置と回転角を求める。図-2は外部標定要素の初期値を求めるイメージである。また、標定点の初期値は陸上については1/25,000地形図より読取り、海底はレーザー測深データから読取った。図-3、図-4は、それぞれ陸上と海底の標定点の初期座標取得のイメージである。

標定要素の初期値も読取った座標も大きな誤差を含むことが考えられるので、バンドル調整計算後の座標値を補正し、その変化がなくなるまで、反復計算を行う。

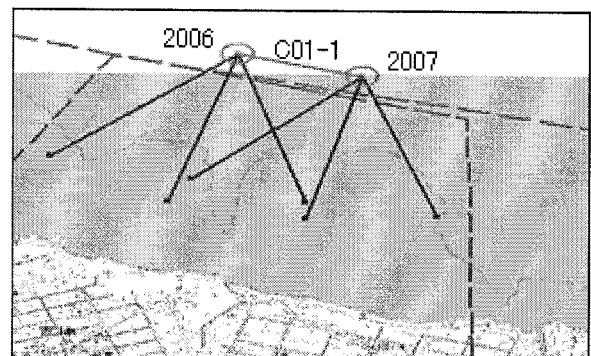


図-2 図化機のグラフィカルな機能で外部標定要素の初期値を求めるイメージ

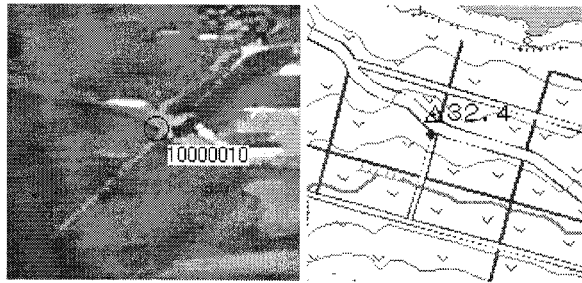


図-3 陸上における標定点の初期座標の取得のイメージ (1/25,000 地形図より読定)

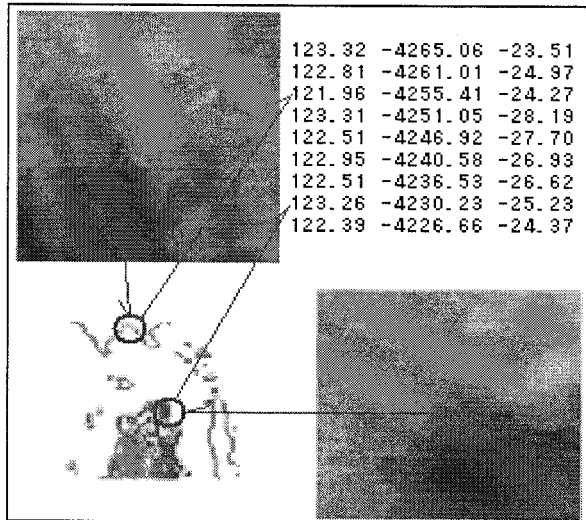


図-4 海底における標定点の初期座標の取得のイメージ (レーザー測深データより読定)

3. 図化作業

写真-2はサンゴ礁海域を撮影高度約600mの上空からデジタルカメラで撮影した1対の写真である。図-5は、これらの写真より1m間隔の等深線を描画した後、段彩を施したものであり、この地形図で判るように、デジタルカメラを用いた写真測量であっても、複雑な等深線の状況や岩礁の細部の表現が十分可能である。撮影高度をさらに低くすると、珊瑚の分布状況などの判読にも利用できると思われる。

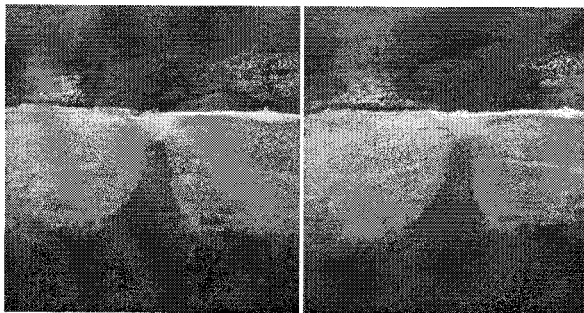


写真-2 ヘリコプターから撮影した斜め写真

また、図-6は、図-5におけるA-A'、B-B'、およびC-C'の断面図である。本研究に使用した写真では、撮影縮尺の関係で1m以内の高低差の測定は困難であり、そのため微小な凹凸は表現できていないが、沖縄海域で見られるサンゴ礁地形の典型的なパターン⁴⁾である、浜、後方礁原、礁池、前方礁原、礁斜面がこの図から見て取れる。

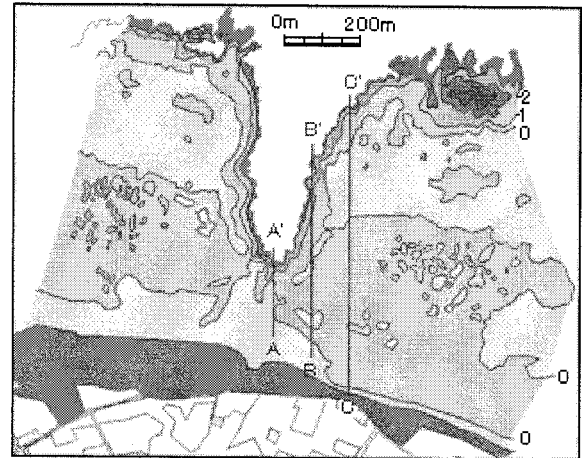


図-5 等深線 (1m間隔) の図化

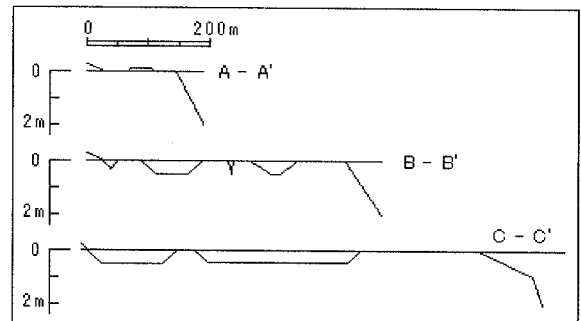


図-6 断面図

海水による屈折の補正については、次のMeijerの式⁵⁾を用い補正係数を算出する。

$$h = Fh' \quad (3)$$

$$F = \frac{\frac{B}{H+h'}}{\frac{s}{\sqrt{(n^2-1)d_1^2 + (H+h')^2 n^2}} + \frac{t}{\sqrt{(n^2-1)d_2^2 + (H+h')^2 n^2}}} \quad (4)$$

ここで、 h は補正後の水深、 h' は見かけの水深、 F は補正係数、 B は撮影基線長、 H は撮影高度、 n は海水の屈折率、 d_1 、 d_2 は左写真撮影位置、右写真撮影位置と測定点までのそれぞれの水平距離である。また、 s は測定点から撮影基線に下ろした垂線の足と左写真撮影位置までの距離、 t は測定点から撮影基線に下ろした垂

線の足と右写真撮影位置までの距離である。図-7は、式(4)より算出した撮影位置と補正係数の関係である。補正係数の値は撮影基線の中央で最小になり、撮影基線より離れるに従って大きくなるので、このことに注意しながら計算処理することが必要である⁹⁾。しかし、実際に連続的に補正係数を計算するのは不可能である。したがって本研究においては、等深線の描画の前に、おおよそ20m間隔で地形の変化点など明瞭な点を測定し、その補正水深を計算して標高点として別レイヤーにプロットしておき、計測値と照合しながら描画した。

なお、本研究で使用したデジタルカメラはOLYMPUS E-300、焦点距離14mm、撮影画面サイズ17.3×13.0mm、有効画素数800万画素で、図化機はアジア航測図化名人である。

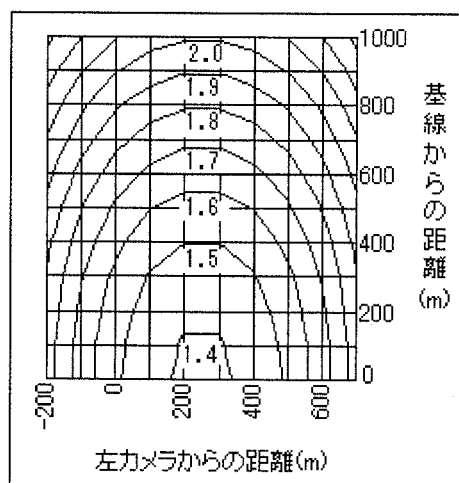


図-7 撮影位置と補正係数Fの関係

4. 考察

一般に内部標定を行うことで精度が向上すると言われているが、本手法では内部標定を行った場合と行わない場合では外部標定要素の初期値に若干の差が見られたが、繰り返し計算の結果ではほとんど変化がなかった。これは、レンズのディストーションが小さかったということと、ディストーションの影響よりも標定誤差の方が過大であったこと、あるいは内部標定のやり方そのものに問題があった可能性も考えられる。表-2にバンドル調整計算結果を示す。また、表-3に標定点の残差を示す。この場合の、収束までの繰り返し回数は5回であった。

外部標定計算の結果では、陸上部の1点に水平方向残差65.5m、垂直方向残差18.9mと極端に大きな誤差を生じたが、これは海側に位置する撮影点からの距離が長いことと、1/25,000地形図の読取誤差の影響と考えられる。それ以外の点では、水平方向残差平均値3.8m、垂直方向残差平均値1.5mであった。

水深の計測は汀線を0mに補正して行ったが、標定誤差の大きい部分や写真周縁部では計測が困難であった。ま

た、海底部は水深5mぐらいまでの計測は可能であるが、特にリーフフラット外縁の水深3m以深は、急傾斜地のため3m等深線まで描画した。ただし、砂地や海底の地物に高さを合わせるの、メスマークの接地状態が判り難く熟練を要する。

水平位置は立体化された写真を拡大しても、標定が正しく行われない場合に生ずる縦視差はほとんどなく、平面図の図化作業で問題となる点はなかった。縦視差は写真相互の関係がずれている場合に生ずるが、このことより相互標定は完成しているということであり、逆に高さの関係すなわち機械的調整法の場合の対地標定がうまく行われていないということがわかり、何らかの改善が必要である。

さらに本手法において、標定計算における読み取った座標の精度が悪い場合は、収束せず発散してしまう場合があった。これはバンドル調整計算の中でテラー展開式を用いて2次以上の項を省いて処理していることが大きな要因と考えられるが、今後、初期値の誤差と、収束・発散の関係を調べる必要がある。

表-2 バンドル調整計算結果

要素	写真Ⅰ		写真Ⅱ	
	初期値	調整後	初期値	調整後
κ	2.988	3.186	3.053	2.916
ϕ	0.000	0.133	0.000	0.067
ω	0.611	1.099	0.615	1.064
X (m)	9774.5	10042.7	9849.9	10055.2
Y (m)	6883.4	6695.1	6381.3	6604.3
H (m)	1168.4	535.9	1168.4	537.4

表-3 標定点の残差

点	X (m)	Y (m)	H (m)
1	-10.5	64.7	18.9
2	3.6	6.5	-9.3
3	-1.2	0.3	12.4
4	-1.0	-3.6	-6.9
5	1.5	2.5	17.0
6 (水準点)	0.0	0.0	-1.5
7 (水準点)	0.0	0.0	-2.7

また、本手法ではバンドル調整計算の出力結果を用い、補正計算は別に手計算で行ったが、理論的には次のような式の関係と等価と考えられる。

まず、線形化された共線条件式⁷⁾は次のように表すことができる。

$$A_1 x_1 + A_2 x_2 = e \quad (5)$$

またはこれらをまとめて、

$$Ax = e \quad (6)$$

ここで x_1 , x_2 はそれぞれ外部標定要素, および標定点座標の残差量 (未知ベクトル) であり, e は残存量ベクトルである. A_1 , A_2 はそれぞれ未知ベクトルに対する係数行列であり, $A = (A_1 \ A_2)$, $x = (x_1^T \ x_2^T)^T$ である.

係数行列 A が正則であれば, (6) の最小二乗解は

$$x = (A^T A)^{-1} A^T e \quad (7)$$

で与えられる. しかし, 標定点を設置しない場合, A にランク落ちが生じ, $A^T A$ の逆行列が存在しないので通常の最小二乗法が適用できない. 本研究のケースが, これに相当するが, デジタル図化機のプログラムを改変できないため, 本手法では対応点を固定し (x_2 に初期値を与え) x_1 のみを未知数として解いた後, x_2 を逆算しその変化がなくなるまで反復計算を行っている.

5. まとめ

本研究により, 沿岸域で標定点がとりにくい, あるいはない場合でも地形図などを利用すれば, 外部標定が可能であることが分かった. しかし, より高い精度の図化を行う場合は, 本手法のみでは十分でなく, 本手法を標定点を設置した場合の計算の前処理に適用することにより, 標定点の精度の良否の判定に利用することや, 外部

標定の初期値を精度良く求めるために利用することなども考えられる. 今後は, 標定点の現実的な設置法なども含めて, 本手法の改良が必要である. また, 前章で説明した計算手法では, 収束するまで補正後の座標を5回から場合によっては10数回入力する場合があります, あまり現実的な方法ではない. このような問題を自動化する方法として一般逆行列を用いるフリーネット解法⁸⁾などいくつかの解法が考えられるが, そのシステム作りが今後の研究課題の一つである.

参考文献

- 1) 大田純一, 高津芳郎: 沖縄海域における海底図化作業について, APA, No. 36-2, pp. 21-25, 1987.
- 2) 田中龍児, 西 隆一郎, 幸 哲也, ニツ町 悟: 民生用デジタルカメラを用いた浅海域地形の写真測量法の開発について, 海洋開発論文集, 第22巻, pp. 911-915, 2006.
- 3) 中田隆司, 近津博文: 民生用デジタルカメラを用いた三次元計測システム3DiVisionの開発, 日本写真測量学会, 平成14年度秋季学術講演会論文集42巻3号, pp. 283-286, 2000.
- 4) 高橋達郎: サンゴ礁, 古今書院, pp. 142-172, 1991.
- 5) 佐藤一彦, 内野孝雄: 海洋測量ハンドブック, 東海大学出版会, 1973.
- 6) 中村正治: 空中写真による海底地形の直接図化, APA, No. 19, pp. 194-499, 1982.
- 7) 日本写真測量学会: 解析写真測量, 日本写真測量学会, 1983.
- 8) 秋本圭一, 服部進, 大西有三, 三浦悟: 画像計測法のトンネル内空形状計測への応用, 土木工学会論文集No. 678/III-56, pp. 289-301, 2001.