

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

PHOTOGRAPHIC SURVEY IN A SUB-AQUATIC REGION APPLYING COMMERCIALLY AVAILABLE DIGITAL CAMERA

田中龍児¹・西 隆一郎²・幸 哲也³・二ツ町 悟⁴

Ryoji Tanaka, Ryuichiro Nishi, Tetsuya Yuki and Satoru Futatsumachi

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 (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インフラテック株式会社 (〒890-0062 鹿児島市与次郎2丁目7-25)

⁴第五管区海上保安本部海洋情報部部长 (〒650-8551 神戸市中央区波止場町1番一号)

A digital still camera with 6 to 8 mega pixels has been commercially available nowadays and has been commonly applied to image sensing. In addition, the resolution of digital camera has developed to be higher as much as 12 mega pixels. These cameras would be applied to an aerial photogrammetry. However, an aerial photography processing for survey purpose has not been standardized especially for nearshore zone for which normal land survey techniques are also difficult to apply, because it is too deep and rough to conduct a human survey, and is too shallow to carry out a ship (sounding) survey. It sounds that an aerial photogrammetry by using a commercially available high resolution camera has much potential to apply for a nearshore survey. Therefore, the Bundle adjustment is applied to a set of obliquely snap-shot digital aerial photographs for obtaining (x, y, z) data and accuracy in this paper. As a result, reasonable accuracy is obtained if the digital point for survey exists inside a benchmarked area. The resolution would be better if any benchmarked points (targets) can be placed on either sea bottom or water surface.

Key Words : sub-aquatic region, digital camera, Bundle adjustment, aerial photogrammetry

1. まえがき

海岸工学では、高潮・津波などの海洋災害の防止や海岸侵食防止などの海岸保全、海岸動植物も含めた海岸環境の保全、そして、地域住民や観光客などの海岸利用者の安全性確保などが重要な研究テーマである。一般に言われる海岸の「保全・環境・利用」を検討する上で、陸上および水面下の海岸地形は最も重要な基礎データの一つである。対象とする海岸地形を把握するために、従来は水準測量と音響測深がよく用いられた。しかし現在は、ハイテク応用測量とも言われるGPS測量、サイドスキャンソナー測深、マルチビーム測深、航空レーザー測量(測深)、3Dレーザープロファイラー測量、空中写真測量などが利用可能となっている。従来使用されたある種のローテク測量(測深)は安価でデータの取得が確実、そして、熟練者でなくても取り扱える長所があるが、空間分解能が悪いことや測線長(測量区間)に応じて労

力と時間が増えることになる。また、測深精度は海象条件にもよるが、そうじて20cm以下の測深精度を保証することはかなり困難である。一方、ハイテク応用測量は、空間分解能が高くかつ測量(測深)精度も良い利点があるが、高価な機材と熟練者を必要とし、いつでも誰でも使えるという事にはならない。例えば、2004年12月に生じたスマトラ沖地震津波による海岸侵食や打上堆砂による海岸地形の変化状況を広範囲に調べる必要性を研究者が感じて、現実的には容易に実施できないのが実情である。また、極浅海域といえる海跡湖(インレット)やサンゴ礁(写真-1参照)、そして、干潟など(写真-2参照)に関しては、地元自治体が行う工事目的の測量(測深)結果以外には、ほとんど測量(測深)されていない。海跡湖やサンゴ礁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、一般に現況の測量対象とされていないために、流れのシミュレーションを行うのに必要不可欠な地形情報(測深結果)が存在しない場合が多い。した

がって、ローテク測量（測深）とハイテク測量（測深）の中間に位置し、ある程度広範囲の測量（測深）を、必要に応じて研究者単独あるいは少数のメンバーで比較的安価にかつ精度もある程度確保できる測量（測深）手法を開発する必要性がある。そこで、従来の空中写真で用いているハッセルブラッドなどの高価な専用カメラではなく、ほとんどだれでも保持している比較的安価で分解能が高い民生用デジタルカメラ（以下デジタルカメラ）を用いて、極浅海域の写真測量を行うための基礎的手法について検討することにした。

海底の写真測量において問題になる点は、(a) 気象条件や太陽高度がコントラストに大きく影響を与えること。(b) 海底には標定点を設置しにくいこと。(c) 標定点を海底にとる場合、画像のコーナー検出が難しい。などが挙げられるが、(a)については、海上保安庁などの実験(1969)で、水深値として最深部で15mを得ており、太陽高度が20～25°以上で50°より高くない時間帯で、風がなく大気が澄んでいる時が撮影に適していることなどが知られている(佐藤ら, 1973)¹⁾。(b)については、全点を未知点とするフリーネットワーク解法による標定計算を行った土木構造物計測の例(秋本ら, 2001)²⁾もあり、水深測定にも応用可能であると考えられる。(c)については、Foerstner演算子(Foerstner Wら, 1987³⁾を参照)を用いることにより、精度良く検出できることが確認されている(服部ら, 2004)⁴⁾。しかしながら、これまでの写真測量は、ほとんどが陸地の測量か、形状計測の場合であり、海底の写真測量は、判読・調査に利用された数例(北原ら, 1977)⁵⁾、(黒澤ら, 2001)⁶⁾はあるが、測深を目的とする利用・研究はあまり進んでいないのが現状である。

写真測量では、 X, Y, Z の値が既知である標定点を3点以上用いることができれば、バンドル調整法により3次元形状計測を行うことができる。バンドル調整法の特徴は、各画像を撮影した際のカメラの位置と姿勢を前もって校正しておく必要がないことであり、そのため、カメラを比較的自由に設置できる。さらに、対象物をその周囲の様々な位置から撮影した画像において対象物上の特徴点を抽出し、その間の対応をつけることによって、各画像を撮影した際のカメラの3次元位置座標と方向、および、特徴点の3次元座標を同時に決定できる。本稿においては、デジタルカメラで撮影した2枚の斜め写真を用いて立体モデルを作り、その精度の検証を行った。

2. バンドル調整法について

共線条件式をもとにして、異なる位置から撮影した複数の写真を用いて、写真を撮影したカメラの位置(X_0, Y_0, Z_0)及びカメラの傾き(ω, ϕ, κ)を求め、2次元の写真座標系(x, y)と3次元の測地座標系(X, Y, Z)の間の関係を確立する方法がバンドル法であ

り、図-1にその概念図を示す。図中、カメラ座標系を(X_p, Y_p, Z_p)、写真座標系を(x, y)、測地座標系を(X, Y, Z)として、カメラをそれぞれ Z 軸の回りに κ の角だけ回転、 Y 軸の回りに ϕ の角だけ回転、そして X 軸の回りに ω の角だけ回転させた傾きで写真撮影を行った場合である。

回転行列を用いると、地上の対象物P(X, Y, Z)の傾いたカメラ座標系におけるカメラ座標(X_p, Y_p, Z_p)は次式で求められる。



写真-1 測量が困難な極浅海域のサンゴ礁地形の例



写真-2 測量が困難な極浅海域の干潟地形の例

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad \dots \quad (1)$$

また、投影中心、写真像及び地上の対象物が一直線上にあるという共線条件式は次のようにして求められる。

$$x = -c \frac{x_p}{z_p} = -c \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \quad \dots \quad (2)$$

$$y = -c \frac{y_p}{z_p} = -c \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \quad \dots \quad (3)$$

このとき、カメラの回転を示す直交行列は次のようになる。

$$R = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots \quad (4)$$

ここで、 (X, Y, Z) は対象物 P の地上座標、 (X_0, Y_0, Z_0) は投影中心の地上座標、 c は画面距離（焦点距離）、 (x, y) は対応する写真像の写真座標、 a_{ij} は回転行列の要素である。

3点以上の標定点データを用いて式(2)、(3)を解くことで外部標定要素 $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)$ を求める。実際には、(2)、(3)式を線形化して観測方程式を作り、計測値の精度に応じた重みを乗じて、収束計算を行い、収束計算前後における写真座標の平均二乗誤差が1 μ m以下になった時点で収束したとみなす。ただし、5回程度の繰り返しで収束しない場合には、標定点の配置や、制約条件等を確認する。（日本写真測量学会、1983⁷⁾を参照）。

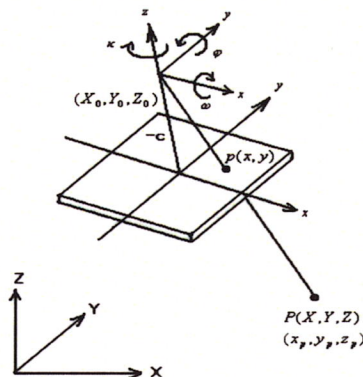


図-1 バンドル法の共線条件

3. 現地調査およびデータ解析

今回の撮影地域付近には標定点設置に必要な国家基準点や電子基準点がなく、RTK-GPS測量やVRS-GPS測量は不可能であったので、(株)ソキア製ディファレンシャルGPS（以下DGPS）により標定点を設置した。DGPSの水平位置精度は約1mと言われているが、その精度確認のために、トータルステーションを使った多角閉合方式の基準点測量を実施した。その結果、水平位置で50cm程度、標高で最大1m程度のずれが確認された。

図-2は、ヘリコプターからデジカメ撮影した斜め写真上に、標定点と三次元測量（3D計測）した点を記入してある。また、図-3は3D計測している様子を示している。

以下に、3D化の手順を示す。

- カメラの内部標定要素を調べる。
- 2枚の写真に共通な標定点を選点し、標定計算を行う。
- 3D計測。
- TIN（不等三角網）の作成。
- TINを元に等高線描画。
- オルソ画像作成。

この手順で、標定点に囲まれたTIN内部のS1点と汀線（水際線）上のS2点、および、リーフ内の離れ岩（礁）S3点の標高を測定した。その結果を表-1および表-2に示す。また、図-4は作成した3Dモデル、図-5は被写体表面の等高線（主曲線間隔1m）とオルソ画像である。なお、3D計測には(株)トプコン製の3D画像計測ソフトウェアPI-3000を用いた。

撮影に使用したデジタルカメラは焦点距離8.0mm、CCDサイズ7.12mm×5.34mmで、スケールファクタやレンズディストーション係数は不明である。精度の高い計測を行うためには、これらの内部標定要素を測定するか、地上基準点を多数設置し、セルフキャリブレーションを行わなければならない。しかし、写真の大部分を占める海底地形のキャリブレーション用測量データも得られていないので、今回はセルフキャリブレーションなしで標定を行った。撮影条件は、平均撮影高度482.45m、カメラの鉛直線に対する平均角度33.6°、潮位+30cmであった。

なお、海水による屈折の補正(図-6参照)については、次に示すMeijerの式¹⁾(5)、(6)を用いて行なうことが可能である。

$$h = Fh' \quad \dots \quad (5)$$

$$F = \frac{\frac{B}{H+h'}}{\frac{s}{\sqrt{(n^2-1)d_1^2 + (H+h')^2 n^2}} + \frac{t}{\sqrt{(n^2-1)d_2^2 + (H+h')^2 n^2}}} \quad \dots \quad (6)$$

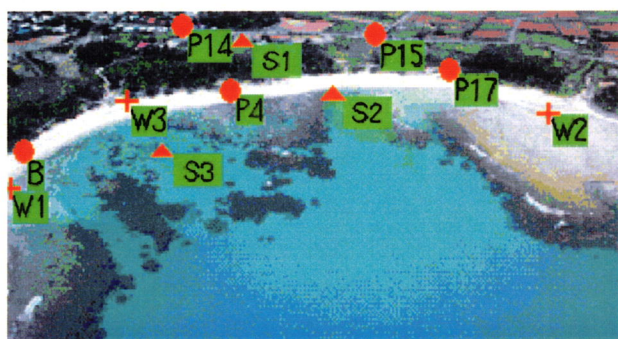
ただし、 h は補正後の水深、 h' は見かけの水深、 F は補正係数、 B は撮影基線長、 H は撮影高度、 n は海水の屈折率、 d_1 、 d_2 は撮影位置Ⅰ、Ⅱと測定点までのそれぞれの水平距離である。また、 s は測定点から撮影基線に下ろした垂線の足と撮影位置Ⅰまでの距離、 t は測定点から撮影基線に下ろした垂線の足と撮影位置Ⅱまでの距離、 C_1' 、 C_2' は屈折点である。

また、水平分解能 ΔXY と奥行分解能 ΔZ は、次式で求めた。

$$\Delta XY = (L/c) \times \Delta p \quad \dots \dots (7)$$

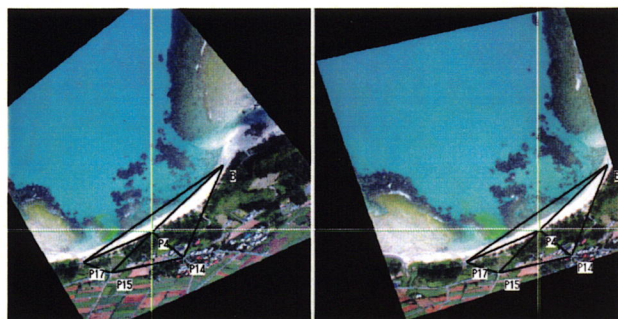
$$\Delta Z = (L/B) \times \Delta XY \quad \dots \dots (8)$$

ここで、 L は撮影距離、 c は焦点距離、 Δp は画像分解能、 B は撮影基線である。



●：座標既知の標定点，＋：座標未知の標定点，▲：計測点

図－2 標定点および計測点



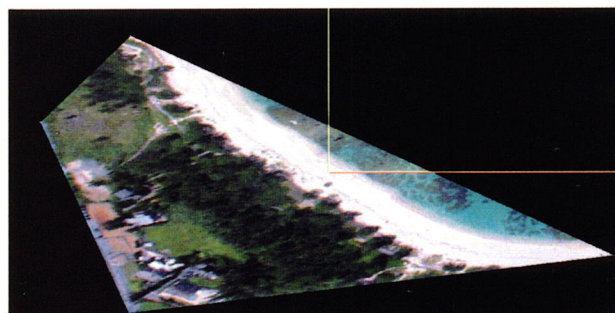
図－3 3D形状計測の様子

表－1 計測結果（計測点標高）

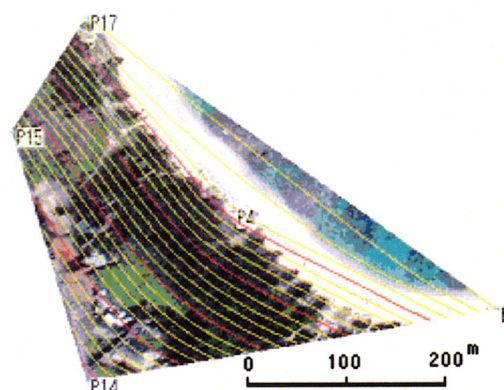
計測点	標高 (m)	備考
S1	29.485	近傍(P12)標高25.497 m
S2	0.137	汀線付近
S3	－4.526	実測なし

表－2 計測結果（実測値との比較）

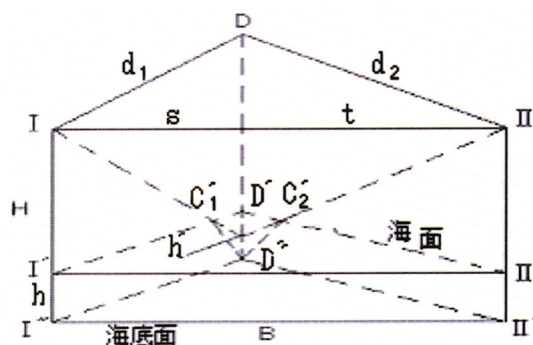
計測点	DX (m)	DY (m)	DZ (m)
P1	0.452	－0.232	－0.318
P2	－0.209	0.390	－1.186
P3	－0.331	－0.542	0.716
P4	0.007	0.009	0.986



図－4 3Dモデル



図－5 被写体表面の等高線とオルソ画像



図－6 海水による屈折の補正

通常、手持ちカメラによる撮影は斜め写真あるいは水平に近い写真となりやすいので、撮影基線長が撮影距離

より短い場合、カメラからの距離が遠くなるほど、奥行分解能が水平分解能より落ちることになる。さらに、水平分解能には撮影高度とカメラの角度が影響する。表-3は、このカメラで水平分解能0.1mを満足するためのカメラの撮影角度と撮影高度の関係を、次式により算出したものである。

$$D = (e/q)c \quad \dots \quad (9)$$

$$H = D \cos \theta \quad \dots \quad (10)$$

ここで、 D は主点と被写体との距離、 H は撮影高度、 θ は鉛直方向からのカメラの傾き、 c は焦点距離、 q は1画素の大きさ、 e は水平分解能である。

表-3 カメラの角度と撮影高度の関係

θ°	H(m)
0	229.5
20	215.7
40	175.8
60	114.8
80	39.9

5. 結論

本標定計算にはDGPSで測定した5点の基準点と、そのほかに明瞭に視認できる座標未知の3つの標定点の計8点を標定点として使用した。この場合、ステレオ画像の縦視差の標準偏差が4.37pixel、平面分解能が0.38m、奥行分解能が3.16mとなった。ただ、標定点に囲まれた部分の縦視差は拡大してもほとんどなく、分解能からすると、1/5,000～1/1,000程度の図化が十分可能である。逆に標定点より離れた海の部分は縦視差が大きく、本調査では水深が測定不能であった。また、比較的縦視差の小さい汀線付近の標高は、表-1のS2、S3に示すように良好と思われる値が得られた。

以上の結果から、デジタルカメラを用いて浅海域を含めた海岸測量を行うには、測量地域を取り囲むような標定点の配置が必要である。また、海底が鮮明に写るならば、海底の図化も可能であるので、海面もしくは海底に対空標識を設置する必要がある。この場合、陸上のみと比べ、標定点を多く取り難いので、内部標定と外部標定を同時に行うセルフキャリブレーションは難しい。した

がって、使用するカメラ固有のキャリブレーションデータが必要である。さらに、水深を測定する場合には、屈折率の補正も行う必要がある。

デジタルカメラによる測量は、バンドル調整法を用いることにより、2台のカメラを用いて同時撮影する方法よりも、撮影方法をあまり意識することなく簡単に撮影でき、海岸測量の分野においても応用が期待できる。しかし、より高精度の計測を行うには地上基準点を多く設置しなければならないが、その設置には多大な労力が必要である。今後、地上基準点の設置を最少におさえつつ、カメラと計測点との距離、撮影方向そして撮影間隔等の最適な組合せを求める必要がある。また、手持ちカメラによる撮影は、斜め写真あるいはかなり水平に近い写真となり、奥行分解能が水平分解能よりかなり落ちる。よって、標定計算において観測方程式に重みを乗ずる場合、対応する観測値に含まれる誤差の分散に反比例する重みだけでなく、距離に関係する重みに関しても検討する必要がある。

謝辞：解析用の空中写真撮影に当たっては、第十管区海上保安本部海洋情報部、鹿児島航空基地および名瀬海上保安部の職員諸氏のご協力を頂いた。ここに、紙面を借りて謝意を表させていただきます。また、現地標定点の測量時に、奄美市の（株）平良建設より測量機材の一部拝借させていただいた。紙面を借りて謝意を表させていただきます。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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，土木学会論文集，No. 687/Ⅲ-56，pp. 289-301，2001.
- 3) Foerstner W. and E. Guelch：A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centres of Circular Features, ISPRS Inter-commission Workshop, Interlaken, pp. 281-305, June 1987.
- 4) 服部進，秋本圭一，小野徹，井本治孝：Foerstner 演算子による立体画像のコーナー検出について，日本写真測量学会年次学術講演会発表論文集，pp. 65-68，2004.
- 5) 北原敏雄，山口和美：沿岸海域での写真利用について，APA，NO. 3，pp. 432-446，1977.
- 6) 黒澤辰昭・田中 仁：空中写真による海浜汀線形状の判読に関する研究，海岸工学論文集，第48巻（1），pp. 586-590，2001.
- 7) 日本写真測量学会：解析写真測量，日本写真測量学会，1983.