

沿岸域測量の高精度化・詳細化に関する基礎的研究  
**Fundamental Research on the Development of Photogrammetric Survey  
in a Sub-Aquatic Region**

2008年3月

田中 龍児

## 要 旨

本論文は、陸上測量と海洋測量の境界領域で測量・測深が最も困難な沿岸域において測量・測深の高精度化・詳細化に関して行った基礎的研究である。沿岸域測量・測深に適用可能と思われる様々な手法に関して検証を行った後、沿岸域の研究者や技術者の誰でも使用可能と思われる市販の高分解能デジタルカメラを用いて斜め写真を撮影し、これらの斜め写真を立体化して空間座標を確定する写真測量・測深システムの開発を試みた結果についてまとめたものである。

第1章は、極浅海域の地形特性と、そこで用いられている浅海域の測深法に関する検討結果を概略した。

第2章は、沿岸域の測量・測深業務に応用可能な測量方法について、文献調査だけでなく、測量結果を含めて検討した。そして、本論文の目的に対しては、斜め写真測量・測深を用いるべきことが提唱された。

第3章は、写真測量の現状および一般的な写真測量の原理と方法について述べる。さらに本論文では通常の写真測量法では適用し難い沿岸域の海底地形の把握を目的の一つとしているために、空気および海水という二つの媒質を経由する斜め写真測量の原理を誘導し、かつ自動化処理のためのアルゴリズムの開発を行った。

第4章は、第3章で開発された斜め写真による浅海域写真測量の応用として、(1) 太平洋に面する鹿児島県笠利町土盛海岸の深浅測深が困難なサンゴ礁海域に標定点を設置した場合と、(2) 東シナ海に面する沖縄県石垣島吉原海岸の対象海域に標定点を設置しない場合について、それぞれ深浅図（等深図）を作成し、海底地形特性の考察および測深精度の考察を行った。

第5章は、本論文「沿岸域測量の高精度化・詳細化に関する基礎的研究」に関するまとめを行った。

## キーワード

浅海域, デジタルカメラ, バンドル調整, 空中写真測量, レーザーデータ

## Abstract

Sub-aquatic regions such as energetic surf zone, coral reef, tidal flat, inlet, rocky cliff coast, and sea grass field are difficult to apply with general survey techniques. This is because sub-aquatic regions are too deep and rough to conduct a human survey while too shallow to carry out a ship (sounding) survey. However, nearshore management and assessment such as water quality control, ecosystem protection, shoreline protection, and navigation definitely require bathymetry data. In general, detailed land and aerial surveys have been conducted by Japan Geological Survey, and offshore and navigation hydrographic surveys by Japan Coast Guard. These sub-aquatic regions are considered to be transition zones for both agencies and somehow there are a lot of them. Therefore, practical techniques for sub-aquatic survey need to be developed as soon as possible.

A digital still camera with 6 to 8 mega pixels is commercially available nowadays and has been commonly applied to image sensing for scientific analysis. In addition, recently developed digital cameras have higher resolutions as much as 12 mega pixels. These cameras would be applicable to aerial photogrammetry. However, an aerial photography processing for survey purpose has not been standardized especially for sub-aquatic region for which normal land survey techniques have been the usual method.

Therefore, mathematical transformation of photogrammetric data and practical algorithm to generate (x, y, z) special data are developed. The Bundle adjustment is also applied to a set of obliquely snap-shot digital aerial photographs for obtaining (x, y, z) data to generate hydrographic bathymetry. It is revealed that reasonable accuracy is obtained if the digital point for survey exists inside a benchmarked area or study area. The resolution would be better if any benchmarks (targets) can be placed on either sea bottom or water surface.

The developed techniques are applied to Tomori coast where no benchmarks (reference points) are available inside the sub-aquatic coral zone, and in Yoshiwara coast where benchmarks (reference points) are replaced by the aerial laser survey data. The order of accuracy is still nearly 50 cm. The resulting bathymetry maps show typical character of real coral reef topography although there are some inconsistencies. Thus, in general the method can probably be applied to nearshore survey although it needs further development.

### Key Words :

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

# 目次

<b>第1章 序論</b> .....	1
1.1 極浅海域の地形特性 .....	1
1.2 浅海域の測深法の研究と背景 .....	8
1.3 本論文の構成 .....	10
<b>第2章 既往の沿岸域測量法</b> .....	12
2.1 一般的な沿岸域測量方式 .....	12
2.2 基準点測量 .....	13
2.2.1 多角網厳密平均の計算式 .....	13
2.2.2 多角網厳密平均プログラムについて .....	21
2.3 水準測量による横断測量 .....	28
2.4 平板測量 .....	29
2.4.1 平板測量による地形測量に用いる計算式 .....	31
2.4.2 地形測量の方法（直接観測法） .....	33
2.4.3 平板測量による地形測量実測 .....	35
2.5 VRS-GPS 方式による地形測量 .....	36
2.6 沿岸域測量法の考察 .....	39
<b>第3章 写真測量による沿岸域測量システム開発</b> .....	42
3.1 写真測量の既往の研究 .....	42
3.2 一般的な空中写真測量の作業工程 .....	45
3.3 三次元座標測定の原理 .....	46
3.4 外部標定と内部標定 .....	47
3.4.1 外部標定 .....	47
3.4.2 内部標定 .....	48
3.5 大気屈折の補正 .....	57
3.6 バンドル調整法 .....	58
3.6.1 バンドル調整法の原理 .....	58

3.6.2	観測方程式	63
3.6.3	観測方程式の行列表現	65
3.6.4	正規方程式	68
3.7	斜め写真による写真測量	70
3.7.1	斜め写真のバンドル調整法	71
3.7.2	相互標定	71
3.7.3	モデル座標の計算	74
3.7.4	絶対標定	75
3.7.5	射影変換式による外部標定要素の初期値の計算	79
3.7.6	改良型バンドル調整法のプログラミングについて	81
<b>第4章</b>	<b>写真測量による沿岸域測量システムの有効性の検証</b>	<b>87</b>
4.1	内部標定と外部標定	87
4.2	陸域の現地基準点データがある場合の写真測量	90
4.2.1	現地調査	90
4.2.2	データ解析	90
4.2.3	図化	94
4.2.4	考察	95
4.3	陸域の現地基準点データが無い場合の写真測量	96
4.3.1	現地調査	96
4.3.2	データ解析	96
4.3.3	図化	98
4.3.4	考察	100
<b>第5章</b>	<b>結論</b>	<b>102</b>
	謝辞	104
	付録	105

## 第1章 序論

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。本研究の目的は、とりわけ沿岸域測量の高精度かつ効率的な手法を確立することであるが、ここで言及する沿岸域とは、陸側は砂丘や海食崖から始まり、海側は水深10m程度か深くても約50m水深までの領域をさす。本章では、まず極浅海域の地形特性について述べ(1.1節)、背景となる浅海域測深法の変遷と現状について述べ(1.2節)、最後に本論文の構成について述べる(1.3節)。

### 1.1 極浅海域の地形特性

海岸の平面地形は波浪侵食海岸と漂砂堆積海岸の二つに大別することができる(樫木, 1982)。海に面した山地や台地の前面で波食作用によってできた崖である海食崖は、固結した岩石が侵食作用を受けている海岸で、一般に底質供給源として働き、底質が再び堆積することのない非可逆性の侵食海岸である。一方、砂礫海岸は海蝕崖や河川から供給される土砂が、波や潮流の影響を受けて形成される地形であるため、土砂供給量や波浪・潮流の影響を受け、海浜の砂礫が波の軌道粒子速度に伴い常に前後に移動しており、台風や大しけで大きな波が作用すると汀線付近の砂礫は碎波点近くに移動し(海浜侵食)、その後の穏やかな波の期間に沖合に移動した砂が再び汀線付近に戻ってくる(堆積)可逆性の海岸である。このような海岸地形は、それぞれ侵食型海浜(冬型海浜、バー型海浜)、堆積型海浜(夏型海浜、バーム型海浜)と呼ばれる。また、潮汐差がある程度あり入射波浪も小さな海域では干潟が形成されやすく、堆積と侵食の度合いも小さい。

我が国の太平洋沿岸では、台風や冬季の季節風の時期に侵食が生じ、その他の時期に海浜の回復(堆積)が生じ、日本海側では主に冬季に侵食が生じる。つまり砂浜は、打ち寄せる波とともに姿を変え、さらに自律的に元の姿に回復する。しかし、暴浪波が作用すると、深い領域の地形変化は完全には元に戻らない非可逆的な現象がみられる(山本・鳥居, 2005)。波の作用により海岸が侵食型になるか、それとも堆積型になるかは、海浜地形分類指標を用い大まかな予測が可能である。この予知モデルは、Johnson (1949)による波形勾配に基づいたものから、砂村(2000)による波形勾配、海底勾配、波長粒径比に基づいたものや、Dean (1973)による沈降速度に基づいたものなど各種の予知モデルが提

案されている。これらの予知モデルは、もともと海岸地形が侵食型になるのか堆積型になるのか予測するものであった。その後、渡辺らは砂村らの予知モデルに基づき、砕波帯近傍で海底面の底質が岸沖のどちらに移動するかを局所的に予測する方向関数を誘導し、3次元海浜変形モデルに取り込んだ。このような沖向き一岸向きの砂移動以外にも、海岸に人工構造物が設置された場合や、沖で海底が掘削される場合にも特有の砂移動が生じる。

ところで、海岸の縦断形状は図-1.1に示すように、ある種の平衡海浜形状で近似できる。この平衡海浜断面形状に関しては、数種類の数式的表現が提案されている。現状ではBrunn (1954)により提案され、その後、Dean (1977, 1991)により米国東海岸およびメキシコ湾岸の海岸地形で確認され、かつ浅海域での砕波による波エネルギー減衰に基づいて数式的理論付けが行われた以下の表現がよく用いられる。

$$h = Ay^{2/3} \quad (1.1)$$

ただし、

$h$  : 水深,  $y$  : 汀線からの離岸距離,  $A$  : 底質粒径により決まる定数

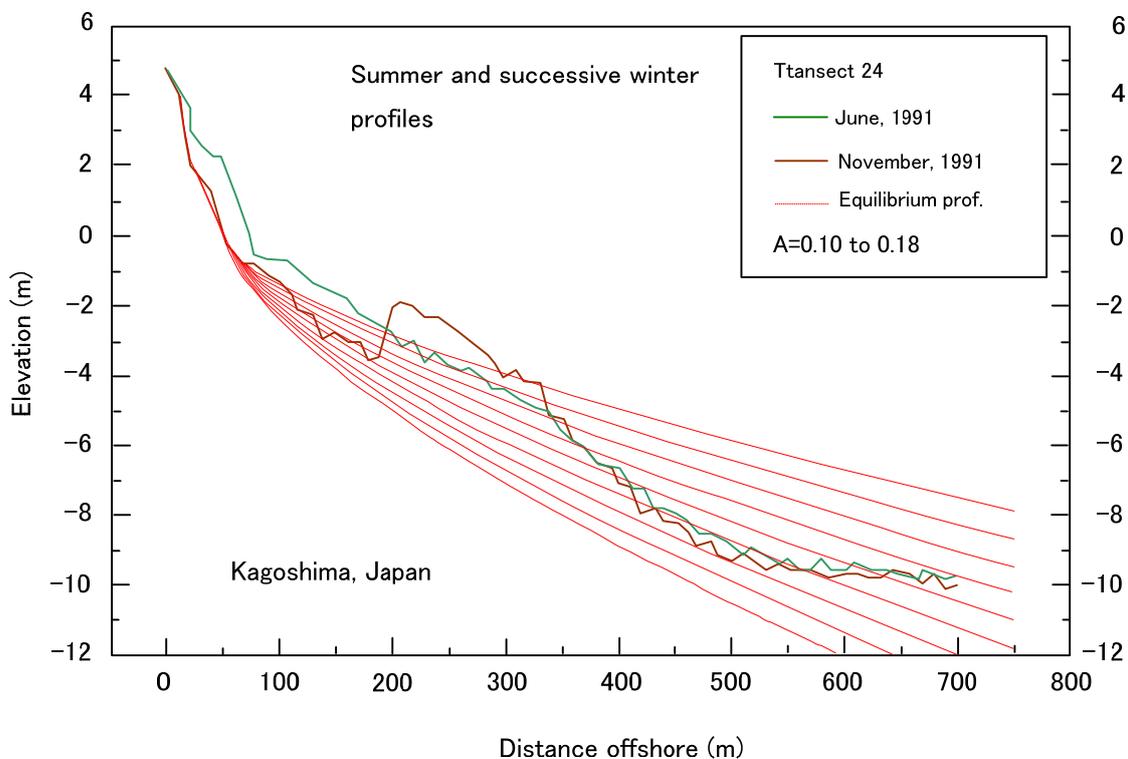


図-1.1 海岸縦断地形の季節変動と平衡海浜断面形状(柏原海岸) (西, 2003 参照)

Dean (1973)によれば平均的な砕波点より内側、あるいは最大でも地形変化の限界水深より陸側の平均地形の表現に上式が適用できる。よって、この限界を超えて沖側に適用する理論的な裏づけがないことに留意する必要がある。また、この平衡海浜断面形状の概念は、非常に有効であり多くの解析に用いられている。この断面形状へと安定化するのに要する時間スケールは、未だ不明確である。平衡海浜断面の概念は、例えば長くても数日程度しか継続しない高潮による海浜侵食の予測計算や、もっと長い数十～数百年間に渡る海水準上昇に伴う砂浜の減少予測にも用いられる。しかし、どの時間スケールに対応しているかに関する現実的な研究は今のところなく、Bruun (1954)により、高潮などの短期間の水位上昇に伴う現象に平衡断面形状の概念を用いるのは不適切であるという意見もある。一方、Dean (1973)による平衡海浜断面形状の誘導に基づけば、数日間程度のタイムスケールでこの平衡海浜断面形状が得られることにもなる。

海岸を構成する底質が、波などの流体力を受けて移動した結果としての現在の海岸地形が存在するが、この海岸地形は過去から未来にかけて常に変化している。陸地と海洋の平均的境界としての汀線は、外洋の平均水位や波によるセットアップ、さらには潮汐変動により一点に固定されているわけではない。最大水深約 200m の鹿児島湾では夏季と冬季の海水の熱膨張の影響で、季節的に平均水位が 20cm 程度変動するので、鹿児島湾内の平均前浜勾配を 1/30 と仮定すると、この水位変動に対応した汀線変動が約 6mあることになる。また、汀線位置は、季節的な入射波浪の大きさの変動により年間に数十m変動することもある。つまり海岸には固定化された汀線や砂浜があるわけではなく、常に変動していること、言い換えれば砂浜を構成する砂は常に流れている(運動している)事を認識する必要がある。季節的な波(海象)変動による前浜付近の地形変化の歴史的な計測例として、Bascom (1951)により得られたデータを図-1.2 に示す。図中では、いったん侵食された前浜も再び回復し、これに対応し汀線位置も前後に移動していることが分かる。このように、自然状態では海岸の境界線は固定したものではなく、ある種の変動幅を持つゾーンとして認識する必要がある。海岸管理・保全上も、汀線・海岸線が固定した境界線でないことを勘案した計画を立てにくいことが我が国の海岸保全の欠点とも言える。

水深は沖へ徐々に増加し、その結果、海底面に作用する波の力が小さくなる。これに対応して、海底面の底質は徐々に細かくなることが知られている。一例として、薩摩半島先端の長崎鼻付近の測線(a),(b),(c)上で岸沖方向の底質サンプリングを行い中央粒径の分布を調べた結果を、図-1.3 に示す。巨視的には、各測線ともそれぞれ D.L.= -1.0~-2.0m に中央粒径のピークがあり、各側線で 2.3mm, 1.95mm, そして、1.18mm となっている。また、D.L.= -3.0m 以深で海浜勾配が 1/40 になっている海底部では、平均粒径(D50)が急激に小さくなり、しかも水深によらずほぼ 0.6mm 程度の粒径

となっている。一般的には、沖合での底質粒径は 0.2mm 程度になっていることが多い。

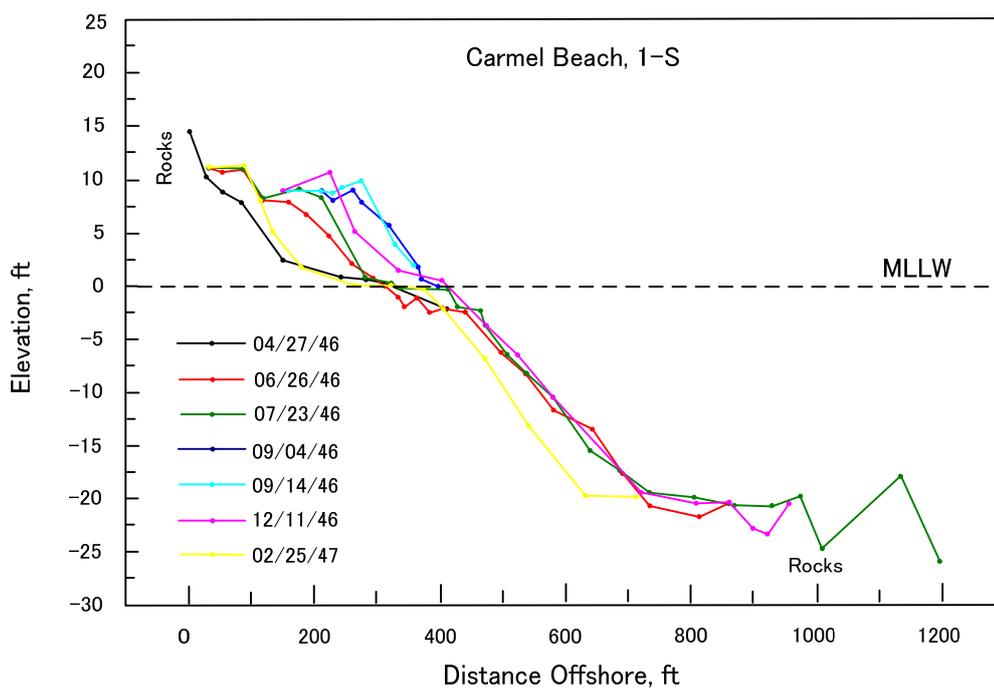


図-1.2 カリフォルニア州カーメルビーチの前浜の地形変化 (Bascom, 1951 参照)

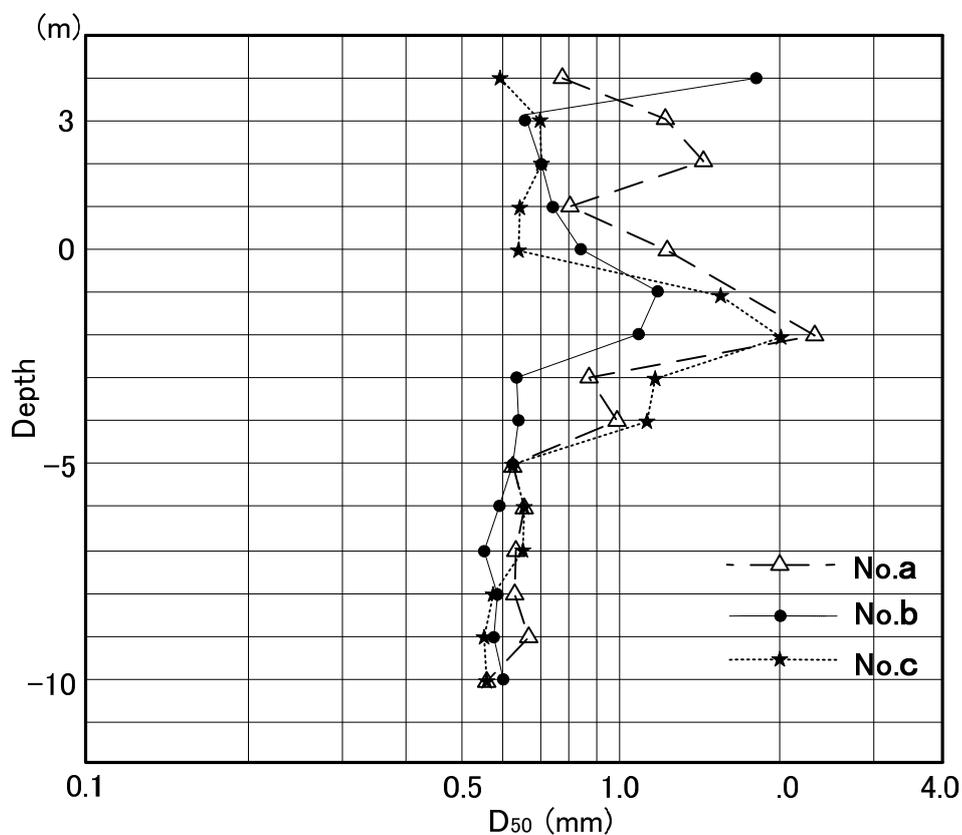


図-1.3 岸沖方向の底質粒径分布(縦軸は水深 m, 横軸が粒径) (西, 2003 参照)

海岸地形は、写真-1.1 に示すように沿岸方向に必ずしも一様でなく、3次元的な特性を持っている。沿岸方向に一様でない海岸地形が生じる原因は、自然要因によるものと、海岸構造物等の人工的な要因によるものがある。メガカスプ・ジャイアントカスプ・ビーチカスプ(写真-1.2)と呼ばれる沿岸方向の波状地形が、最も代表的な自然の3次元的な海底地形である。一方、人工構造物の影響で形成された3次元的な海浜地形は、隣接海浜に侵食などの影響が拡大し、地形変化が長期間継続する場合がある。現状における我が国の海岸侵食の問題の多くは、漁港・港湾・離岸堤・突堤などの人工の海岸構造物に起因した問題と考えられる。一例として、人工構造物(人工リーフ：潜堤)により形成された3次元的な海底地形変化として、本土最南端の長崎鼻海岸における人工リーフ設置前の1989年の深浅図と、設置後の1996年9月の深浅図をそれぞれ図-1.4、図-1.5に示す。1996年5月、この海岸では村石岬側に人工リーフが1基暫定施工された。人工リーフは天端高がT.P.-1.5m、天端幅が20m、沿岸方向の長さが200mであって、水深約-6mに設置された。まず、図-1.4によれば、前浜から-4m付近までの等深線は非常に密集しており、これらの等深線には一体的な移動が見られる。台風来襲後の図-1.5によれば、人工リーフの背後では-6mまでの等深線が前進し、その東側では局所的な後退も見られる。さらに、人工リーフの背後だけでなく、人工リーフと村石岬の間の開口部も含めて、等深線が前進する一方、 $x=100\sim 800\text{m}$ の広い範囲でD.L.=0.0mの等深線が後退している。加えて、人工リーフ未着工区域沖合の、深さ-5mから-10mまでの岸沖漂砂による等深線の沖側移動に比べて、リーフ設置区域沖合での同等深線の沖側移動は顕著であり、沿岸漂砂によりリーフ設置区間に輸送された底質の内、細粒分がこの海域に運ばれて堆積したものと考えられる。以上の海浜変形の結果、人工リーフ背後域において汀線が18m前進し、中央部の侵食域では最大で約10m後退した。このように構造物を海域に設置すると、設置以前とは海底地形が異なるようになる。



写真-1.1 3次元性を持つ浅海域地形（西，2003 参照）



写真-1.2 ビーチカスプ(小規模波状汀線)の例（西，2003 参照）

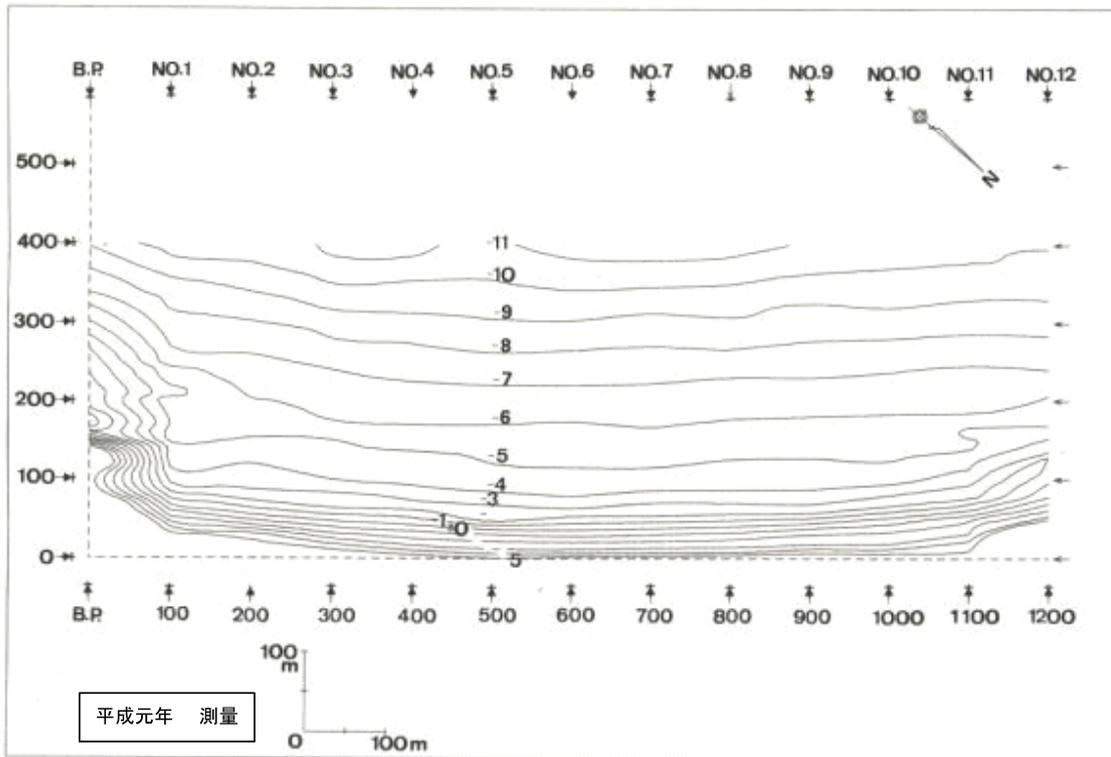


図-1.4 深浅図(1989年) (西, 2003 参照)

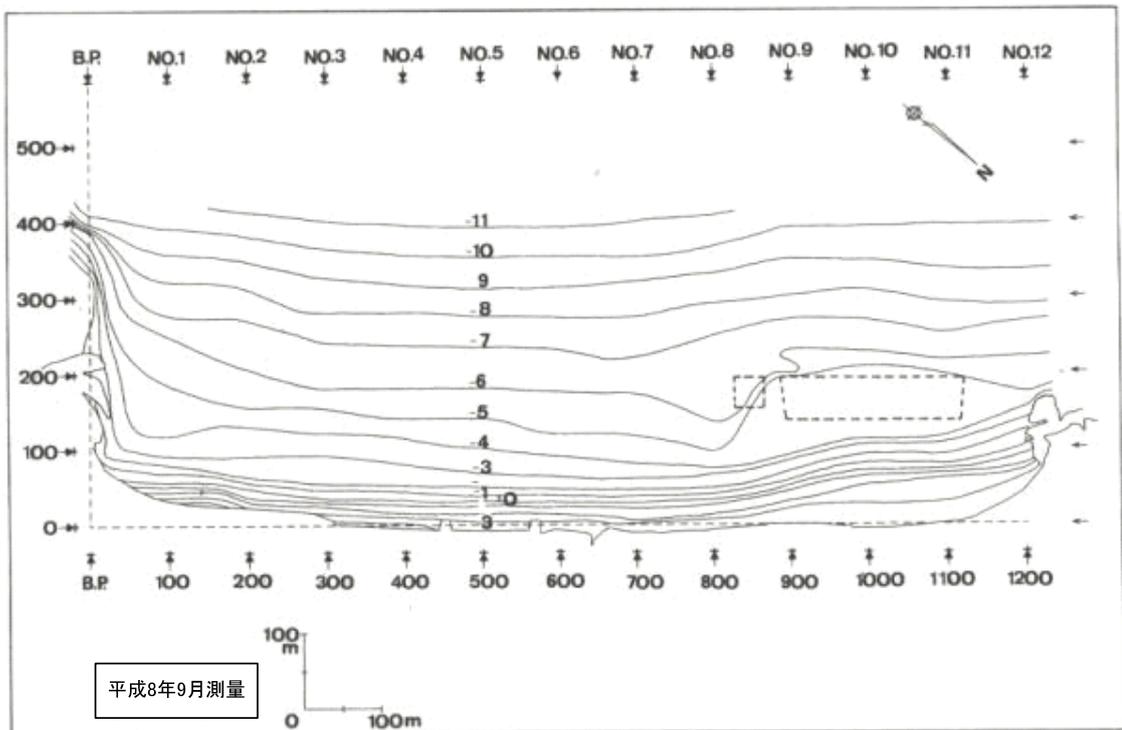


図-1.5 深浅図(1996年9月) (西, 2003 参照)

## 1.2 浅海域の測深法の研究と背景

海岸地形を把握するために、従来は水準測量と音響測深（シングルビーム）が用いられた。しかし現在は、ハイテク応用測量とも言われる、マルチビーム測深、サイドスキャンソナー測深、航空レーザー測量（測深）、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。従来の測量（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、一般に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する。したがって、本研究においては、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）手法として、民生用デジタルカメラを用いた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。まず、以下に浅海域測深法の概要を述べる。

### （1）音響測深

音響測深は船から発信された音波が、海底で反射されて戻ってくるまでの時間を測定することにより水深を測定するシステムである。音響測深機を使用して水深を正確に測る場合には、音響測深機の送受波器の位置の補正、潮汐の補正、海中の音速度の変化の補正、波浪の影響の補正、斜距離の補正などを行う必要がある。また音響測深は音波を送受信する方式によって、シングルビーム音響測深、多素子音響測深、マルチビーム音響測深がある。

### （2）サイドスキャンソナー測深

海底面探査は、サイドスキャンソナーまたはサイドルッキングソナーと呼ばれる機器を使用して海底表面の状況を調査する。海底面探査では曳航体またはフィッシュと呼ばれる送受信用のセンサーを船尾から海中に曳航し、センサーから左右方向に広く前後方向に狭い扇状の音波を海底に向けて発信する。そして海底面で後方散乱されて戻ってきた音波の強弱を記録することにより、海底の障害物や小さな起伏、あるいは底質の違いをあたかも写真で撮ったような画像として得ることができる。

### (3) 航空レーザー測深

航空機からレーザー光を発射して水深を測量する方法をレーザー測深という。レーザー測深では、通常、海面で反射する赤外レーザーと海底面で反射する緑レーザーを併用して、両者の反射時間の差から水深を測定する。航空機は高度500m程度を飛行し、発射されるレーザー光は機体の左右にスキャン（走査）されるため、航空機の直下の水深だけでなく左右に幅を持って多数の水深値が短時間に得られる。現在の技術で測深できる深さは海水のきれいな場所でも水深70m程度までであるとされている（図-1.6）。

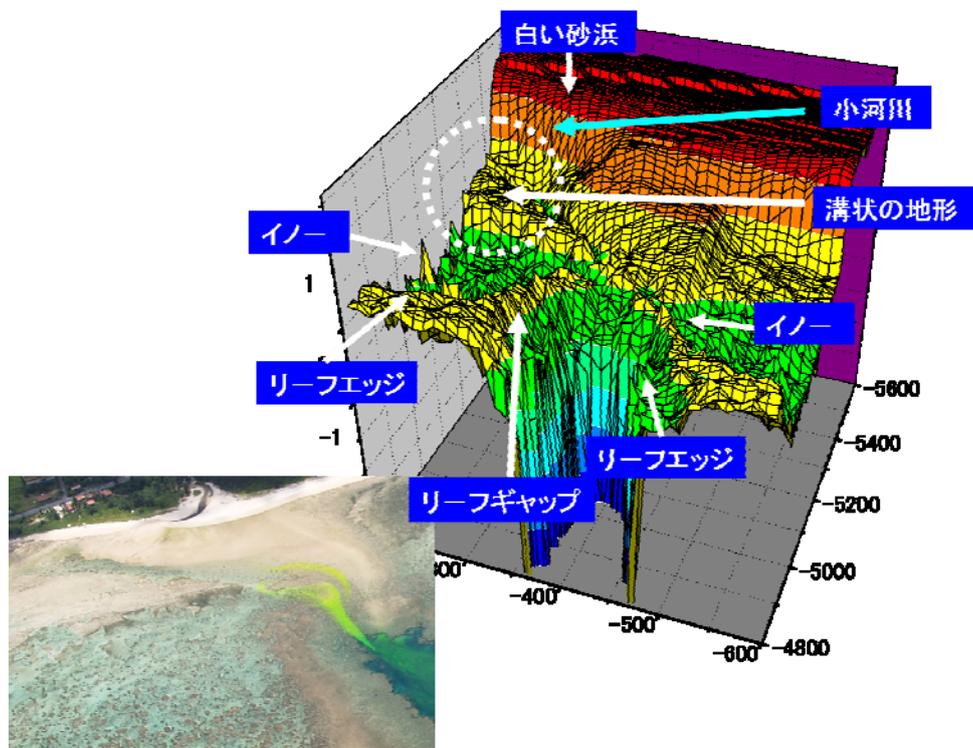


図-1.6 サンゴ礁海域のレーザー測深により作成された3-D図（海上保安庁提供）

### (4) レーザープロファイラー測量

レーザープロファイラーとは、航空機搭載の走査型レーザー測距儀である。POS（Position and Orientation System）を用いて航空機の位置と姿勢を測定し、それと航空機から照射したレーザーによる測距データを統合することで、地表面の形状を直接的にデジタルで測定することができる。

## (5) 空中写真測量

空中写真測量とは、空中写真を媒体として比較的広い範囲の土地情報を得たい場合に利用される測量方法である。撮影した写真画像から、地形の状況や変化を読み取り、図化機により平面図を作成するものである。従来はアナログ写真をそのまま用いていたが、現在ではアナログ写真を専用スキャナでスキャンし、デジタル化したものをデジタル図化機で図化处理する方法が一般的である。今後、デジタル航空カメラの開発が進み、直接デジタル写真が利用されるようになるだろう（石垣，2004）。

本研究では、民生用デジタルカメラで撮影された浅海域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。

## 1.3 本論文の構成

「沿岸域測量の高精度化・詳細化に関する基礎的研究」に関する本論文の構成は、以下に示すとおりである。

第1章では、極浅海域の地形特性について述べ、背景となる浅海域測深法の変遷と現状について述べた。

第2章では、まず沿岸域測量に応用可能な測量について検討し、本研究で写真測量を提案した理由について述べる。

第3章では、写真測量の基礎理論の解析を行い、特に本研究で開発した斜め写真の標定法のシステムの概要について述べる。

第4章では、斜め写真による浅海域写真測量の応用例として、標定点を設置した場合と、標定点を設置しない場合について考察する。

第5章では、本論文「沿岸域測量の高精度化・詳細化に関する基礎的研究」に関するまとめを行う。そして、最終的に本研究の結論を導くことにする。

## 参考文献

- 1) 榎木享：漂砂と海岸侵食，森北出版，pp.14-26，1982.
- 2) 山本幸次・鳥居謙一：海浜縦断面の可逆・非可逆的な変化過程に関する実験的研究，海岸工学論文集，第52巻，pp.491-495，2005.
- 3) Johnson, J. W. : Scale effects in hydraulic model involving wave motion, Trans. Am. Geophys. Union, Vol.30, pp.517-525, 1949.
- 4) 砂村継夫：海岸地形，土木学会海岸工学委員会編「海岸施設設計便覧」，土木学会，pp.119-124，2000.
- 5) Bruun, P. : Coast Erosion and the Development of Beach Profiles, U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No.44, 1954.
- 6) Dean, R.G. : Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts, Department of Civil Engineering, Ocean Engineering Report No.12, University of Delaware, January, 1977.
- 7) Dean, R.G. : Equilibrium Beach Profiles: Principles and Applications, J. Coastal Res., 7, 1, pp.53 -84, 1991.
- 8) Dean, R.G. : Heuristic Models of Sand Transport in the Surf Zone, Proc. Conf. Eng. Dynamics in the Surf Zone, Sydney, pp.208-214, 1973.
- 9) Bascom, W. N. : The relationship between sand size and beach-face slope, Am. Geophys. Union Trans., Vol.32, pp.866-874, 1951.
- 10) 西 隆一郎：沿岸域の海底地形と波・流れ—海と人と環境を守るために—，水路新技術講演集 第16巻，pp.53-70，2003年3月.
- 11) 石垣智明：デジタル航空カメラの導入と運用，APA No.87-4，pp.31-38，2004年9月.

## 第2章 既往の沿岸域測量法

本章では、一般的に行われている沿岸域測量の概要と、その中で行われる測量作業である基準点測量、平板測量、そして最新の測量技術であるVRS-GPS（仮想基準点方式による汎地球測位システム：Virtual Reference Station Global Positioning System）による地形測量について述べ、それらの測量手法の問題点を踏まえ、沿岸域測量に適する測量手法を提案する。

### 2.1 一般的な沿岸域測量方式

沿岸域測量には、その目的により、いろいろな測量手法が用いられているが、海岸の保全、海浜の経年変化、季節変化、台風時など特殊な気象・海象条件における汀線の変動を調査する測量は、海浜測量・汀線測量といい、測量の範囲は、図-2.1に示すとおり、通常、汀線より外浜へ10m、後浜は海岸線から100m程度である。

測量の方法は、ほぼ海岸線に平行に、50mあるいは20mの間隔の基準線を設け、それに直角方向に水準測量で高低差を測定し、横断面図を作成する。地形に変化が少ない場合は、横断面図から等高線の通過する位置を定め、これを平面図にプロットして等高線を描画する。変化点の多い地形では、中間の要所の標高を平板測量、またはTS（トータルステーション）により補測する。さらに、水深が人の背丈以上になると、標尺による水準測量は不可能となるので、音響測深機等を用いて水深の測定を行う。これを深浅測量というが、従来の直下水深測定による地形図では、測線付近以外は水深データがなく、その間は測量技術者の推測による補完となっている。そのため、断面図における経時変化などを検討する場合、地形変化が大きい部分については、十分な精度は得られなかった。これに対して、マルチビーム測深による水深データはデジタルデータであり、従来の平面図の表現だけでなく、立体表現図のような多彩な地形表現も可能となっている。

このように、一般的な沿岸域測量では、主として陸上では基準線設置や海域の調査に伴う船位測定に必要な基準点を沿岸部に設置するための基準点測量、横断方向の高低差を測定する水準測量、変化点の多い地形では平板測量あるいはTSによる補測が行われ、海上では音響測深機による水深測定が行われている。

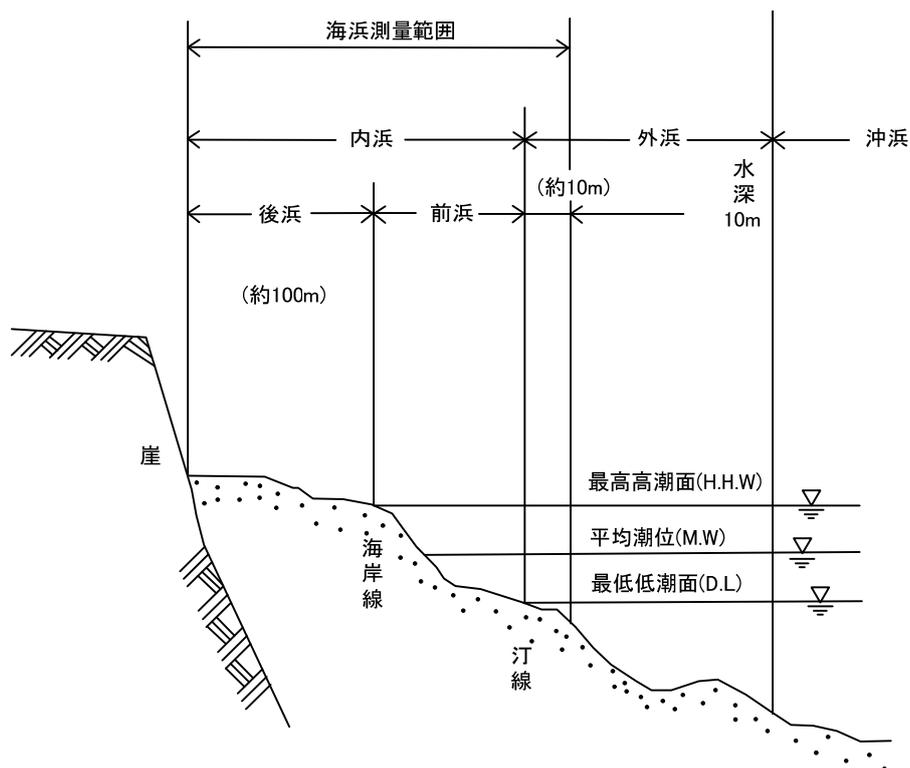


図-2.1 海浜測量範囲 (福永宗雄, 1991 参照)

## 2.2 基準点測量

基準点測量は、既知点に基づき基準点の位置を定める作業である。旧来は三角測量方式で行われていたが、近年はTSによる多角測量方式に変わり、さらに測量技術が進歩した現在では、人工衛星から出力される電波を使用して位置を求めるGPS測量も行われている。GPS測量は天候の影響を受けにくく、非常に高い精度で測定できるが、衛星の電波が受信できないような場所では使用できないという制限があるので、全てをGPSで行うのではなく、TSと併用することで、効率的に作業を行うことが必要である。なお、GPS測量の利用と精度の検証については、これまで数多くの研究がなされているので、詳細については他の研究や専門書にゆずり、ここでは、TSによる多角網厳密平均について述べる。

### 2.2.1 多角網厳密平均の計算式

多角網厳密平均は、GPSよりも古い技術ではあるが、理論的な面や計算処理の面で煩雑であることや、コンピュータの処理能力の問題 (田中, 1982) もあり、これまで沿岸域測量のような簡易測量においては、あまり用いられていない。しかし、測量が広範囲にわたる場合や複雑な地形では、単一路

線の簡易測量（結合・閉合多角測量）では，2次，3次と次数を増やさなければならなくなり，全体的な精度が不均一になる．このような場合に，多角網厳密平均計算を前提とした網を作成することにより，多角路線全体の次数の低下を抑えることが可能となり，精度の向上にも繋がると考えられる．また，コンピュータの発達により，その処理能力は十分対応できるようになっている．

多角網の厳密平均法には，観測値1個について1個の方程式を作る観測方程式法と，観測値の間に成立する図形上の条件方程式を作る条件方程式法があるが，条件方程式法は条件式の作成に，図形の判断が必要であるため，コンピュータのプログラミングには不向きであり，現在ではほとんど観測方程式法がとられている．したがって，観測方程式法の計算式（国土交通省公共測量作業規程，2002 参照）と，それに基づいて作成したプログラムによる計算について述べる．

### (1) 水平角の観測方程式

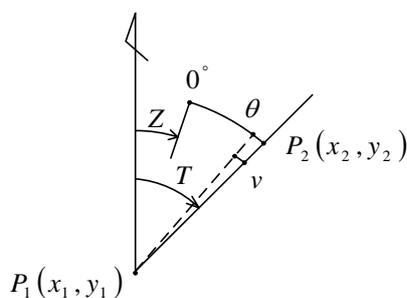


図-2.2 方向観測法と標定量

図-2.2において  $P_1, P_2$  の座標をそれぞれ  $P_1(x_1, y_1), P_2(x_2, y_2)$  とし，  $P_1$  から  $P_2$  の水平角を観測し，その観測値を  $\theta$ ，観測誤差を  $v$  とすれば，真の方向角  $T$  は式 (2.1) のようになる．

$$T = Z + \theta + v \quad (2.1)$$

ただし，  $Z$  は方向角への標定量である．

標定量  $Z$  は仮定値  $Z'$  と補正值（標定誤差）を  $dZ$  とすれば，式 (2.2) で示される．

$$Z = Z' + dZ \quad (2.2)$$

式 (2.2) を式 (2.1) に代入し、式 (2.3) の観測方程式が得られる。

$$v = -dZ - adx_1 - bdy_1 + adx_2 + bdy_2 + (T' - Z' - \theta) \quad (2.3)$$

ただし、

$$x_i = x'_i + dx_i, y_i = y'_i + dy_i$$

$(x'_i, y'_i)$  : 点  $P_i$  の仮定座標

$dx_i, dy_i$  : 座標の補正值

$$T' = \tan^{-1} \frac{y'_2 - y'_1}{x'_2 - x'_1}$$

$$a = \rho'' \frac{y'_2 - y'_1}{s'^2}$$

$$b = \rho'' \frac{x'_2 - x'_1}{s'^2}$$

$$\rho'' = \frac{648,000}{\pi}$$

(2) 距離の観測方程式

2点  $P_1(x_1, y_1)$ ,  $P_2(x_2, y_2)$  間の距離を測って観測値  $s$  を得て、誤差  $v_s$  が生じたものとすれば式 (2.4) が成立する。

$$S = s + v_s \quad (2.4)$$

また、 $P_1, P_2$  の座標値を用いると、距離  $S$  は、式 (2.5) で示される。

$$S = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (2.5)$$

上式を近似値  $s'$  と、その補正值  $\Delta s$  に分け、式 (2.6) のようにおく。

$$S = s' + \Delta s \quad (2.6)$$

式 (2.6) の右辺の  $s'$  と  $\Delta s$  は、それぞれ式 (2.7) と式 (2.8) で示される。

$$s' = \sqrt{(x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \Delta s &= \frac{\partial S}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial S}{\partial y_1} dy_1 + \frac{\partial S}{\partial x_2} dx_2 + \frac{\partial S}{\partial y_2} dy_2 \\ &= -\frac{x'_2 - x'_1}{s'} dx_1 - \frac{y'_2 - y'_1}{s'} dy_1 + \frac{x'_2 - x'_1}{s'} dx_2 + \frac{y'_2 - y'_1}{s'} dy_2 \\ &= -adx_1 - bdy_1 + adx_2 + bdy_2 \end{aligned} \quad (2.8)$$

式 (2.7) と式 (2.8) を式 (2.6) に代入すれば、式 (2.4) と等値であるから、式 (2.9) の距離の観測方程式が得られる。

$$v_s = -adx_1 - bdy_1 + adx_2 + bdy_2 + s' - s \quad (2.9)$$

多角網においては、角と辺という異質の観測値が混同しているため、式 (2.9) を角度秒に直した式 (2.10) を用いる。

$$v_s = -\frac{\rho''}{s} adx_1 - \frac{\rho''}{s} bdy_1 + \frac{\rho''}{s} adx_2 + \frac{\rho''}{s} bdy_2 + \frac{\rho''}{s} (s' - s) \quad (2.10)$$

さらに、角の観測の重みを 1 とし、距離には式 (2.11) の重み  $P_s$  を掛ける。

$$P_s = \frac{m_t^2 \cdot s^2}{(m_s^2 + \gamma^2 \cdot s^2) \rho''^2} \quad (2.11)$$

ただし、

$m_t$  : 1方向の角の標準偏差 (秒)

$m_s$  : 距離に関係しない標準偏差 ( $m$ )

$\gamma$  : 距離に比例する誤差の比例定数

(3) 水平角と距離の平均計算

式 (2.3) と式 (2.10) を行列表示すると, 式 (2.12) になる.

$$V = AX - L, \quad P \tag{2.12}$$

ただし,

$V$  : 残差のベクトル

$A$  : 計画行列

$X$  : 未知数のベクトル

$L$  : 定数項のベクトル

$P$  : 重みの行列

式 (2.12) に最小二乗法を適用して, 式 (2.13) の正規方程式が得られる.

$$NX = U \tag{2.13}$$

ただし,

$$N = A^T P A, \quad U = A^T P L$$

$A^T$  :  $A$  の転置行列

したがって, 解  $X$  は式 (2.14) で得られる.

$$X = N^{-1}U \tag{2.14}$$

ただし,  $N^{-1}$  は  $N$  の逆行列である.

単位重み当たりの観測値の標準偏差  $\sigma_0$  は, 式 (2.15) で計算する.

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{V^T P V}{m - (r + 2n)}} \quad (2.15)$$

ただし、 $\sigma_0$  は角度で表示し、

$V^T$  :  $V$  の転置ベクトル

$P$  : 観測値の重み行列

$m$  : 観測方程式の数

$r$  : 方向観測の組の数

$n$  : 新点の数

$X$  座標の標準偏差は、式 (2.16) で表される.

$$\sigma_x = \sigma_0 \sqrt{q_x} \quad (2.16)$$

$Y$  座標の標準偏差は、式 (2.17) で表される.

$$\sigma_y = \sigma_0 \sqrt{q_y} \quad (2.17)$$

したがって、座標の標準偏差は、式 (2.18) になる.

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (2.18)$$

ただし、 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_s$  は、長さの単位で表示し、 $q_x, q_y$  は、 $N^{-1}$  の対角要素である.

#### (4) 高度角の観測方程式

図-2.3に高度角の観測方程式の概念図を示す.

ただし、

$P_i$  : 平均計算で確定した測点

$H_i$  : 標高の最確値

$P'_i$  : 近似値による測点

- $H'_i$  : 近似標高
- $\Delta H_i$  : 近似標高に対する補正量
- $\alpha$  : 観測高低角

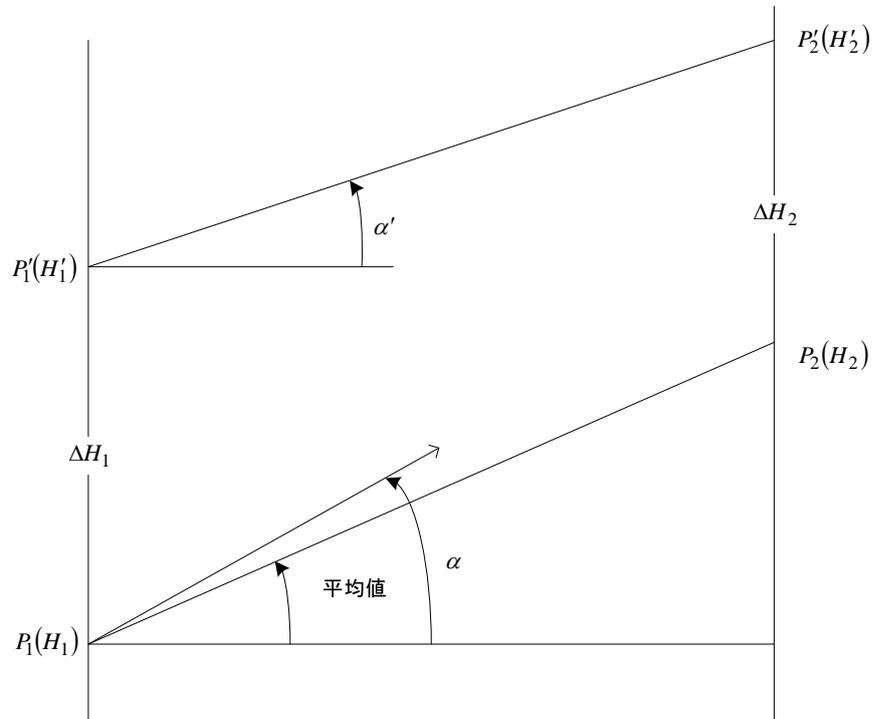


図-2.3 高度角の観測方程式の概念図

また,

- $\alpha_i$  :  $P_i$ 点における高低角
- $\alpha'$  : 近似標高により求めた高低角
- $\Delta\alpha$  :  $\alpha'$ の補正值
- $v$  : 高低角の残差
- $S$  : 基準面上の距離
- $R$  : 地球の平均曲率半径

とする.

したがって、観測高低角  $\alpha$ 、近似標高により求めた高低角  $\alpha'$  は、それぞれ、式 (2.19)、(2.20) で示される。

$$\alpha = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} \quad (2.19)$$

$$\alpha' = \tan^{-1} \left\{ \frac{H'_2 - H'_1}{S} \left[ 1 - \frac{H'_1 + H'_2}{2R} \right] \right\} \quad (2.20)$$

$\alpha$  を補正したものと、 $\alpha'$  を補正したものを式 (2.21) のように等値とおく.

$$\alpha + v = \alpha' + \Delta\alpha \quad (2.21)$$

さらに、式 (2.20) を線形化すれば、式 (2.22) の高度角の観測方程式が得られる.

$$v = -a_1 \Delta H_1 + a_2 \Delta H_2 + \alpha' - \alpha \quad (2.22)$$

ただし、

$$a_1 = \frac{\cos^2 \alpha'}{S} \left( 1 - \frac{H'_1}{R} \right) \rho''$$

$$a_2 = \frac{\cos^2 \alpha'}{S} \left( 1 - \frac{H'_2}{R} \right) \rho''$$

高度角の平均計算は、以下の手順で行う.

- 1) 観測方程式の行列は、式 (2.12) により求める.
- 2) 標準方程式の行列は、式 (2.13) により求める.
- 3) 解は、式 (2.14) により求める.
- 4) 標高の最確値  $H_i$  は、式 (2.23) により求める.

$$H_i = H'_i + \Delta H_i \quad (2.23)$$

- 5) 単位重み当たりの観測値の標準偏差  $\sigma_0$  は、式 (2.24) により求める.

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{V^T P V}{m - n}} \quad (2.24)$$

ただし,

$m$  : 観測方程式の数

$n$  : 新点の数

6) 標高の標準偏差  $\sigma_h$  は, 式 (2.25) で求める.

$$\sigma_h = \sigma_0 \sqrt{q} \quad (2.25)$$

ただし,

$q$  :  $N^{-1}$  の対角要素

### 2.2.2 多角網厳密平均プログラムについて

距離, 水平角そして高度角の平均計算は, 3次元網平均として同時に計算処理することも可能ではあるが, 実際の計算では, 距離と水平角は混合して計算を行い, 高度角の平均計算は単独で行う. 本研究で作成した水平 (XY) 網平均計算と, 高低 (H) 網平均計算のプログラムの流れを, それぞれ, 図-2.4, 図-2.5に示す.

なお, 入力するデータは, 閉合差をチェックしたものをを用いるが, その理由は観測データの精度が悪いと, いかにも複雑かつ高度な計算処理を施しても, 精度の良い結果は得られないからである. また, チェック計算の段階で概算座標が求められ, その値を求点の仮定座標として入力できるという利点もある. 仮定座標と計算後の座標差が1m以上あるときは, 計算後の座標を仮定座標として計算をやり直す.

図-2.6に示す多角網平均図にしたがって水平角, 高低角, 距離を観測した場合の, 入力データと計算結果の一部を図-2.7~図-2.10に示す.

図-2.7は, 水平 (XY) 網平均計算の入力データである. この中で, 1点1方向データは, 既知点の座標チェックを行うものであり, 既知点の精度が極端に悪い場合, その点をはずして平均計算を行う.

図-2.8は, 水平 (XY) 網平均計算の計算結果の一部である. 測量の精度は単位重量(重み)の標準偏差で判定できる.

図-2.9は、高低（H）網平均計算の入力データである。計算が煩雑になるので、器械高と目標高を同じにして観測する。

図-2.10は、高低（H）網平均計算の計算結果の一部である。測量の精度は、水平網平均計算と同じく、単位重量(重み)の標準偏差で判定できる。

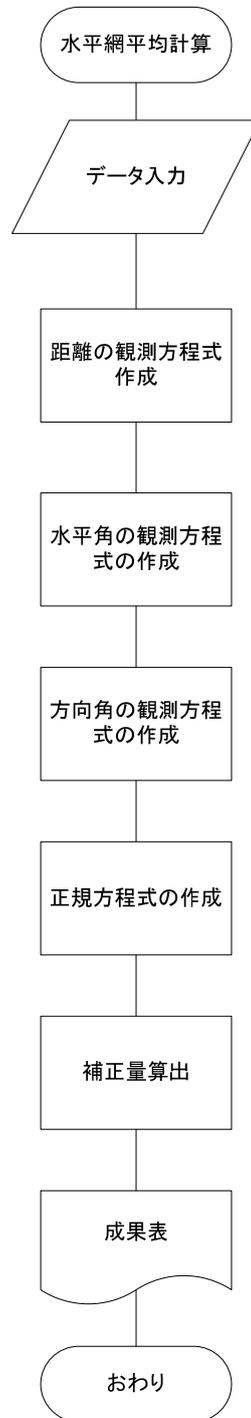


図-2.4 水平（XY）網平均計算のプログラムの流れ

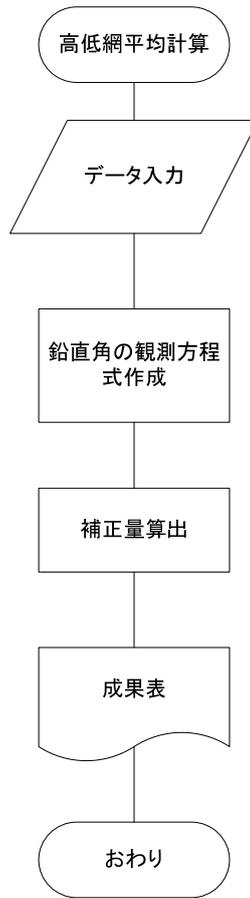


図-2.5 高低 (H) 網平均計算のプログラムの流れ

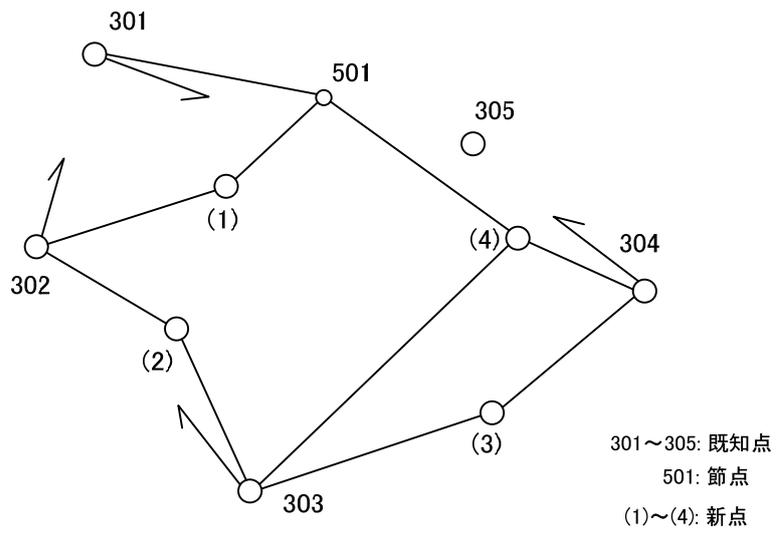


图-2.6 多角網平均図

XY NET WORK TEST DATA				
2				
1	-1 42387.63	-36800.62		} 新点近似座標(座標 計算結果を入力)
2	-1 43294.53	-37145.69		
3	-1 43632.74	-35631.94		
4	-1 42788.30	-35559.40		
501	-1 42138.55	-36542.55		
301	-1 41 870.14	-37398.78		} 既知点座標(成果 表より)
302	-1 4291 6.35	-38045.56		
303	-1 44105.00	-36726.74		
304	-1 42978.15	-34985.15		
305	-1 42595.37	-35766.13		
4.5	10	5		→ 計算に用いる重量
1	302	1352.67		} 距離(記簿の基準面 上の距離を入力)
1	501	358.70		
2	302	976.17		
2	303	91 2.43		
3	303	1192.41		
3	304	920.37		
4	303	1759.81		
4	304	604.89		
4	501	1178.52		
501	301	897.42		
301				} 水平角(記簿の中心の観 測角を入力)
305	0			
501	353271.7			
302				
301	0			
1	351 55.3			
2	81043.3			
303				
302	0			
2	20381.1			
4	89315.1			
3	114381.5			
304				
301	0			
3	289595.7			
4	353375.3			
1				
302	0			
501	159013.3			
2				
303	0			
302	140080.5			
3				
304	0			
303	202004.4			
4				
501	0			
304	164494.3			
303	278055.7			
501				
1	0			
301	61232.0			
4	257263.5			
0				
0	0	0	0	→ 1点1方向角データ

図-2.7 水平 (XY) 網平均計算入力データ

×Y網平均計算

(観測方程式)

世界測地系

平面直角座標系 2

XY NET WORK TEST DATA 地区

単位重量の標準偏差 2.39

重量計算の要素

”

cm

mt= 4.50 ms= 10.00 γ= 5.00

新点の計算結果

測点名	座標近似値 m	座標最確値 m	偏差(残差) m	標準偏差 m
1 ( )				
×	-142387.630	-142387.647	-0.017	0.021
Y	-36800.620	-36800.623	-0.003	0.036 0.042
2 ( )				
×	-143294.530	-143294.632	-0.102	0.017
Y	-37145.690	-37145.639	0.051	0.017 0.024
3 ( )				
×	-143632.740	-143632.766	-0.026	0.020
Y	-35631.940	-35631.959	-0.019	0.026 0.033
4 ( )				
×	-142788.300	-142788.347	-0.047	0.007
Y	-35559.400	-35559.407	-0.007	0.016 0.018
501 ( )				
×	-142138.550	-142138.576	-0.026	0.011
Y	-36542.550	-36542.549	0.001	0.022 0.025

図-2.8 水平(XY)網平均計算結果の一部

H NET WORK TEST DATA

2				
1	7.31			
2	7.35			
3	2.40			
4	14.54			
501	5.64			
301	78.34			
302	119.74			
303	55.43			
304	5.62			
301	(高度角)	(器械高)	(目標高)	(距離)
501	-043755	1.35	1.35	897.42
501				
301	043750	1.35	1.35	897.42
302				
1	-044525	1.35	1.35	1352.67
1				
302	044445	1.35	1.35	1352.67
302				
2	-063415	1.35	1.35	976.17
2				
302	063355	1.35	1.35	976.17
303				
2	-080080	1.12	1.12	910.48
2				
303	080080	1.35	1.35	910.48
303				
3	-023240	1.12	1.12	1191.18
3				
303	023220	1.35	1.35	1191.18
303				
4	-011955	1.12	1.12	1757.83
4				
303	011925	1.35	1.35	1757.83
304				
3	-001220	1.35	1.35	920.35
3				
304	001145	1.35	1.35	920.35
304				
4	005010	1.35	1.35	604.88
4				
304	-005035	1.35	1.35	604.88
501				
1	001450	1.35	1.35	358.70
1				
501	-001540	1.35	1.35	358.70
501				
4	002540	1.35	1.35	1178.52
4				
501	-002605	1.35	1.35	1178.52

図-2.9 高低 (H) 網平均計算入力データ

高低網平均計算  
(観測方程式)

世界測地系

H NET WORK TEST DATA 地区

単位重量の標準偏差 7.00

新点の計算結果

測点名	標高近似値 m	標高最確値 m	偏差 (残差) m	標準偏差 m
1 ( )	7.310	7.246	-0.064	0.024
2 ( )	7.350	7.347	-0.003	0.023
3 ( )	2.400	2.369	-0.031	0.025
4 ( )	14.540	14.489	-0.051	0.018
501 ( )	5.640	5.650	0.010	0.022

図-2.10 高低 (H) 網平均計算結果の一部

### 2.3 水準測量による横断測量

図-2.11にレベルによる横断測量の概念図を示す. 式 (2.26) は後視基準点より, 前視点の標高  $H$  を求める計算式である. なお, 測点間の距離については, 直接測量テープで測定する.

$$H = H_0 + b - f \quad (2.26)$$

ただし,

$f$  : 前視

$H_0$  : 後視点 (基準点) の標高

$b$  : 後視

$H$  : 等高線の標高

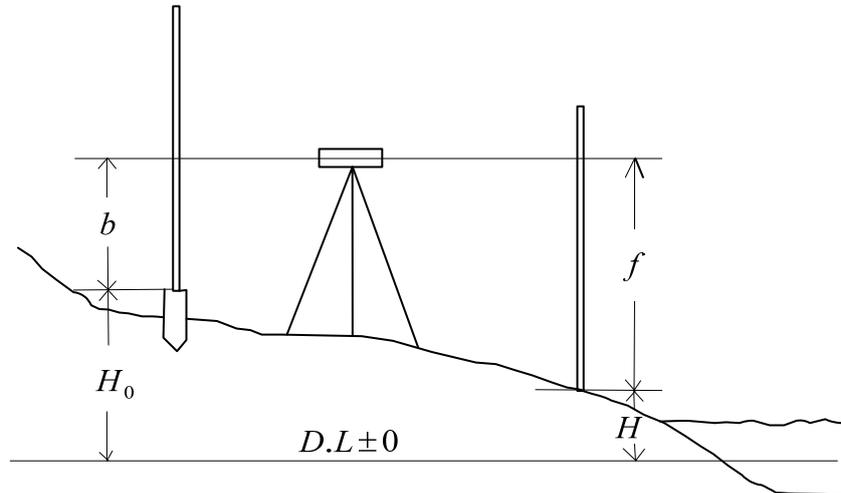


図-2.11 レベルによる横断測量

## 2.4 平板測量

平板測量は、平板又はTS、GPS等を用いて地形・地物を観測し、地形図又は平面図を作成する作業である。

TSあるいはGPSとパソコンを組み合わせた電子平板は、リアルタイムに作画・編集作業を行う事が可能となっており、作業時間が短縮されることや、作業者の熟練度による精度の差異があらわれないという利点があり、近年では電子平板が主流になっている。しかしながら、電子平板はメーカーにより操作法が異なり、まだ改良すべき点もあるので、ここでは従来の平板測量について述べる。図-2.12は、平板測量の工程図である。

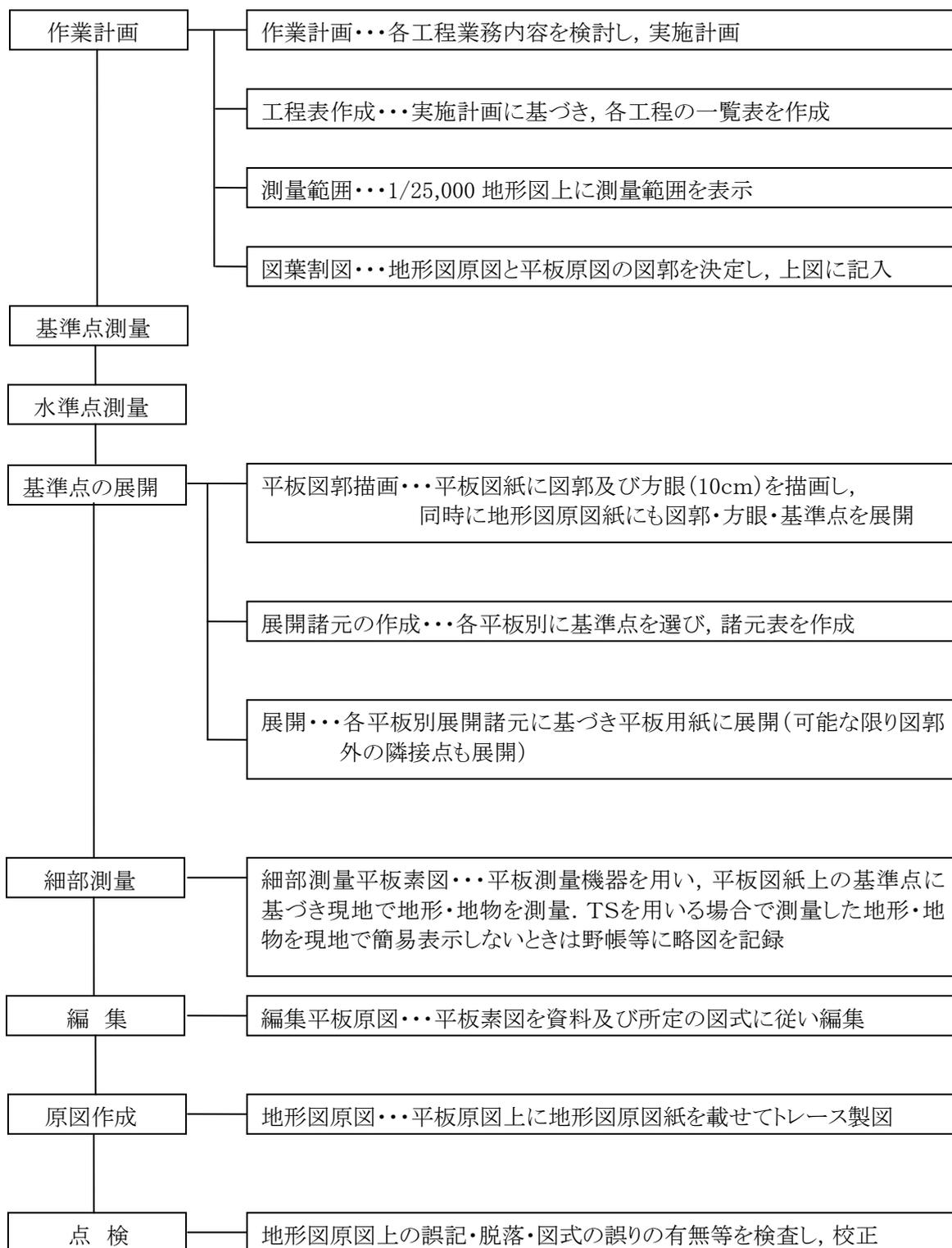


図-2.12 平板測量の工程図

## 2.4.1 平板測量による地形測量に用いる計算式

(1) 斜距離より水平距離を求める計算

図-2.13 より,

$$\theta = \tan^{-1} \frac{n}{100} \quad (2.27)$$

$$S = L \cos \theta \quad (2.28)$$

ただし,

- $L$  : 斜距離
- $S$  : 水平距離
- $\theta$  : 高度角
- $n$  : 分画

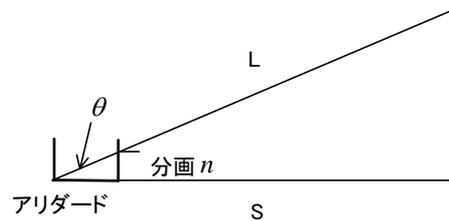


図-2.13 分画と斜距離・水平距離の関係

(2) 標高を求める計算

図-2.14 より, 直視準 (基準点に器械を設置し求点を観測) は, 式 (2.29) で示される.

$$H_p = H_0 + S \cdot \frac{n}{100} - (z - i) \quad (2.29)$$

また, 反視準 (求点に器械を設置し基準点を観測) の式は,  $n'$  を反視準の分画とすると, 式 (2.30)

で示される.

$$H_p = H_0 - S \cdot \frac{n'}{100} + (z - i) \quad (2.30)$$

ただし,

$H_0$  : 基準点の標高

$H_p$  : 求点の標高

$z$  : 測標高

$i$  : 器械高

平板点を求める場合は, 直視準と反視準で計算し, その平均を cm 位まで求めが, 標高点などの場合は, 直視準のみで良く, 10cm 位まで求める.

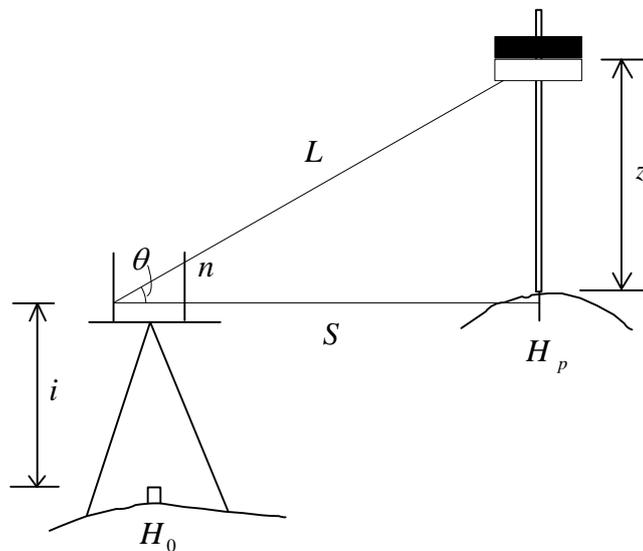
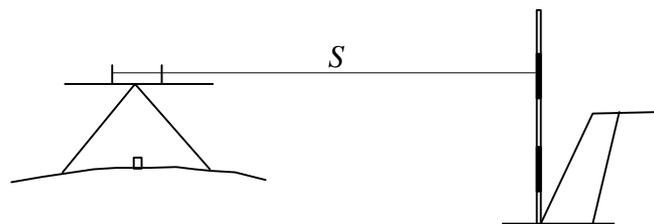


図-2.14 平板測量の標高計算

## 2.4.2 地形測量の方法（直接観測法）

### （1）地物の測定

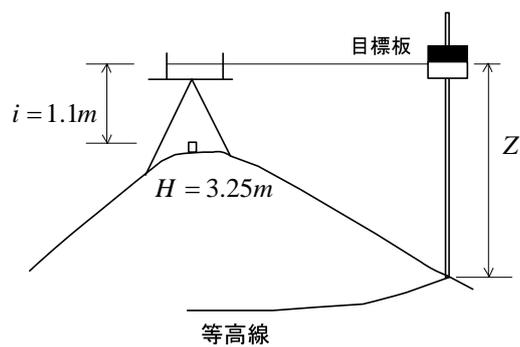
地物の測定方法を、**図-2.15**に示す。測定においては、まず骨格となる海岸構造物等の位置を、放射法により求め、水平距離  $S$  を測定しプロットする。プロットする場合は、2 mm ぐらいの単線を引き、その線上にプロットする。



**図-2.15** 平板測量による地物の測定

### （2）等高線を測定

**図-2.16**に平板測量による等高線の直接測定の方法を示す。



**図-2.16** 平板測量による等高線の測定

例えば、**図-2.16**の場合、目標板を取付ける高さは、次のようになる。

視準孔の標高は、 $H + i = 3.25 + 1.1 = 4.36 \text{ m}$  である。

したがって、

$Z = 1.36 \text{ m}$  にセットし、水平に視準すると、3mの等高線を測定できる。

さらに、

$Z = 2.36 \text{ m}$  にセットすると、2mの等高線が測定できる。

視準するときは、目標板の縦方向の幅が 20cm であるので、必ずしも目標板の中心を観測する必要はない。±10cm 程度は誤差の範囲内であるので、目標板が視準孔に入る程度で良い。

(3) 分派平板点 (平板点) を求める。

1/500 図作成の場合は、1 測点で測量する範囲は、隣接測点との中間まで (=25m) となっている。したがって、それ以上の距離を測量する場合は、隣接基準点に平板を移動するか、基準点がない場合は、平板点を設置しなければならない。なお、平板点から、次の平板点を設置することは、精度が悪くなるので、認められていない。

平板点は、平板測量により基準点を設置するのである。精度を落とさないようにするため、次の点に気をつける。

(i) 方向を観測するときは、図-2.17 のように、平板点の位置ばかりでなく、アリダードの前端、後端に短線を引き、反視準の場合の定位誤差を少なくするようにする。つまり、反視準では、その両端の短線にアリダードの定規縁を合わせて定位する。

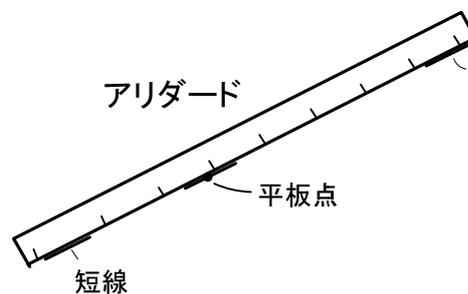


図-2.17 平板点の描示

(ii) 標高の測定は直視準と反視準の平均をとるが、その分画の読定値の較差が 0.1 分画より大きい場合は再測する。標高は cm 位まで求める。

(iii) 標高の測定の際は，外心桿を用いて気泡を中心に導いてから測定する．

#### 2.4.3 平板測量による地形測量実測

写真-2.1は，鹿児島県指宿市の海岸での測量風景である．測量区域は約6,000㎡の面積で，ゆるやかな勾配の砂れき地で比較的測量作業が容易な現場ではあるが，平板手，テープマン，ポールマンの3名で，図-2.18の地形測量に約3時間を要した．平板測量は器械そのものの構造がシンプルで軽量であるが，その操作には熟練が必要で，測量技術者の経験が，精度やスピードの面で差となってあらわれる．



写真-2.1 平板測量風景

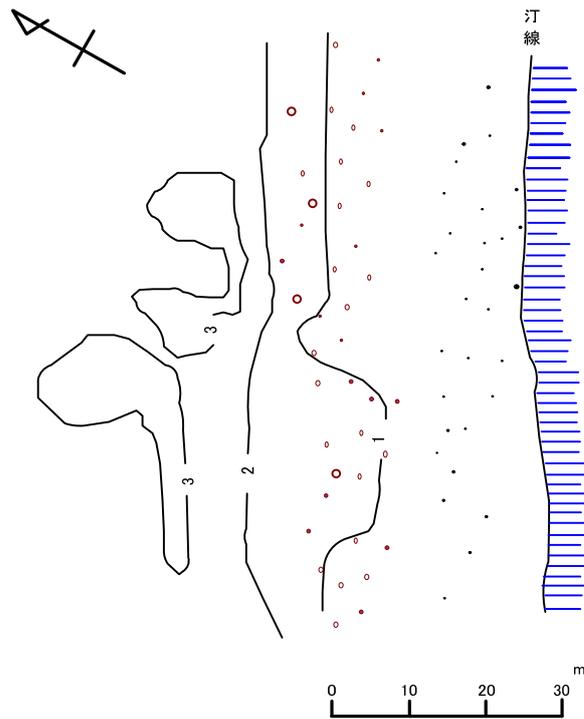


図-2.18 平板測量による地形測量図

## 2.5 VRS-GPS方式による地形測量

VRS-GPS方式とは、ネットワーク型RTK-GPS方式の観測方式の一種で、この方式はもともと、実時間型キネマティック測位を対象にした技術である。RTK-GPS方式は、基準となる観測点（固定点）と求点となる観測点（移動点）に設置したGPS測量機で同時にGPS衛星からの信号を受信し、固定点で取得した信号を、無線装置等を用いて移動点に転送し、移動点側において即時に基線解析を行うことで位置を決定する測量手法である。リアルタイムで高精度（現在は2～3cm程度）に位置決定が可能で、測量作業の効率が非常に高いというメリットがある。これに対してVRS-GPS方式は、あたかもその仮想基準点に受信機を設置し観測しているかのように、GPS受信機1台で24時間リアルタイムに高精度な測位が可能である。図-2.19にVRS-GPS方式の概念図を示す。

写真-2.2は、鹿児島県吹上浜でVRS-GPS方式により地形測量を実施した現場の風景である。測量区域の面積は約60,000㎡で、約330点の観測の所要時間は、約8時間であった。測点は、概ね5m間隔に取ったが、尾根や谷のような重要な地形の変化点や、その他必要だと思われる任意の箇所を測定した。また、見取り図に測量箇所を測点番号で明示し、かつ概略の地形を描きながら測定した。見取り図は等高線描画（間接測定）の際に必要となるものである。図-2.20は計測点で、図-2.21は計測された座

標に基づき，等高線を描画したものである．

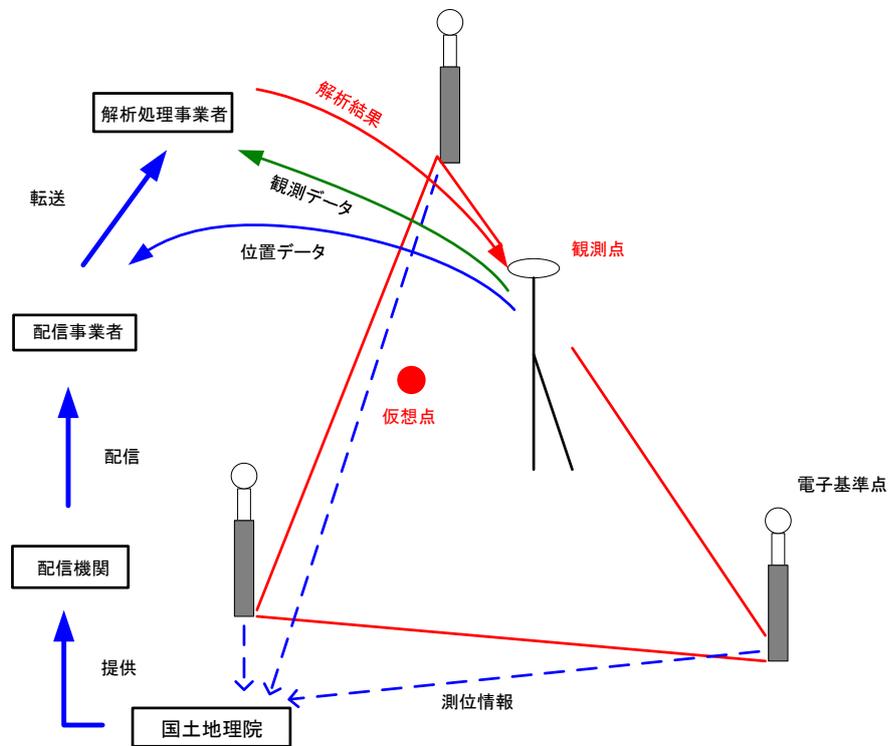


図-2.19 VRS-GPS方式の概念図



写真-2.2 VRS-GPS本体と測量現場



図-2.20 VRS-GPS測量による計測点

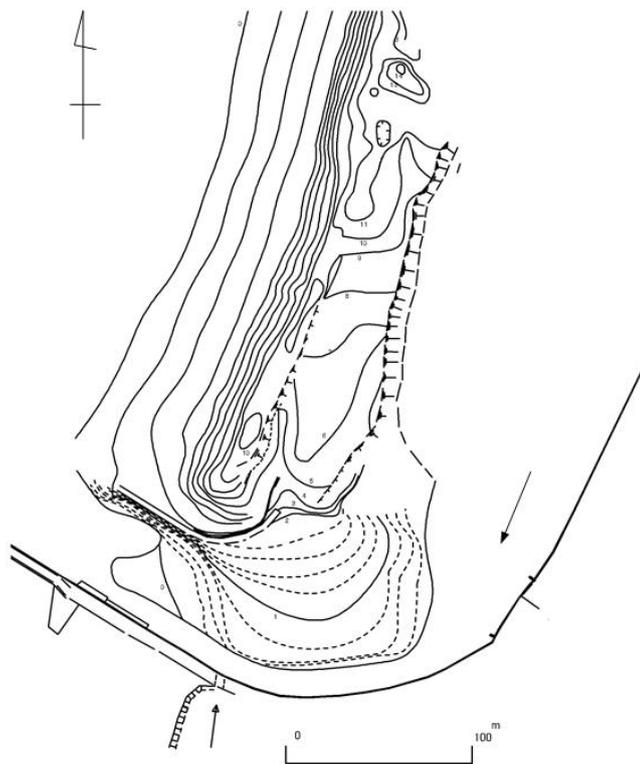


図-2.21 VRS-GPS測量データにより作成した地形図

## 2.6 沿岸域測量法の考察

2.1節から2.5節において、従来の沿岸域測量法について述べたが、以下にそれらの測量の問題点を整理し、その対処法について考察する。

### (1) 基準点測量

基準点測量は、地形測量の基準となる点を設置する測量であり、基準点測量の精度と配点密度が、後続の地形測量の精度と作業効率に大きく影響する。基準点測量の方法として、TSによる方法と、GPSによる方法がある。

TSによる方法は、観測点間の視通の確保が必要であり、多大な伐採を伴う場合がある。また、単一路線の簡易測量（結合・閉合多角測量）では、測点数が増えると、次数を増やさなければならなくなり、全体的な精度が低下する。したがって、測量区域が広範囲にわたる場合は、多角網厳密平均で行うべきである。

これに対して、GPS測量は、2.3節で述べたように天候の影響を受けにくく、非常に高い精度で測定できるが、衛星の電波が受信できないような場所では使用できないという制限があるので、全てをGPSで行うのではなく、TSと併用することで、効率的に作業を行うことが必要である。また、VRS-GPS方式で4級基準点（公共測量作業規程による基準点の区分）程度の基準点を設置することも可能である。ただし、この場合、電子基準点の配置の問題から、離島では使用できない。

### (2) 水準測量による横断測量

レベルを用いた横断測量は、作業も容易で、かつ精度も高い。標高を測定する最も有効かつ確実な方法である。VRS-GPSで観測することも可能ではあるが、電波状態により、観測できない時間や場所があり、海底での観測は高価な機械が水没する危険性もある。いずれの場合でも、水深が人間の背丈以上の深さの海底の測定は不可能であり、それ以上の水深では音響測深機を用いなければならない。また、測線間の地形は表現できないので、地形変化が複雑な場所では、TS、平板測量、あるいは、VRS-GPS測量等で補測しなければならない。

### (3) 平板測量による地形測量

平板測量は、器材が安価で軽量ではあるが、次のような短所がある。

- ・精度良くかつ、スムーズな測量作業ができるまで、熟練を要する。

- ・平板手，テープマン，ポールマンの3名が必要である。
- ・測量作業全般的に効率が悪い。したがって，狭い範囲の測量に限られる。
- ・測点を中心に，巻尺の届く範囲（30m～50m）の範囲しか測量できない。
- ・3D化するには，スキャナーやデジタルイザーで読取るなどの処理が必要である。
- ・海上の測量は不可能である。
- ・図紙を使用する関係上，天候の変化に影響されやすい。
- ・平面上に線で描画するため，線と線の間微地形の情報は失われる。
- ・色彩情報は付加されない。

#### （4）TSによる地形測量

TSはデータコレクタ（電子野帳）に座標データを保存できるので，そのまま，デジタルデータとして，後続作業に使用できる。また，測定距離は視通さえ取れば，ミラー（反射鏡）1素子で数百m以上の測定が可能である。ただし，次のような短所がある。

- ・TSは，観測者とミラーマンの少なくとも2人の作業者が必要。
- ・TSを設置する位置の座標を，予め視通を考えて観測しておく必要がある。
- ・1点ずつ計測しなければならないので，労力が多くかかる。
- ・得られるデータは点群情報であり，平板測量程度のデータ密度を得るのが限度である。
- ・海底地形の測量は不可能である。

#### （5）VRS-GPSによる地形測量

VRS-GPSは，1人で高精度観測ができるという長所はあるが，次のような短所がある。

- ・TSと同じく，1点ずつ計測しなければならないので，労力が多くかかる。
- ・TSと同じく，得られるデータは点群情報であり，平板測量程度のデータ密度を得るのが限度である。
- ・解析処理業者への手数料や携帯電話の通信料などのランニングコストが余計に必要である。
- ・衛星の配置や携帯電話の通信状態の悪い場所では，初期化に時間がかかる場合がある。
- ・衛星の配置等により，FIX解（位相バイアスが整数に固定された解）が得られない場合がある。
- ・離島では電子基準点数が少ないため，観測できない。
- ・海底地形の測量は不可能である。

以上のように、従来の地形測量における大きな問題点は、面的（微地形）データ取得に時間と労力がかかるということと、海底地形の測量が困難であるという点である。

本研究では、面的データの取得と、水深5m程度までの測深には、写真測量が適していると考える。しかしながら、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。そこで、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として、民生用デジタルカメラを用いた写真測量を提案する。

#### 参考文献

- 1) 福永宗雄：応用測量の実際，日本測量協会，pp. 479-584. 1991.
- 2) 田中龍児：マイコンによる X・Y 網同時平均プログラム，測量，pp. 33-35, 1982 年 3 月.
- 3) 国土交通省大臣官房技術調査課監修：国土交通省公共測量作業規程，pp. 7-112, 2002.

### 第3章 写真測量による沿岸域測量システム開発

写真測量は空中写真や地上写真を元に広範囲の地形図を作る測量であり、2次元の写真データより3次元の被写体形状を求める技術である。現在では、撮影されたフィルムベースの写真をスキャナでデジタル化し、コンピュータに取り込んで図化処理する方式がほとんどであるが、高分解能の航空機デジタルカメラを用いて地表面のデジタル画像データを取得することにより、図化とリモートセンシングデータ取得を同時に可能とする技術も開発されている。また、GPSによる位置測定と、IMU(Inertial Measurement Unit：慣性計測装置)による加速度・角速度測定により、撮影位置とカメラの傾きを直接算出するGPS/IMU手法(笹川・橋, 2002)が行われるようになってきており、従来の写真測量法がフルデジタル化へ向け大きく進歩しつつある。

しかしながら、撮影された写真を元に、3次元のデータを再現するという写真測量の原理そのものは変わっていない。本章では、まず写真測量の分野における既往の研究について述べ、次に一般的な写真測量の原理と方法について述べる。さらに本論文の中心テーマでもある斜め写真を用いた浅海域での測量への適用について述べる。これまで海底地形の空中写真撮影は透明度やハレーションの問題など陸上の写真測量と比べると克服しなければならない点が多く、写真測量で実施された例は少ない。

#### 3.1 写真測量の既往の研究

現代の写真測量は1911年にドイツのカール・ツァイス社が地上写真から等高線を効率的に作成する図化機(ステレオオートグラフ)を開発したことが始まりであり(水尾, 1985)、大別すると2つの分野に分類できる。1つは地上で行う地上写真測量の分野で、もう1つは航空機から撮影した空中写真を用いて地図を作成する一般の写真測量の分野である。

地上写真測量は、比較的近くの地形や人工物を精密に測量するもので、近接写真測量(Close Range Photogrammetry)と呼ばれる。1950年代から大型の計測用カメラを使った精密工業計測技術の開発が始まり、1970年代には船舶、航空機などの精密形状計測に適用された。(Mikhail, E. M., 1989; Fraser, C. S., 1990)その後、デジタルカメラとコンピュータが普及したことにより大型構造物の寸法形状測(Atkinson, K. B., 1996)に応用されるようになった。現状での計測精度は、代表寸法10mの物体に対し、条件によるが0.3~1.0mmという報告(秋本, 服部ら, 1998)がある。

一方、航空機から撮影する一般の写真測量は、空中写真測量に利用可能な図化機が登場したことにより、地図作成に利用され始めた。しかし、機械式図化機(アナログ図化機)(写真-3.1)を用いた

写真測量は、図化機や撮影カメラが非常に高価であり、一般的に利用できるものではなかった。また、図化機の機械的・光学的限界のために鉛直方向からの傾きが5~6度を超える斜め写真は利用できないという制限もあった。しかしながら、コンピュータの発達した現在では、ほとんどがデジタル写真測量となっており、アナログ写真を高精度の写真測量用スキャナ（写真-3.2）でスキャンして得たデジタル画像をデジタル図化機に取り込み画像処理されるようになっている。デジタル図化機は、当初ワークステーションを使用していたが、最近では解析写真測量のソフトをPCにインストールして解析的に処理できるステレオ図化機（写真-3.3）となっている。また、撮影カメラについては、1,000m以上の飛行高度で撮影するため、従来は、その解像度の点から汎用の小型カメラ（non-metric close-range camera）での利用は非常に難しく、専用カメラで撮影された写真の利用がほぼ必須となっていた。しかし、高精度のデジタルカメラの開発により、小型のデジタルカメラとステレオ図化機の組み合わせによる写真測量が可能となっている。

沿岸域測量への空中写真の適用例は、植生などの判読に利用される（嘉数ら，2002）ことはあるが、沖縄海域における深淺測量（大田・高津，1987）や海底地形の図化（中村，1982）など数例しか見当たらない。また、斜め写真による研究は、内挿を用いたデジタル画像処理により正射写真画像を作成した例（松岡，1978）に見られるものの、海底地形測量に応用した例はほとんどない。

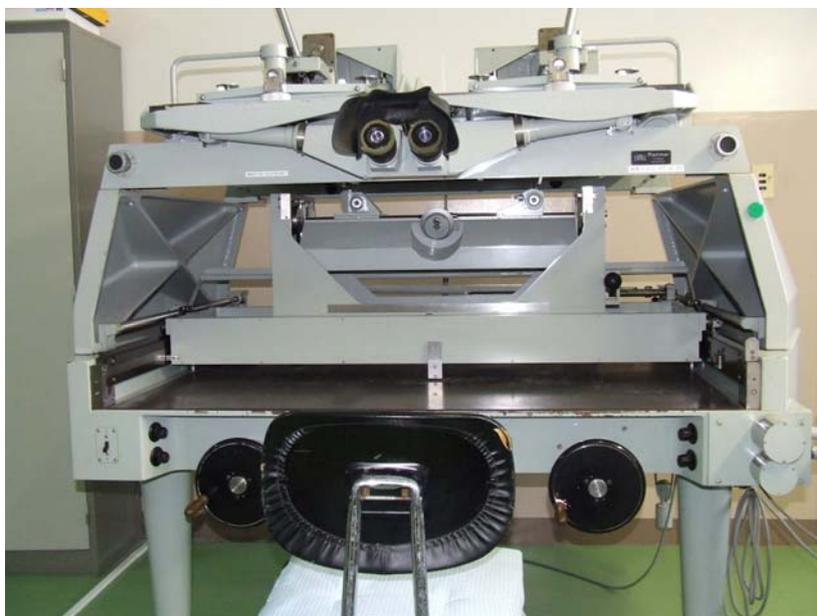


写真-3.1 アナログ図化機（PLANIMAT D-3）



写真-3.2 写真測量用スキャナ



写真-3.3 デジタルステレオ図化機

### 3.2 一般的な空中写真測量の作業工程

一般的な空中写真測量の作業工程図を図-3.1（水尾，1985 参照）に示す。

この中で，標定点測量と対空標識設置の作業は多大な労力と経費を必要とし，これまでに測量の精度を保ちながら標定点数を減らすための技術が研究開発されてきた．前述の GPS/IMU 手法は，その代表的な技術であり，標定点測量と対空標識設置の作業を省くことができる．

また，刺針は，写真に写っている明瞭な点を標定点として使用するために，選定した点を現地で確認しながら写真（ポジフィルム）に針を刺す作業であり，標定点を設置しないで撮影された写真や，座標が分からなくなった古い写真を利用して図化する場合にも実施される．刺針した点の座標は地上測量により求める．

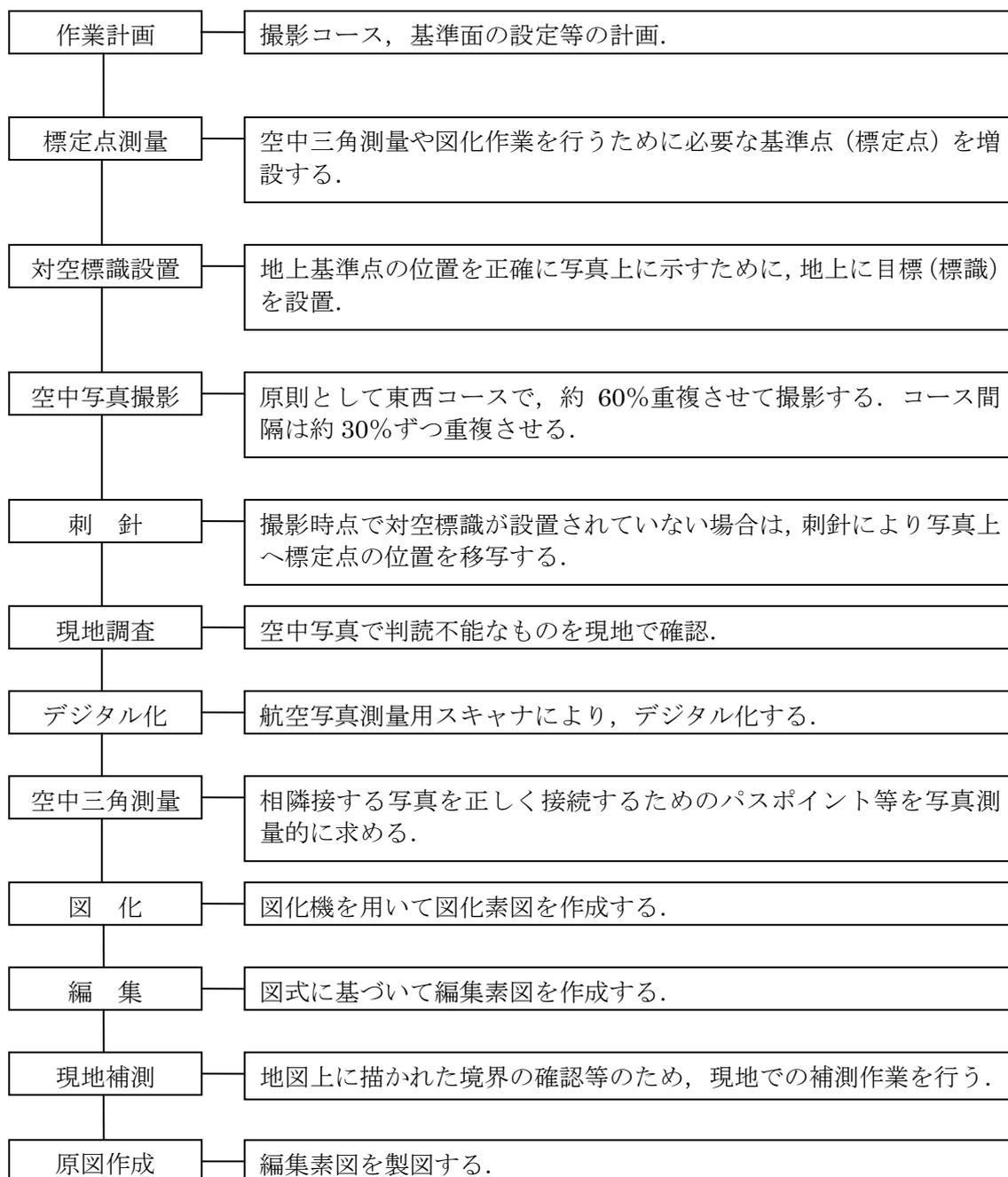


図-3.1 一般的な空中写真測量の工程図

### 3.3 3次元座標測定の原理

図-3.2 は連続する2枚の写真上に写っている点から，地上座標を求める原理図（村井，1983 参照）である．図において，地面の座標系を  $O-XYZ$  とし，その座標系での写真 I のカメラの投影中心の

座標を  $O_1(X_{01}, Y_{01}, Z_{01})$ 、写真Ⅱのカメラの投影中心を  $O_2(X_{02}, Y_{02}, Z_{02})$  とする。また、 $O_1, O_2$  を原点とする写真座標系をそれぞれ、 $O_1 - x_1 y_1 z_1$ 、 $O_2 - x_2 y_2 z_2$  とし、 $X$  軸、 $Y$  軸、 $Z$  軸方向のカメラの回転角をそれぞれ  $(\omega_1, \varphi_1, \kappa_1)$ 、 $(\omega_2, \varphi_2, \kappa_2)$  で表す。

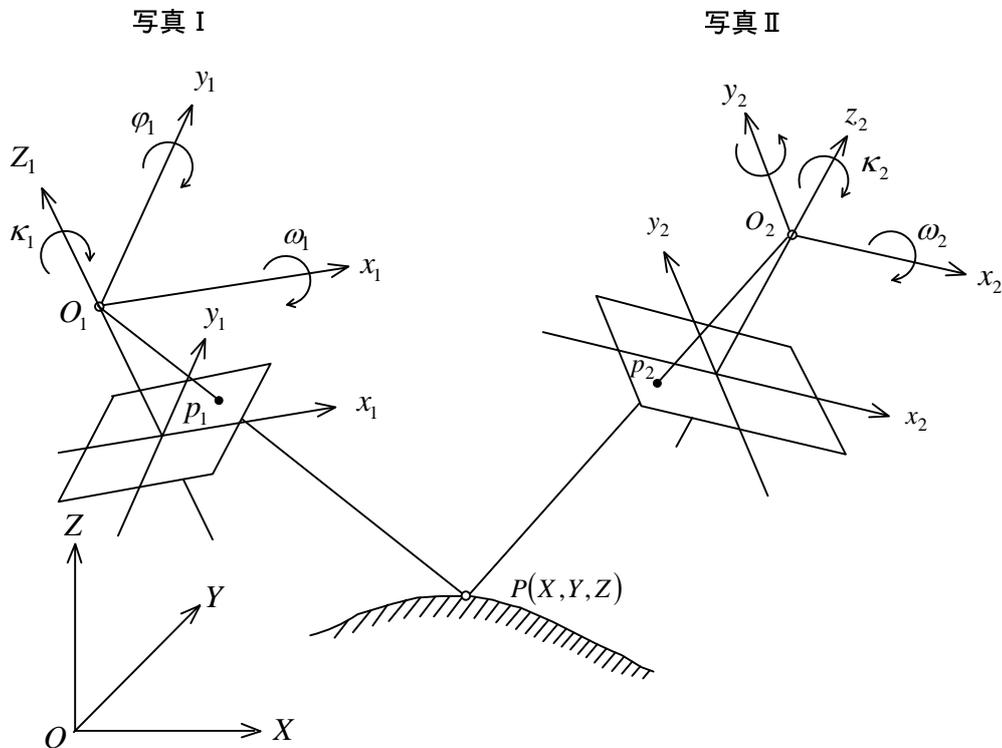


図-3.2 写真測量の原理

写真Ⅰ上で像  $P_1$  の写真座標  $(x_1, y_1)$  を測れば、地上点  $P$  に向かう光線  $O_1 P_1$  がただ1つ確定する。さらに、写真Ⅱ上の像  $P_2$  の写真座標  $(x_2, y_2)$  を測れば、同じく光線  $O_2 P_2$  がただ1つ確定し、2本の光線の交点として地上点  $P$  が定まる。すなわち、前方交会法により地上点が求められる。

### 3.4 外部標定と内部標定

#### 3.4.1 外部標定

3.3節では、カメラの空間位置と傾きが分かっていることが必要である。外部標定とは、3次元の地上座標が測定されている基準点と、対応する写真座標を用いて、撮影されたカメラの空間位置と傾

きを求めることであるが、カメラの空間位置 $(X_0, Y_0, Z_0)$ および傾き $(\omega, \varphi, \kappa)$ を外部標定要素という。

図-3.3 に示すように、3点またはそれ以上の座標既知点が写真に写っているとき、それらの像の写真座標を測ることによって、幾何学の原理からカメラの空間位置と傾きを求めることができる。すなわち、外部標定要素は後方交会法によって求められる。この場合、多くの既知点があれば、3.6節で説明するバンドル法により外部標定要素が決定される。

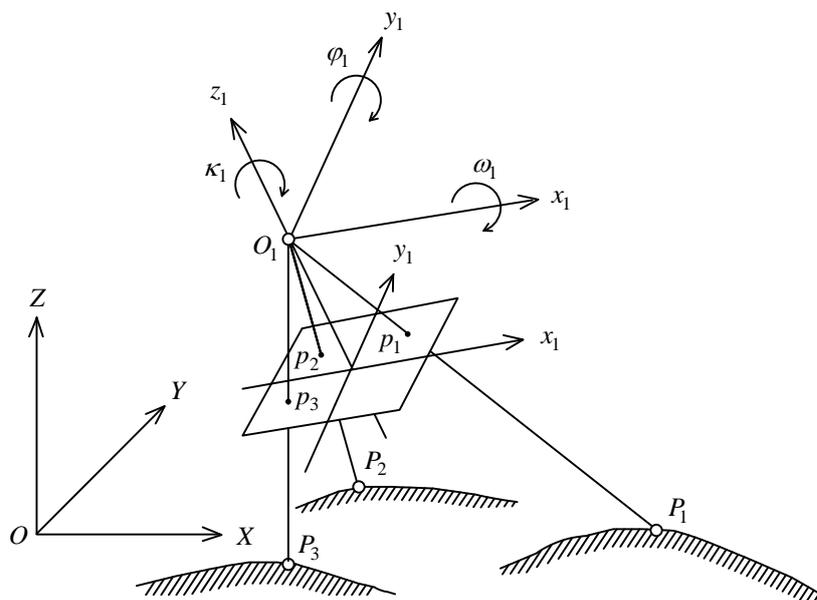


図-3.3 外部標定要素の決定

### 3.4.2 内部標定

3.3節と3.4.1節で述べたことは、理想的なカメラで撮影された場合であり、一般的にはレンズのひずみなど光学的な誤差のため、そのままの写真では高精度の結果を得ることができない。内部標定とは、写真上で計測した座標系から写真中心を原点とする写真座標系へ変換した後、正確な焦点距離と投影中心位置を求め、レンズ固有のひずみを補正することをいう。

(1) 指標中心と主点との位置ずれ

指標座標系の原点と、主点とはわずかな位置ずれがある。指標の座標をずれの分だけ平行移動して主点を原点とする座標系に変換しておく必要がある。主点は次のラジアルディストーション（放射方向歪曲収差）が対称となるような点（対称点）として決定される。

(2) レンズの収差

レンズの収差にはいろいろあるが、一般にラジアルディストーションによる影響が最も大きい。この収差は、主点からの距離  $r$  の関数として得ることができる。

理想的なレンズでは、図-3.4 に示されるように、入射角  $\theta$  の平行光は、像面上の光軸点  $p_0$  から  $c \tan \theta$  だけ離れた点  $p_\theta$  に像を結ぶ。しかし、実際には、レンズの歪曲収差のため、点  $p_\theta$  から、 $d$  だけはずれた点  $p'_\theta$  に結像される。このずれ  $d$  が入射角  $\theta$  での平行光のラジアルディストーションである。ラジアルディストーションは、一般に高級カメラで  $10 \mu\text{m}$  以下であるが、非測定用カメラの場合、 $50 \mu\text{m}$  ぐらいの場合もあり、写真の中央部では小さく、周辺部は大きい。

ラジアルディストーション  $d$  は、式 (3.1) に示すように主点からの距離  $r$ 、入射角  $\theta$ 、そして画面距離  $c$  の関数となる。

$$d = r - c \tan \theta \quad (3.1)$$

これを式 (3.2) のように、主点からの距離  $r$  の近似関数に置き換え、ラジアルディストーション係数  $K_1, K_2$  等が既知であれば、ディストーション値  $d$  が算出される。

$$d = K_1 r^3 + K_2 r^5 + \dots \quad (3.2)$$

$$r^2 = (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 \quad (3.3)$$

ただし、 $x_p, y_p$  は主点位置のずれである。

一般に、式 (3.2) の高次の項は微小であるので第2項までとり、さらに以下のように、 $x$  方向、 $y$  方向の変位  $\Delta x, \Delta y$  に置き換える。

点  $p'_0$  の  $x$  軸からの角度を  $\alpha$  とすると、式 (3.4), (3.5) のようになる。

$$\begin{aligned}
\Delta x &= d \cos \alpha \\
&= (K_1 r^2 + K_2 r^4) \cdot r \cos \alpha \\
&= (K_1 r^2 + K_2 r^4)(x - x_p)
\end{aligned} \tag{3.4}$$

$$\begin{aligned}
\Delta y &= d \sin \alpha \\
&= (K_1 r^2 + K_2 r^4) \cdot r \sin \alpha \\
&= (K_1 r^2 + K_2 r^4)(y - y_p)
\end{aligned} \tag{3.5}$$

実際の補正計算では、式 (3.4), (3.5) に、主点位置ずれ  $x_p$ ,  $y_p$  と画面距離の補正值によるずれの量  $x/c \cdot \delta_c$ ,  $y/c \cdot \delta_c$  を加えた式 (3.6) を用い、共線条件基本式に代入し、後述するバンドル調整法により内部標定要素  $x_p$ ,  $y_p$ ,  $\delta_c$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  などを求める。

$$\left. \begin{aligned}
\Delta x &= (K_1 r^2 + K_2 r^4)(x - x_p) + x_p + \frac{x}{c} \delta_c \\
\Delta y &= (K_1 r^2 + K_2 r^4)(y - y_p) + y_p + \frac{y}{c} \delta_c
\end{aligned} \right\} \tag{3.6}$$

このほか、接線方向歪曲収差 (タンジエンシャルディストーション) がある。この収差は、レンズの光軸の不一致などによって、結像位置が接線方向へずれるひずみである。一般にラジアルディストーションの 1/10 程度であり、タンジエンシャルディストーションは無視できるが、厳密に行う場合には、つぎの式に示される係数  $p_1$ ,  $p_2$  を最小二乗法により求め、写真座標を補正する。

$$\left. \begin{aligned}
\Delta x &= p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2xy \\
\Delta y &= p_2(r^2 + 2y^2) + 2p_1xy
\end{aligned} \right\} \tag{3.7}$$

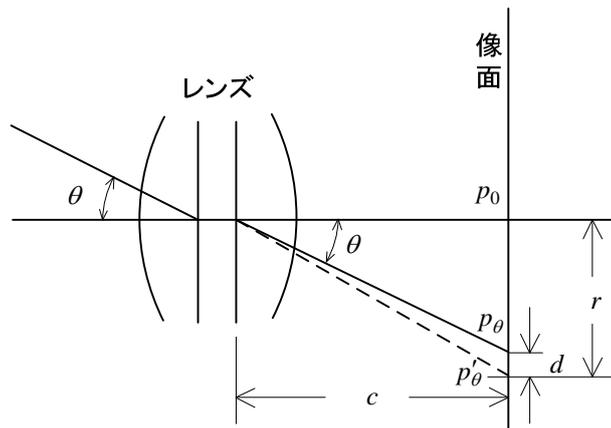


図-3.4 ラジアルディストーションの説明図

### (3) 内部標定計算の手順と実例

式 (3.6) を共線条件式 (3.6 節) に加えることにより, 式 (3.8) を得る.

$$\begin{aligned}
 x_{ij} + \Delta x &= -c \frac{a_{11}(X_i - X_{0j}) + a_{21}(Y_i - Y_{0j}) + a_{31}(Z_i - Z_{0j})}{a_{13}(X_i - X_{0j}) + a_{23}(Y_i - Y_{0j}) + a_{33}(Z_i - Z_{0j})} \\
 y_{ij} + \Delta y &= -c \frac{a_{12}(X_i - X_{0j}) + a_{22}(Y_i - Y_{0j}) + a_{32}(Z_i - Z_{0j})}{a_{13}(X_i - X_{0j}) + a_{23}(Y_i - Y_{0j}) + a_{33}(Z_i - Z_{0j})}
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

さらに, 式 (3.8) を線形化し, 最小二乗法により内部標定要素を求める.

ただし,

- $c$  : カメラの画面距離
- $a_{11} \sim a_{33}$  : カメラの回転角により決まる直交行列の要素
- $(X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j})$  : カメラの投影中心座標
- $(X_i, Y_i, Z_i)$  : ターゲットの地上座標

以下に, 本研究で作成した内部標定用プログラムの操作法を示す.

#### (i) 内部標定用ターゲットの撮影

写真-3.4 は内部標定用ターゲットであり, カメラは自動焦点機能をオフにしてターゲットが画面全面に写るように撮影する. ターゲットの黒丸の中心位置の地上座標は, あらかじめ座標を精度良く測定しておく必要がある. なお, 画面座標の読み取りには, 3DiVision (東京電機大学工学部建設

環境工学科近津研究室で開発されたソフト) を使用した。

(ii) 指標座標計算

図-3.5 のようにカメラ諸元, CCD 四隅の座標およびターゲットの機械座標を入力して, アフィン変換により指標座標を計算する。

(iii) 外部標定初期値計算

図-3.6 のようにターゲットの点座標を入力し, ターゲット撮影時のカメラの位置と角度 (外部標定要素) の概算値 (初期値) を計算する。

(iv) 内部標定計算

図-3.7 のように計算の繰り返し回数を入力し, 内部標定要素を計算する。

表-3.1 は読み取った機械(画面)座標であり, 表-3.2 はその機械座標をアフィン変換した指標座標である。また, 表-3.3 はターゲットの地上座標であり, 左下の黒丸の中心座標を原点とし, 右方向を X 軸, 上方向を Y 軸, 手前方向 (カメラ方向) を Z 軸とした右手座標系である。表-3.4 に計算された内部標定要素を示す。出力結果には, ターゲットを撮影した時のカメラの位置と回転角が同時に出力されるようになっている。

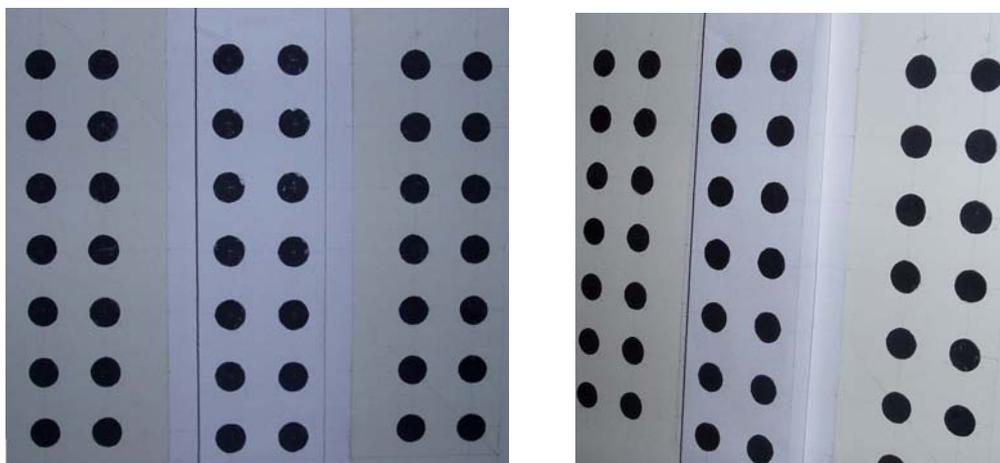


写真-3.4 内部標定用ターゲット

(パラメータ)	OLYMPUS-E300	800万画素
焦点距離:	14.0	単位:mm
画素サイズ:	0.0053	
ピクセル数(横):	3264	17.3 mm
ピクセル数(縦):	2448	13.0 mm

CCDの四隅の座標

指標名	機械座標x	機械座標y
左上	0	0
左下	0	13.0
右上	17.3	0
右下	17.3	13.0

単位:mm

データ数	単位:mm	
点名	機械座標x	機械座標y
1	664.5436	482.5856
2	930.1331	479.0844
3	1455.6496	432.9782
4	1741.182	434.893
5	2274.1925	473.2496
6	2539.1347	479.3849
7	664.9097	744.7612
8	926.5962	744.5322
9	1453.4963	719.8496
10	1748.0157	715.983
11	2277.85	743.3439

カメラの諸元入力

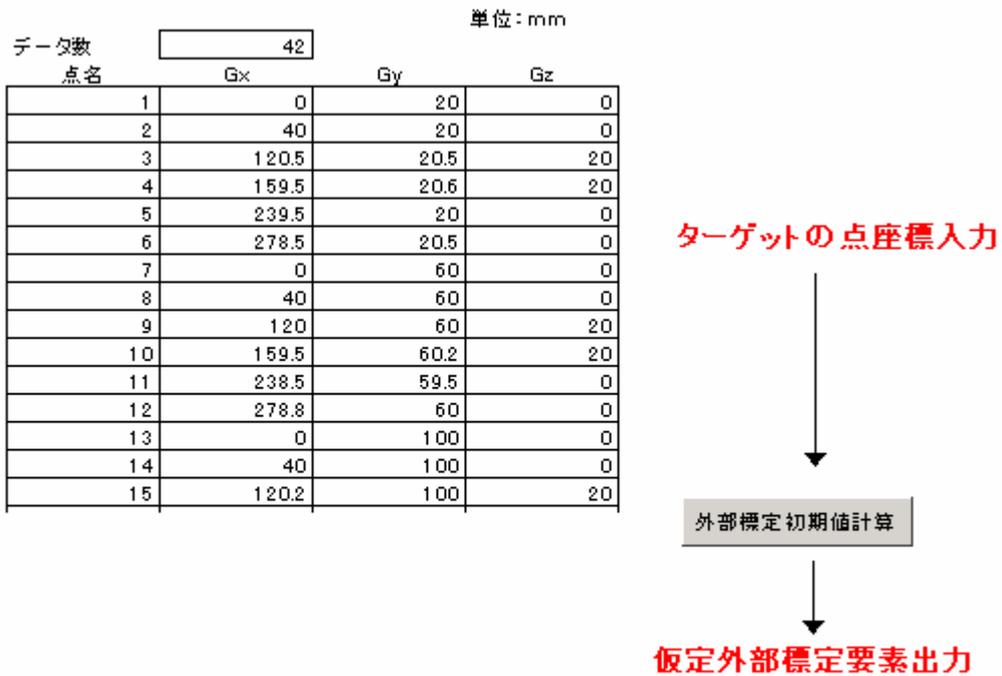
CCD四隅の座標入力

ターゲットの  
機械座標入力

指標座標計算

図-3.5 内部標定計算プログラム操作法 1

(指標座標計算)



バンドル法に用いる仮定外部標定要素

	X0	Y0	Z0	$\omega$	$\phi$	K
写真 I	153.3758229	130.2931391	389.7819626	-0.00124382	-0.02266988	0.000512135

図-3.6 内部標定計算プログラム操作法 2  
(初期値計算)

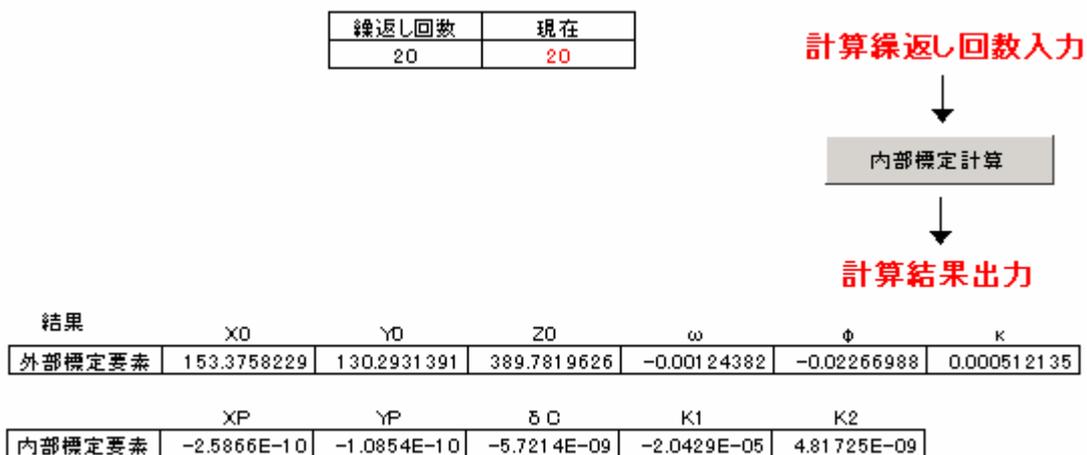


図-3.7 内部標定計算プログラム操作法 3

表-3.1 ターゲットの黒丸点の画像座標

データ数 点名	42 単位:pixel	
	機軸座標 x	機軸座標 y
1	256.1853	152.4340
2	386.1439	152.5615
3	640.9319	135.8740
4	777.1927	137.9638
5	1037.9852	156.0058
6	1167.6963	159.6820
7	256.3851	280.7015
8	384.3826	281.8661
9	638.9108	273.1573
10	779.2450	272.0574
11	1037.6077	287.6281
12	1165.3311	288.3542
13	256.0542	412.2194
14	386.0306	411.6486
15	640.5643	408.5678
16	775.3277	409.6728
17	1035.3764	417.7355
18	1164.4949	419.3773
19	256.8422	541.2566
20	384.7522	542.6388
21	641.3694	543.8350
22	777.2751	546.3291
23	1033.3078	546.3985
24	1163.2869	547.5975
25	258.7114	670.9720
26	386.7150	674.1648
27	643.0797	680.3165
28	777.0858	681.3518
29	1033.0696	676.3728
30	1160.7293	677.8285
31	260.1245	799.3701
32	387.9781	800.0828
33	642.3433	812.4142
34	775.7492	814.2792
35	1030.8026	803.5580
36	1159.1247	804.3288
37	263.2374	926.0758
38	390.5211	926.8461
39	643.6778	944.1165
40	775.9190	943.0797
41	1027.8758	928.6360
42	1157.1587	930.0079

表-3.2 ターゲットの黒丸点の指標座標

データ数 点名	42 単位:mm	
	x	y
1	-1.80546	-1.48592
2	-1.37400	-1.48550
3	-0.52811	-1.54090
4	-0.07572	-1.53396
5	0.79011	-1.47406
6	1.22075	-1.46186
7	-1.80480	-1.06007
8	-1.37985	-1.05620
9	-0.53482	-1.08512
10	-0.06891	-1.08877
11	0.78886	-1.03707
12	1.21290	-1.03466
13	-1.80590	-0.62343
14	-1.37438	-0.62533
15	-0.52933	-0.63555
16	-0.08191	-0.63189
17	0.78145	-0.60512
18	1.21012	-0.59967
19	-1.80328	-0.19503
20	-1.37862	-0.19044
21	-0.52665	-0.18647
22	-0.07545	-0.17819
23	0.77458	-0.17796
24	1.20611	-0.17398
25	-1.79708	0.23563
26	-1.37211	0.24623
27	-0.52098	0.26665
28	-0.07608	0.27009
29	0.77379	0.25356
30	1.19762	0.25839
31	-1.79239	0.66191
32	-1.36791	0.66427
33	-0.52342	0.70522
34	-0.08051	0.71141
35	0.76626	0.67581
36	1.19229	0.67837
37	-1.78205	1.08257
38	-1.35947	1.08513
39	-0.51899	1.14247
40	-0.07995	1.13902
41	0.75655	1.09107
42	1.18577	1.09563

表-3.3 ターゲットの地上座標

データ数	42			単位:mm
点名	Gx	Gy	Gz	
1	0.0	20.0	0.0	
2	40.0	20.0	0.0	
3	120.5	20.5	20.0	
4	159.5	20.6	20.0	
5	239.5	20.0	0.0	
6	278.5	20.5	0.0	
7	0.0	60.0	0.0	
8	40.0	60.0	0.0	
9	120.0	60.0	20.0	
10	159.5	60.2	20.0	
11	238.5	59.5	0.0	
12	278.8	60.0	0.0	
13	0.0	100.0	0.0	
14	40.0	100.0	0.0	
15	120.2	100.0	20.0	
16	160.5	100.2	20.0	
17	239.5	99.5	0.0	
18	279.0	100.0	0.0	
19	0.0	140.0	0.0	
20	40.0	140.0	0.0	
21	120.5	140.0	20.0	
22	160.5	139.8	20.0	
23	240.0	139.5	0.0	
24	280.0	140.0	0.0	
25	0.0	180.0	0.0	
26	40.0	180.0	0.0	
27	119.0	180.0	20.0	
28	159.5	179.5	20.0	
29	239.0	180.0	0.0	
30	278.5	180.0	0.0	
31	0.0	220.0	0.0	
32	40.0	220.0	0.0	
33	118.5	220.0	20.0	
34	159.5	220.0	20.0	
35	240.0	220.0	0.0	
36	279.5	220.0	0.0	
37	0.0	260.0	0.0	
38	40.0	260.0	0.0	
39	119.0	260.0	20.0	
40	158.5	260.0	20.0	
41	240.0	260.0	0.0	
42	280.0	260.0	0.0	

表-3.4 内部標定要素

	XP	YP	$\delta C$	K1	K2
内部標定要素	0.000254958	-0.000228989	-3.14615E-07	0.001844293	-3.98609E-05

### 3.5 大気屈折の補正

高度により大気の密度が変化するために大気の屈折率が変化し、光線は直進せず、図-3.8 に示すように、像の位置は鉛直点から放射方向に真の位置より外側へずれる。このずれの量  $d$  は、大気の状態により変わるが、式 (3.9) の近似式 (矢口, 1983) を用いることが多い。

$$d = K \tan \theta = K \left( r + \frac{r^3}{c^2} \right) \quad (3.9)$$

ただし、

$r(mm)$  : 主点から像までの距離

$d(mm)$  : 大気屈折によるずれの量

$\theta$  : 光線の入射角

$K$  : 海拔撮影高度と海拔地表高度  $h(km)$  により決まる量で、式 (3.10) で与えられる。

$$K = 15(H - h)[1 - 0.035(2H + h)] \times 10^{-6} \quad (3.10)$$

表-3.5 に、式 (3.9) および式 (3.10) により求めた画面距離 14 mm の場合のカメラの大気屈折補正量を示す。

この表より、一般の民生用デジタルカメラの CCD サイズは長辺でも 10mm 以下であるので、高度 500m 以下で撮影した場合、大気屈折の補正は必要ないことがわかる。

表-3.5 大気屈折補正量

画面距離: 14 (mm) 単位:  $\mu\text{m}$

H (km)	h (km)	r (mm)					
		5	10	15	20	25	30
0.1	0.01	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2
	0.02	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2
	0.03	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2
0.2	0.01	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5
	0.02	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4
	0.03	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4
0.3	0.01	0.0	0.1	0.1	0.3	0.4	0.7
	0.02	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7
	0.03	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7
0.4	0.01	0.0	0.1	0.2	0.3	0.6	1.0
	0.02	0.0	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9
	0.03	0.0	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9
0.5	0.01	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	1.2
	0.02	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	1.2
	0.03	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	1.1

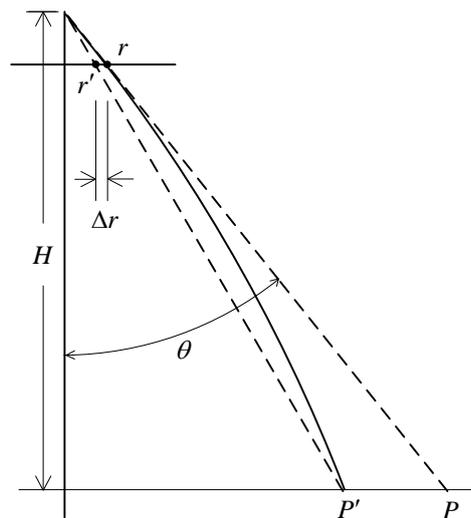


図-3.8 大気による屈折

### 3.6 バンドル調整法

#### 3.6.1 バンドル調整法の原理

バンドル調整法は、撮影地域を構成する複数の写真を、隣接写真との重複部分や基準点を利用して同時に標定し、各写真の投影中心位置と写真の傾きを解き、その結果、写真に写っている地上点の地

上での位置を求める調整計算である。

図-3.9 にバンドル調整の原理図を示す。各写真上の像点は独立に機械座標系の座標値で計測され、さらに、それぞれの主点を原点とする写真座標系での座標値に変換されている。これらの写真を平行移動および回転することにより撮影時の状態に戻せば、図-3.10 に示すとおり、各写真の投影中心と像点を結ぶ直線は、その像点に対応する地上点を通る（共線条件）はずである。しかし、写真画像の変形や像点の計測に伴う誤差のため、対応する光線の交会点の位置と地上位置を完全に一致させることは不可能である。したがって、各点で生じる不一致の程度を最小にするように、各写真の位置および回転角を定めるのが合理的である。

図-3.9 において、地上点  $G_1$  について考えると、この点は両写真に写されており、その像点の位置が  $\bar{c}_{11}$ ,  $\bar{c}_{12}$  である。いま、地上座標系の中で各写真を平行移動および回転移動させ、ほぼ撮影時の状態が再現されているとする。しかし、 $\bar{c}_{11}$  を通る光線と、 $\bar{c}_{12}$  を通る光線は必ずしも 1 点で交会するとは限らない。このような場合、 $G_1$  の調整位置は、 $\bar{c}_{11}$ ,  $\bar{c}_{12}$  を通る光線に近く、基準点であれば与えられた位置  $\bar{G}_1$  に近いところにすべきである。そこで、調整された位置  $G_1$  を仮想し、その仮想した点と各写真の投影中心を結んでできる光線が各写真と交わってできる点を  $c_{11}$ ,  $c_{12}$  とすれば、 $\bar{c}_{11}$  と  $c_{11}$ ,  $c_{12}$  と  $\bar{c}_{12}$  とは一致せず、ずれ  $v_1$ ,  $v_2$  が生じる。一方、 $G_1$  と与えられた位置  $\bar{G}_1$  の間にもずれ  $v_3$  が生じている。以下同様に、すべての地上点で像点の調整位置と計測された像の位置のずれを考え、さらに基準点の場合は与えられた位置とのずれを考える。そして、それぞれの  $v_i$  の精度に応じた重み  $w_i$  を付けた 2 乗和を作ると、この量は撮影地域全体の不一致の程度を表しているものと考えられる。そこで、この 2 乗和を最小にするような各写真の位置と回転角を求める。これが最小二乗法によるバンドル調整の方法である。

$$\sum_{i=1}^n w_i |v_i|^2 \rightarrow \text{最小} \quad (3.11)$$

ただし、

$n$  : すべてのずれの数

$|v_i|$  :  $v_i$  の長さ

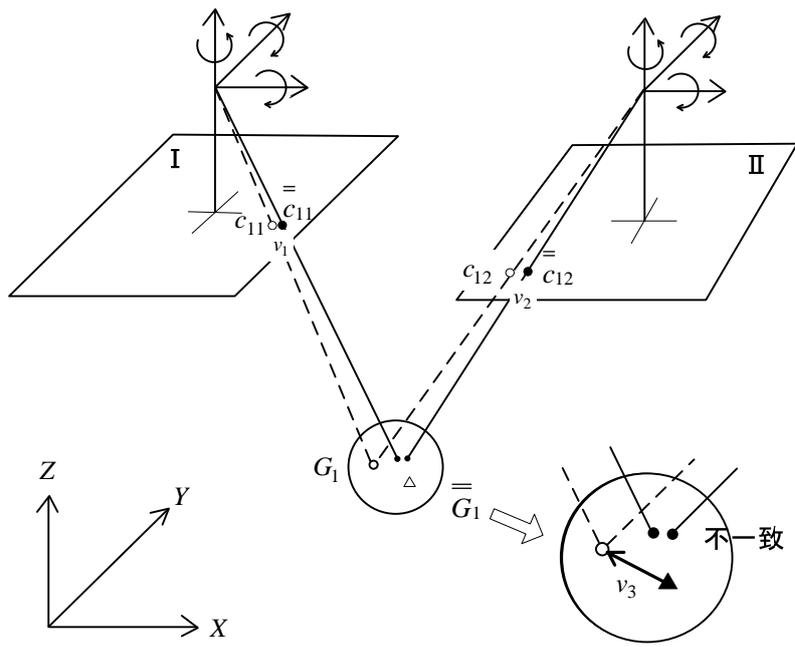


図-3.9 バンドル調整の原理

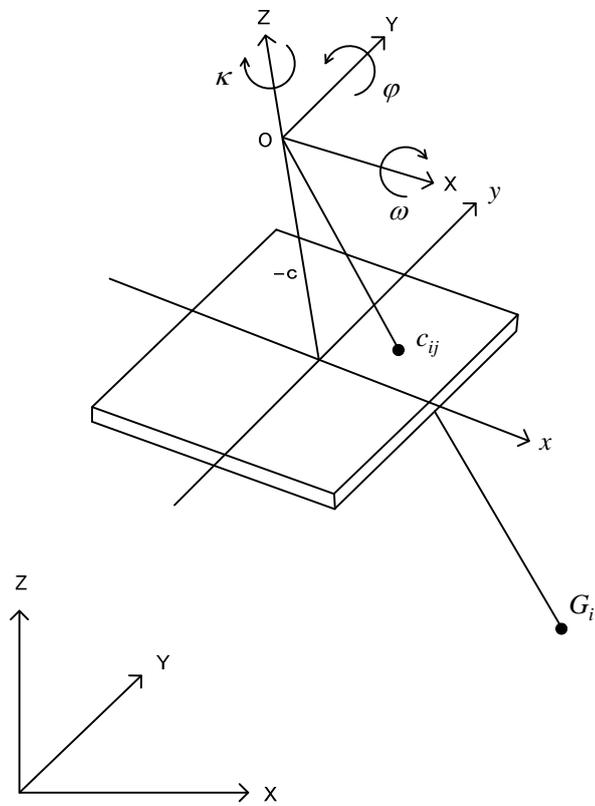


図-3.10 共線条件

写真の外部標定要素は、カメラの回転角と投影中心の位置である。X軸、Y軸、Z軸方向のカメラの回転角をそれぞれ $\omega$ 、 $\varphi$ 、 $\kappa$ で表し、このとき、カメラの回転を示す直交行列は式 (3.12) のようになる。

$$R(\omega, \kappa, \varphi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

したがって、地上点 $i$ 、写真 $j$ の投影中心、そして写真 $j$ 上の地上点 $i$ の像点が一直線上にあることから、式 (3.13)、(3.14) の共線条件式が成立する。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_i = \lambda_{ij} R_j \begin{pmatrix} x \\ y \\ -c \end{pmatrix}_{ij} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}_j \quad (3.13)$$

$$R_j = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = R(\omega_j, \varphi_j, \kappa_j) \quad (3.14)$$

ただし、

$c$  : カメラの画面距離

$\lambda_{ij}$  : 地上点の位置により変化する縮尺因子

$(X_0, Y_0, Z_0)$  : カメラの投影中心座標

$R_j$  : カメラの回転角により決まる直交行列

$R_j$ は直交行列であることから、 $R_j^{-1} = R_j^T$ であり、式 (3.13) を式 (3.15) のように変形する。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ -c \end{pmatrix}_{ij} = \frac{1}{\lambda_{ij}} R_j^T \begin{pmatrix} X_i - X_{0j} \\ Y_i - Y_{0j} \\ Z_i - Z_{0j} \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

これらから  $\lambda_{ij}$  を消去するために第1成分と第2成分を第3成分で割ると、式 (3.16) が得られる。

$$\begin{aligned} x_{ij} &= -c \frac{a_{11}(X_i - X_{0j}) + a_{21}(Y_i - Y_{0j}) + a_{31}(Z_i - Z_{0j})}{a_{13}(X_i - X_{0j}) + a_{23}(Y_i - Y_{0j}) + a_{33}(Z_i - Z_{0j})} \\ y_{ij} &= -c \frac{a_{12}(X_i - X_{0j}) + a_{22}(Y_i - Y_{0j}) + a_{32}(Z_i - Z_{0j})}{a_{13}(X_i - X_{0j}) + a_{23}(Y_i - Y_{0j}) + a_{33}(Z_i - Z_{0j})} \end{aligned} \quad (3.16)$$

実際に数値計算を行う場合は、式 (3.16) を線形化し、2次以上の項を省略すると、式 (3.17) が得られる。なお、近似値には  $-$  を、観測値には  $=$  を冠した。

$$\begin{aligned} x_{ij} &= f_x(\bar{X}_i, \bar{Y}_i, \bar{Z}_i, \bar{\omega}_j, \bar{\varphi}_j, \bar{\kappa}_j, \bar{X}_{0j}, \bar{Y}_{0j}, \bar{Z}_{0j}) \\ &+ \frac{\partial f_x}{\partial X_i} \Delta X_i + \frac{\partial f_x}{\partial Y_i} \Delta Y_i + \frac{\partial f_x}{\partial Z_i} \Delta Z_i \\ &+ \frac{\partial f_x}{\partial \omega_j} \Delta \omega_j + \frac{\partial f_x}{\partial \varphi_j} \Delta \varphi_j + \frac{\partial f_x}{\partial \kappa_j} \Delta \kappa_j \\ &+ \frac{\partial f_x}{\partial X_{0j}} \Delta X_{0j} + \frac{\partial f_x}{\partial Y_{0j}} \Delta Y_{0j} + \frac{\partial f_x}{\partial Z_{0j}} \Delta Z_{0j} \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} y_{ij} &= f_y(\bar{X}_i, \bar{Y}_i, \bar{Z}_i, \bar{\omega}_j, \bar{\varphi}_j, \bar{\kappa}_j, \bar{X}_{0j}, \bar{Y}_{0j}, \bar{Z}_{0j}) \\ &+ \frac{\partial f_y}{\partial X_i} \Delta X_i + \frac{\partial f_y}{\partial Y_i} \Delta Y_i + \frac{\partial f_y}{\partial Z_i} \Delta Z_i \\ &+ \frac{\partial f_y}{\partial \omega_j} \Delta \omega_j + \frac{\partial f_y}{\partial \varphi_j} \Delta \varphi_j + \frac{\partial f_y}{\partial \kappa_j} \Delta \kappa_j \\ &+ \frac{\partial f_y}{\partial X_{0j}} \Delta X_{0j} + \frac{\partial f_y}{\partial Y_{0j}} \Delta Y_{0j} + \frac{\partial f_y}{\partial Z_{0j}} \Delta Z_{0j} \end{aligned}$$

これを行列で表現すると、式 (3.18) になる。

$$\dot{A}_{ij} \dot{\Delta}_i + \ddot{A}_{ij} \ddot{\Delta}_j = c_{ij} - \bar{c}_{ij} \quad (3.18)$$

ただし、 $\dot{\Delta}_i, \ddot{\Delta}_j, c_{ij}, \bar{c}_{ij}$  は表-3.6 のとおりであり、 $\dot{A}_{ij}, \ddot{A}_{ij}$  は、式 (3.19) である。

$$\dot{A}_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial X} & \frac{\partial f_x}{\partial Y} & \frac{\partial f_x}{\partial Z} \\ \frac{\partial f_y}{\partial X} & \frac{\partial f_y}{\partial Y} & \frac{\partial f_y}{\partial Z} \\ \frac{\partial f_z}{\partial X} & \frac{\partial f_z}{\partial Y} & \frac{\partial f_z}{\partial Z} \end{pmatrix}, \quad \ddot{A}_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial \omega} & \cdots & \frac{\partial f_x}{\partial X_0} & \cdots \\ \frac{\partial f_y}{\partial \omega} & \cdots & \frac{\partial f_y}{\partial X_0} & \cdots \\ \frac{\partial f_z}{\partial \omega} & \cdots & \frac{\partial f_z}{\partial X_0} & \cdots \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

### 3.6.2 観測方程式

バンドル調整の場合の観測方程式は、次の2種類の条件からなる。

#### (1) 共線条件

式 (3.18) の右辺の像点の調整された写真座標値  $c_{ij}$  を  $\bar{c}_{ij} + V_{ij}$  で置き換えると、式 (3.20) が得られる。

$$\dot{A}_{ij}\dot{\Delta}_i + \ddot{A}_{ij}\ddot{\Delta}_j = (\bar{c}_{ij} - c_{ij}) + V_{ij} \quad (3.20)$$

さらに、 $\varepsilon_{ij} = \bar{c}_{ij} - c_{ij}$  とおくと、式 (3.21) が得られる。

$$\dot{A}_{ij}\dot{\Delta}_i + \ddot{A}_{ij}\ddot{\Delta}_j = \varepsilon_{ij} + V_{ij} \quad (3.21)$$

#### (2) 基準点条件

任意の基準点  $i$  に対し、この点の調整された地上座標  $G_i = (X, Y, Z)_i^T$  が、与えられた基準点座標値  $\bar{G}_i = (\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})_i^T$  の誤差を調整したものと一致するという式 (3.22) の条件である。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{pmatrix}_i + \begin{pmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{pmatrix}_i \quad (3.22)$$

両辺から、近似値  $\bar{G}_i = (\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})_i^T$  を減じると、式 (3.23) が得られる。

$$\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}_i = \left\{ \begin{pmatrix} \overline{\overline{X}} \\ \overline{\overline{Y}} \\ \overline{\overline{Z}} \end{pmatrix}_i - \begin{pmatrix} \overline{X} \\ \overline{Y} \\ \overline{Z} \end{pmatrix}_i \right\} + \begin{pmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{pmatrix}_i \quad (3.23)$$

また、式 (3.23) は、式 (3.24) のように表すことができる。

$$\dot{\Delta}_i = \varepsilon_i + V_i \quad (3.24)$$

ただし、

$$\varepsilon_i = \begin{pmatrix} \overline{\overline{X}} \\ \overline{\overline{Y}} \\ \overline{\overline{Z}} \end{pmatrix}_i - \begin{pmatrix} \overline{X} \\ \overline{Y} \\ \overline{Z} \end{pmatrix}_i$$

まとめると、観測方程式は、地上点  $i$  が写真  $j$  に写っているとき、式 (3.25) となる。

$$\begin{aligned} \dot{A}_{ij} \dot{\Delta}_i + \ddot{A}_{ij} \ddot{\Delta}_j &= \varepsilon_{ij} + V_{ij} \quad [W_{ij}] \\ (i &= 1, \dots, \dot{n}, \quad j = 1, \dots, \ddot{n}) \end{aligned} \quad (3.25)$$

地上点  $i$  が基準点の場合は、式 (3.26) となる。

$$\begin{aligned} \dot{\Delta}_i &= \varepsilon_i + V_i \quad [W_i] \\ (i &= 1, \dots, \dot{n}) \end{aligned} \quad (3.26)$$

ただし、各式に添えた  $W_{ij}$ ,  $W_i$  は、それぞれの式に含まれる観測値  $\overline{c_{ij}}$ ,  $\overline{G_i}$  の精度に応じた重み行列である。

### 3.6.3 観測方程式の行列表現

地上点  $i$  が写真  $j$  に写っているような組合せ  $\langle i, j \rangle$  の集合を  $T$  で表し,  $T$  のすべての要素を重複なく並べたものを,  $\langle i_1, j_1 \rangle, \langle i_2, j_2 \rangle, \dots, \langle i_t, j_t \rangle$  とする.

また, 基準点の点番号を, すべて重複なく並べたものを,  $k_1, k_2, \dots, k_s$  とすると, 式 (3.26) は, 式 (3.27) のように書ける.

$$\begin{aligned}
 \dot{A}_{i_1 j_1} \dot{\Delta}_{i_1} + \ddot{A}_{i_1 j_1} \ddot{\Delta}_{j_1} &= \varepsilon_{i_1 j_1} + V_{i_1 j_1} & [W_{i_1 j_1}] \\
 \dot{A}_{i_2 j_2} \dot{\Delta}_{i_2} + \ddot{A}_{i_2 j_2} \ddot{\Delta}_{j_2} &= \varepsilon_{i_2 j_2} + V_{i_2 j_2} & [W_{i_2 j_2}] \\
 &\vdots & \\
 \dot{A}_{i_t j_t} \dot{\Delta}_{i_t} + \ddot{A}_{i_t j_t} \ddot{\Delta}_{j_t} &= \varepsilon_{i_t j_t} + V_{i_t j_t} & [W_{i_t j_t}]
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

ここで, 式 (3.28), (3.29), (3.30), (3.31), (3.32), (3.33), (3.34) のように置くと, 式 (3.27) は, 式 (3.35) のように書ける.

$$\dot{\Delta} = \begin{pmatrix} \dot{\Delta}_1 \\ \dot{\Delta}_2 \\ \vdots \\ \dot{\Delta}_n \end{pmatrix} \tag{3.28}$$

$$\ddot{\Delta} = \begin{pmatrix} \ddot{\Delta}_1 \\ \ddot{\Delta}_2 \\ \vdots \\ \ddot{\Delta}_n \end{pmatrix} \tag{3.29}$$

$$\dot{A} = \begin{pmatrix} \dots & \dot{A}_{i_1 j_1} & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots \\ \dots & 0 & \dots & \dot{A}_{i_2 j_2} & \dots & 0 & \dots \\ & & & \vdots & & & \\ \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & \dot{A}_{i_t j_t} & \dots \end{pmatrix} \tag{3.30}$$

$$\ddot{A} = \begin{pmatrix} \dots & \ddot{A}_{i_1 j_1} & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots \\ \dots & 0 & \dots & \ddot{A}_{i_2 j_2} & \dots & 0 & \dots \\ & & & \vdots & & & \\ \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & \ddot{A}_{i_t j_t} & \dots \end{pmatrix} \quad (3.31)$$

$$\varepsilon_c = \begin{pmatrix} \varepsilon_{i_1 j_1} \\ \varepsilon_{i_2 j_2} \\ \vdots \\ \varepsilon_{i_t j_t} \end{pmatrix} \quad (3.32)$$

$$V_c = \begin{pmatrix} V_{i_1 j_1} \\ V_{i_2 j_2} \\ \vdots \\ V_{i_t j_t} \end{pmatrix} \quad (3.33)$$

$$W_c = \begin{pmatrix} W_{i_1 j_1} & & & 0 \\ & W_{i_2 j_2} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & W_{i_t j_t} \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

$$\dot{A}\dot{\Delta} + \ddot{A}\ddot{\Delta} = \varepsilon_c + V_c \quad [Wc] \quad (3.35)$$

一方, 式 (3.26) は, 式 (3.36) のように書ける.

$$\begin{aligned} \dot{\Delta}_{k1} &= \varepsilon_{k1} + V_{k1} & [W_{k1}] \\ \dot{\Delta}_{k2} &= \varepsilon_{k2} + V_{k2} & [W_{k2}] \\ &\vdots \\ \dot{\Delta}_{ks} &= \varepsilon_{ks} + V_{ks} & [W_{ks}] \end{aligned} \quad (3.36)$$

ここで,

$$\dot{B} = \begin{pmatrix} \cdots & I_3 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots \\ \cdots & 0 & \cdots & I_3 & \cdots & 0 & \cdots \\ & & & \vdots & & & \\ \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & I_3 & \cdots \end{pmatrix},$$

$$\varepsilon_G = \begin{pmatrix} \varepsilon_{k1} \\ \varepsilon_{k2} \\ \vdots \\ \varepsilon_{ks} \end{pmatrix},$$

$$V_G = \begin{pmatrix} V_{k1} \\ V_{k2} \\ \vdots \\ V_{ks} \end{pmatrix},$$

$$W_G = \begin{pmatrix} W_{k1} & & & 0 \\ & W_{k2} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & W_{ks} \end{pmatrix}$$

とすれば、式 (3.36) は、式 (3.37) のように表される。

$$\dot{B}\dot{\Delta} = \varepsilon_G + V_G \quad [W_G] \quad (3.37)$$

ただし、 $I_3$  は 3 次単位行列である。

式 (3.35) と式 (3.37) より、式 (3.38) が得られる。

$$\begin{pmatrix} \dot{A} & \ddot{A} \\ \dot{B} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\Delta} \\ \ddot{\Delta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_c \\ \varepsilon_G \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_c \\ V_G \end{pmatrix} \quad \left[ \begin{pmatrix} W_c & 0 \\ 0 & W_G \end{pmatrix} \right] \quad (3.38)$$

式 (3.38) は、全ての観測方程式を行列表現したものとなっている。

### 3.6.4 正規方程式

式 (3.38) の最小二乗解は、式 (3.39) の正規方程式の解として求められる。

$$\begin{pmatrix} \dot{A} & \ddot{A} \\ \dot{B} & 0 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} W_c & 0 \\ 0 & W_G \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{A} & \ddot{A} \\ \dot{B} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\Delta} \\ \ddot{\Delta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{A} & \ddot{A} \\ \dot{B} & 0 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} W_c & 0 \\ 0 & W_G \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_c \\ \varepsilon_G \end{pmatrix} \quad (3.39)$$

掛け算を実行すると、式 (3.40) になる。

$$\begin{pmatrix} \dot{A}^T W_c \dot{A} + \dot{B}^T W_G \dot{B} & \dot{A}^T W_c \ddot{A} \\ \dot{A}^T W_c \ddot{A} & \ddot{A}^T W_c \ddot{A} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\Delta} \\ \ddot{\Delta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{A}^T W_c \varepsilon_c + \dot{B}^T W_G \varepsilon_G \\ \ddot{A}^T W_c \varepsilon_c \end{pmatrix} \quad (3.40)$$

これを式 (3.41) のように置く。

$$\begin{pmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\Delta} \\ \ddot{\Delta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} \quad (3.41)$$

式 (3.41) から  $\dot{\Delta}$ 、 $\ddot{\Delta}$  が求められ、調整値は、式 (3.42) で求められる。

$$G = \bar{G} + \dot{\Delta} \quad (3.42)$$

$$P = \bar{P} + \ddot{\Delta}$$

以上で調整計算が終了するが、共線条件式 (3.16) の代わりに、近似値  $\bar{G}$ 、 $\bar{P}$  の周りでテーラー展開して2次以上の項を省略した線形化した共線条件式 (3.17) を用いているので、最初の近似値  $\bar{G}$ 、 $\bar{P}$  が悪いと、調整値  $G$ 、 $P$  は、正しい調整値とはならない。そこで、 $G$ 、 $P$  を新しい近似値として計算を繰り返す。図-3.11 にバンドル調整法の流れを示す。

表-3.6 変数等

	調整値	観測値	近似値	補正值 (調整値－ 観測値)	近似補正值 (調整値－近 似値)
写真 $j$ 上の 点 $i$ の像の写 真主点座標	$c_{ij} = \begin{pmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \end{pmatrix}$	$\overset{=}{c}_{ij} = \begin{pmatrix} \overset{=}{x}_{ij} \\ \overset{=}{y}_{ij} \end{pmatrix}$	$\bar{c}_{ij} = \begin{pmatrix} \bar{x}_{ij} \\ \bar{y}_{ij} \end{pmatrix}$	$v_{ij} = \begin{pmatrix} V_{xij} \\ V_{yij} \end{pmatrix}$	なし
点 $i$ の地上座 標	$G_i = \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix}$	$\overset{=}{G}_i = \begin{pmatrix} \overset{=}{X}_i \\ \overset{=}{Y}_i \\ \overset{=}{Z}_i \end{pmatrix}$ (基準点)	$\bar{G}_i = \begin{pmatrix} \bar{X}_i \\ \bar{Y}_i \\ \bar{Z}_i \end{pmatrix}$	$V_i = \begin{pmatrix} V_{Xi} \\ V_{Yi} \\ V_{Zi} \end{pmatrix}$	$\dot{\Delta}_i = \begin{pmatrix} \Delta X_i \\ \Delta Y_i \\ \Delta Z_i \end{pmatrix}$
写真 $j$ の外 部標定要素	$P_j = \begin{pmatrix} \omega_j \\ \varphi_j \\ k_j \\ X_{0j} \\ Y_{0j} \\ Z_{0j} \end{pmatrix}$	なし	$\bar{P}_j = \begin{pmatrix} \bar{\omega}_j \\ \bar{\varphi}_j \\ \bar{k}_j \\ \bar{X}_{0j} \\ \bar{Y}_{0j} \\ \bar{Z}_{0j} \end{pmatrix}$	なし	$\ddot{\Delta}_j = \begin{pmatrix} \Delta \omega_j \\ \Delta \varphi_j \\ \Delta \kappa_j \\ \Delta X_{0j} \\ \Delta Y_{0j} \\ \Delta Z_{0j} \end{pmatrix}$

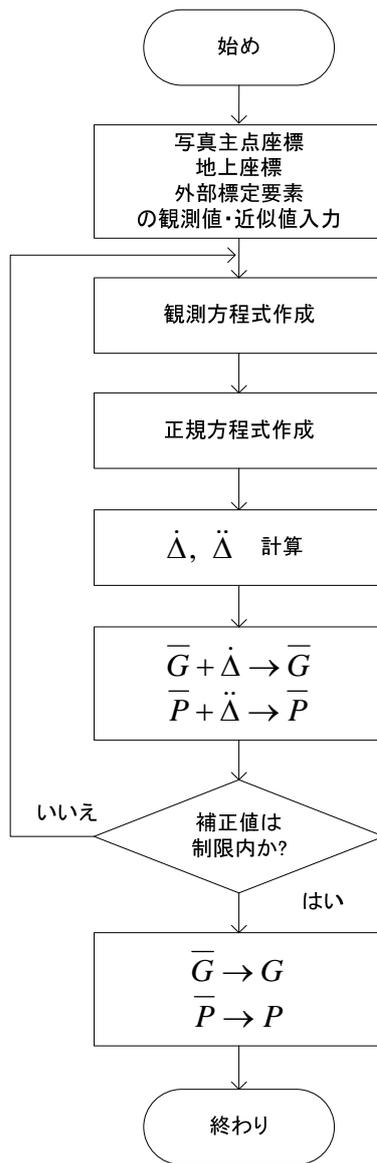


図-3.11 バンドル調整法の流れ

### 3. 7 斜め写真による写真測量

空中写真測量は、一般に航空機等からカメラを機体の真下に設置された専用のカメラで垂直写真を撮影する。垂直写真とは、カメラから地面に対して真下に下ろした線（鉛直軸）に対する角度が $3^\circ$ 以内の写真をいうが、斜め写真はそれ以上の傾きを持った写真である。斜め写真は手軽に撮影できるという利点はあるが、地形図作成には従来の図化機では構造的に難しく、主に観賞用の風景写真や、土地の状況を把握する為に使われていた。しかしながら、安価なデジタル図化機と高精度の民生用デ

デジタルカメラの登場により、空中写真では対応不可能であった崖面などを斜め写真撮影することにより、精度の高い詳細な地形形状データとして図化することや、土木構造物の3次元形状計測に利用(秋本ら, 1998)されるようになった。

この章では、ヘリコプターから民生用デジタルカメラで撮影した浅海域の斜め写真を用いて、標定計算から地形図の図化までの手順と方法について述べる。

データとなる写真は、環境調査の目的で撮影されたものであり、対空標識は設置しておらず、しかも、写真のオーバーラップ(隣接写真との重なり)も考えられていない。このような写真の場合、通常の写真測量の方法では、カメラの外部標定要素を求めることは難しい。本研究では、既製の地形図から読み取った点を基準点(標定点)として使用することにより、外部標定要素を求めた。

### 3.7.1 斜め写真のバンドル調整法

垂直写真の場合、バンドル調整法における回転角の初期値はすべて0として与えてよく、撮影高度も高度計等から読定可能で、水平位置も縮尺の大きな地図より読み取ることができる。しかし、斜め写真の場合はカメラの回転角、投影中心の座標ともに取得が難しい。そこで、相互標定・絶対標定の方法を利用して初期値を計算する方法を取り入れた。この方法は垂直写真の標定計算においても、初期値をより正確に求めるために使われている。

相互標定・絶対標定を行う利点として、バンドル調整法における外部標定要素の初期値が求められるばかりでなく、パスポイントの地上座標も求められるので、標定点の数を最小限におさえることもできる。

### 3.7.2 相互標定

連続する2枚の写真を撮影時の状態に再現したとき、それから得られる立体像のことをモデルという。モデルは撮影されたときと厳密に同じ空間でなくとも、写真の位置および傾きの関係が相対的に同じであればよい。このように、相対的に相似なモデルを形成することを相互標定とよぶ。相互標定の方法は数多く開発されているが、本研究においては共面条件(村木ら, 2000)を用い、座標系は左側のカメラの投影中心を原点にとり、右側のカメラの投影中心と結ぶ線をモデル座標系の $X$ 軸にとる方法で行った。

図-3.12に示す光束の交会の条件は、2つの投影中心、 $O_1(X_{01}, Y_{01}, Z_{01})$ 、 $O_2(X_{02}, Y_{02}, Z_{02})$ およびその像 $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 、 $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$ が、同一平面内に含まれるという式(3.43)の共面条件によって与えられる。

$$\begin{vmatrix} X_{01} & Y_{01} & Z_{01} & 1 \\ X_{02} & Y_{02} & Z_{02} & 1 \\ X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (3.43)$$

モデル座標系の原点を左側の投影中心にとり，右側の投影中心を結ぶ線を  $X$  軸にとる．モデルの縮尺は，基線長を単位長さにとる．このとき，標定要素は左側の回転角  $\kappa_1, \varphi_1$ ，右側の回転角  $\kappa_2, \varphi_2, \omega_2$  の5つの回転角のみになる．このとき，式 (3.43) の共面条件式は，式 (3.44) のようになる．

$$F(\kappa_1, \varphi_1, \kappa_2, \varphi_2, \omega_2) = \begin{vmatrix} Y_1 & Z_1 \\ Y_2 & Z_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (3.44)$$

ここで，モデル座標系  $XYZ$  とカメラ座標系  $xyz$  の間には，式 (3.45)，(3.46) に示すような座標変換の関係式が成り立つ．

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & 0 & \sin \varphi_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_1 & 0 & \cos \varphi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa_1 & -\sin \kappa_1 & 0 \\ \sin \kappa_1 & \cos \kappa_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -c \end{pmatrix} \quad (3.45)$$

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_2 & -\sin \omega_2 \\ 0 & \sin \omega_2 & \cos \omega_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi_2 & 0 & \sin \varphi_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_2 & 0 & \cos \varphi_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa_2 & -\sin \kappa_2 & 0 \\ \sin \kappa_2 & \cos \kappa_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.46)$$

式 (3.45) および式 (3.46) から式 (3.47) が得られる．

$$X_1 = x_1 \cos \varphi_1 \cos \kappa_1 - y_1 \cos \varphi_1 \sin \kappa_1 - c \cdot \sin \varphi_1$$

$$Y_1 = x_1 \sin \kappa_1 + y_1 \cos \kappa_1$$

$$\begin{aligned}
Z_1 &= -x_1 \sin \varphi_1 \cos \kappa_1 + y_1 \sin \varphi_1 \sin \kappa_1 - c \cdot \cos \varphi_1 \\
X_2 &= x_2 \cos \varphi_2 \cos \kappa_2 - y_2 \cos \varphi_2 \sin \kappa_2 - c \cdot \sin \varphi_2 + 1 \\
Y_2 &= x_2 (\cos \omega_2 \sin \kappa_2 + \sin \omega_2 \sin \varphi_2 \cos \kappa_2) + y_2 (\cos \omega_2 \cos \kappa_2 \\
&\quad - \sin \omega_2 \sin \varphi_2 \sin \kappa_2) + c \cdot \sin \omega_2 \cos \varphi_2 \\
Z_2 &= x_2 (\sin \omega_2 \sin \kappa_2 - \cos \omega_2 \sin \varphi_2 \cos \kappa_2) + y_2 (\sin \omega_2 \cos \kappa_2 \\
&\quad + \cos \omega_2 \sin \varphi_2 \sin \kappa_2) - c \cdot \cos \omega_2 \cos \varphi_2
\end{aligned} \tag{3.47}$$

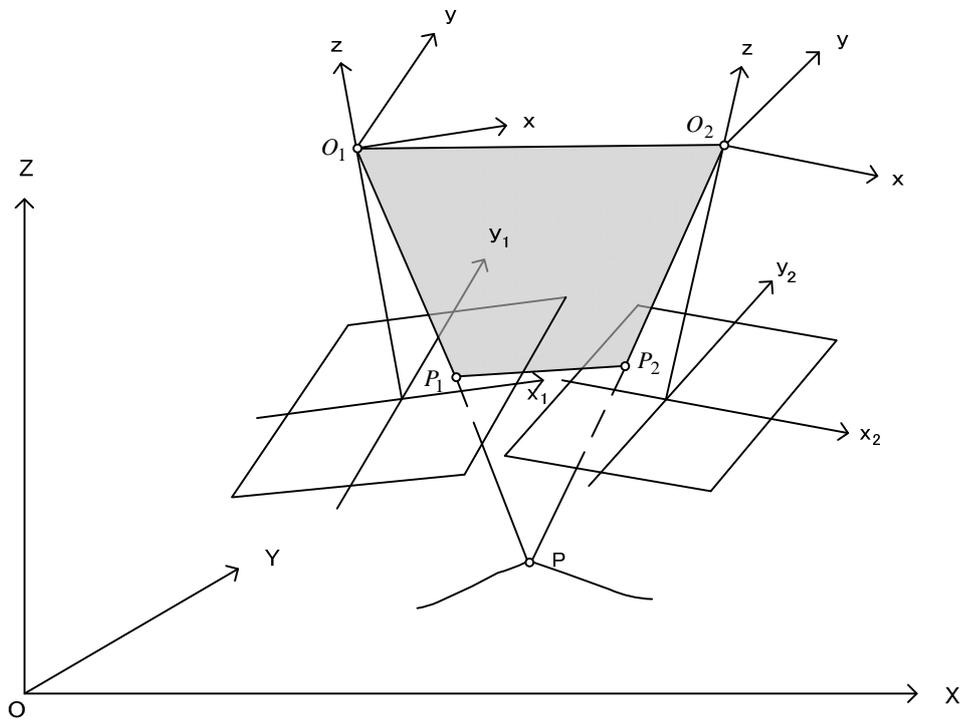


図-3.12 共面条件

標定要素の近似値を  $k_1^0, \varphi_1^0, \kappa_2^0, \varphi_2^0, \omega_2^0$  とし、補正量をそれぞれ  $\Delta\kappa_1, \Delta\varphi_1, \Delta\kappa_2, \Delta\varphi_2, \Delta\omega_2$  とし、2次以上の項を省略すると、式 (3.48) が得られる。

$$\begin{aligned}
F(\kappa_1, \varphi_1, k_2, \varphi_2, \omega_2) &= F(\kappa_1^0, \varphi_1^0, k_2^0, \varphi_2^0, \omega_2^0) + \frac{\partial F}{\partial \kappa_1} \Delta\kappa_1 + \frac{\partial F}{\partial \varphi_1} \Delta\varphi_1 \\
&\quad + \frac{\partial F}{\partial \kappa_2} \Delta\kappa_2 + \frac{\partial F}{\partial \varphi_2} \Delta\varphi_2 + \frac{\partial F}{\partial \omega_2} \Delta\omega_2 = 0
\end{aligned} \tag{3.48}$$

上式の微係数および定数項は、標定要素の近似値を用いて計算し、式 (3.49) の観測方程式が得られる。

$$\begin{aligned} & \begin{vmatrix} X_1 & 0 \\ Y_2 & Z_2 \end{vmatrix} \Delta\kappa_1 + \begin{vmatrix} 0 & -X_1 \\ Y_2 & Z_2 \end{vmatrix} \Delta\varphi_1 + \begin{vmatrix} Y_1 & Z_1 \\ X_2 & 0 \end{vmatrix} \Delta\kappa_2 + \begin{vmatrix} Y_1 & Z_1 \\ 0 & -X_2 \end{vmatrix} \Delta\varphi_2 \\ & + \begin{vmatrix} Y_1 & Z_1 \\ -Z_2 & Y_2 \end{vmatrix} \Delta\omega_2 + \begin{vmatrix} Y_1 & Z_1 \\ Y_2 & Z_2 \end{vmatrix} = 0 \end{aligned} \quad (3.49)$$

式 (3.49) に最小二乗法をあてはめて、微小補正量  $\Delta\kappa_1, \Delta\varphi_1, \Delta\kappa_2, \Delta\varphi_2, \Delta\omega_2$  を求め、近似値を補正して収束するまでくりかえすと、標定要素の解が得られる。

### 3.7.3 モデル座標の計算

モデル座標は、相互標定により求められた全観測点の値を使用して求める。これにはいくつかの方法があるが、本研究では共面条件式を用い投影中心を結ぶ方法で行った。

モデル座標  $(X_m, Y_m, Z_m)$  は、式 (3.50) で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} X_m &= \frac{t_1(X_1 - X_{01}) + X_{01} + t_2(X_2 - X_{02}) + X_{02}}{2} \\ Y_m &= \frac{t_1(Y_1 - Y_{01}) + Y_{01} + t_2(Y_2 - Y_{02}) + Y_{02}}{2} \\ Z_m &= \frac{t_1(Z_1 - Z_{01}) + Z_{01} + t_2(Z_2 - Z_{02}) + Z_{02}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (3.50)$$

ただし、

$$(X_{01}, Y_{01}, Z_{01}) = (0, 0, 0), \quad (X_{02}, Y_{02}, Z_{02}) = (1, 0, 0),$$

$(X_1, Y_1, Z_1)$  および  $(X_2, Y_2, Z_2)$  は、式 (3.47) で求めた値、

$$t_1 = \frac{Z_2}{X_1 \cdot Z_2 - Z_1(X_2 - 1)}, \quad t_2 = \frac{Z_1}{X_1 \cdot Z_2 - Z_1(X_2 - 1)}$$

### 3.7.4 絶対標定

絶対標定はモデル座標  $(X_m, Y_m, Z_m)$  を使用して、観測対象の絶対座標値を求める方法である。計算手順は次のとおりである。

#### (1) 重心座標の計算

式 (3.51), (3.52) により重心を求め、重心を原点とした座標系に変換する。

$$\left. \begin{aligned} X_{m0} &= \left\{ \sum_{i=1}^l X_{mi} \right\} / j \\ Y_{m0} &= \left\{ \sum_{i=1}^l Y_{mi} \right\} / j \\ Z_{m0} &= \left\{ \sum_{i=1}^l Z_{mi} \right\} / k \end{aligned} \right\} \quad (3.51)$$

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= \left\{ \sum_{i=1}^l X_i \right\} / j \\ Y_0 &= \left\{ \sum_{i=1}^l Y_i \right\} / j \\ Z_0 &= \left\{ \sum_{i=1}^l Z_i \right\} / k \end{aligned} \right\} \quad (3.52)$$

ここで、

- $X_i, Y_i, Z_i$  : 基準点座標
- $X_{mi}, Y_{mi}, Z_{mi}$  : 基準点のモデル座標
- $j$  : 平面の基準点数
- $k$  : 高さの基準点数

#### (2) 近似縮尺の計算

平面位置基準点  $(X, Y)$  を用いて、式 (3.53), (3.54) の関係より係数  $a, b$  を算出し、式 (3.55) により概略の縮尺を求める。

$$X_i = a \cdot X_{mi} - bY_{mi} \quad (3.53)$$

$$Y_i = b \cdot X_{mi} + aY_{mi} \quad (3.54)$$

$$S = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (3.55)$$

ここで,

$X_i, Y_i$  : 基準点平面座標

$X_{mi}, Y_{mi}$  : 基準点のモデル座標

$S$  : 縮尺

### (3) モデル座標の縮尺補正

モデル座標のうち、基準点に関するものについて、式 (3.56), (3.57), (3.58) で縮尺を補正する.

$$X'_{mi} = S \cdot X_{mi} \quad (3.56)$$

$$Y'_{mi} = S \cdot Y_{mi} \quad (3.57)$$

$$Z'_{mj} = S \cdot Z_{mj} \quad (3.58)$$

ここで,

$X'_{mi}, Y'_{mi}, Z'_{mj}$  : 縮尺補正したモデル座標

### (4) 累積縮尺の計算

近似縮尺で求めた縮尺を式 (3.59) で累積しておく. 縮尺は、収束する段階で修正される.

$$S' = S \cdot S'_{q-1} \quad (3.59)$$

ここで,

$S'$  : 累積縮尺

$S'_{q-1}$  : 収束計算での前の縮尺 ( $S'_0 = 1$ )

(5) 累積回転角度の計算

高さの基準点を用いて、式 (3.60) の関係から、回転角と平行移動量を求める.

$$Y'_{mj} \cdot \omega - X'_{mj} \cdot \varphi + d_Z = H_j - Z'_{mj} - Z_q \quad (3.60)$$

ここで,

$X'_{mj}, Y'_{mj}, Z'_{mj}$  : 縮尺補正された基準点のモデル座標

$\omega, \varphi, d_Z$  : 未知数

$H_j$  : 高さの基準点

$Z_q$  : 前の平行移動量 (初期値は 0 とする)

(6) 累加平行移動量の計算

式 (3.61) で、累加平行移動量を計算する.

$$Z_q = Z_{q-1} + d_Z \quad (3.61)$$

ここで,

$Z_q$  : 累加平行移動量

$Z_{q-1}$  : 1 つ前の累加平行移動量

$d_Z$  : 平行移動量

(7) 回転角の加算処理

式 (3.62), (3.63) で回転角を加算し、式 (3.64) で回転行列を計算する.

$$\Phi = \Phi + \varphi \quad (3.62)$$

$$\Omega = \Omega + \omega \quad (3.63)$$

$$R_q = R \cdot R_{q-1} \quad (3.64)$$

ここで,

- $\Phi$  :  $\varphi$  を累加
- $\Omega$  :  $\omega$  を累加
- $R_q$  : 累積回転行列

(8) 回転変換処理

(7) で求めた  $\Omega, \Phi$  を用いて, すべての観測点 (モデル座標) を, 式 (3.65), (3.66), (3.67) で回転変換する.

$$X''_{mk} = X'_{mk} \cdot \cos \Phi + Z'_{mk} \cdot \sin \Phi \quad (3.65)$$

$$Y''_{mk} = X'_{mk} \cdot \sin \Phi \cdot \sin \Omega + Y'_{mk} \cdot \cos \Omega - Z'_{mk} \cdot \cos \Phi \cdot \sin \Omega \quad (3.66)$$

$$Z''_{mk} = -X'_{mk} \cdot \sin \Phi \cdot \cos \Omega + Y'_{mk} \cdot \sin \Omega + Z'_{mk} \cdot \cos \Phi \cdot \cos \Omega \quad (3.67)$$

ここで,

- $X''_{mk}, Y''_{mk}, Z''_{mk}$  : 縮尺, 回転, 平行移動量を補正したモデル座標

(9) 収束判定処理

累積回転角度で求めた  $\omega, \varphi$  の値が  $10^{-6}$  以下で,  $d_z$  の絶対値が 1 cm 以下の段階で収束計算を終了する.

(10) すべての観測点 (モデル座標) を変換し修正モデル座標値を計算

式 (3.68), (3.69) で修正モデル座標値を計算する.

$$\left. \begin{aligned} X'_{mk} &= S \cdot X_{mk} \\ Y'_{mk} &= S \cdot Y_{mk} \\ Z'_{mk} &= S \cdot Z_{mk} \end{aligned} \right\} \quad (3.68)$$

$$\left. \begin{aligned} X''_{mk} &= X'_{mk} \cdot \cos \Phi + Z'_{mk} \cdot \sin \Phi \\ Y''_{mk} &= X'_{mk} \cdot \sin \Phi \cdot \sin \Omega + Y'_{mk} \cdot \cos \Omega - Z'_{mk} \cdot \cos \Phi \cdot \sin \Omega \\ Z''_{mk} &= -X'_{mk} \cdot \sin \Phi \cdot \cos \Omega + Y'_{mk} \cdot \sin \Omega + Z'_{mk} \cdot \cos \Phi \cdot \cos \Omega \end{aligned} \right\} \quad (3.69)$$

(11) 平面および高さの調整計算

式 (3.70), (3.71), (3.72) で, 座標を調整する.

$$H'_k = a + b \cdot Y''_{mk} + c \cdot X''_{mk} + Z''_{mk} \quad (3.70)$$

$$X'_k = d + f \cdot X''_{mk} + g \cdot Y''_{mk} \quad (3.71)$$

$$Y'_k = e - g \cdot X''_{mk} + f \cdot Y''_{mk} \quad (3.72)$$

ただし,  $a, b, c, d, e, f, g$  は未知数.

(12) 傾斜補正

$X'_k, Y'_k$  を式 (3.73), (3.74) で補正する.

$$X'_k = X'_k - c \cdot Z''_{mk} \quad (3.73)$$

$$Y'_k = Y'_k - b \cdot Z''_{mk} \quad (3.74)$$

### 3.7.5 射影変換式による外部標定要素の初期値の計算

相互標定・絶対標定によりパスポイントの地上座標と写真座標が求められる. 本研究では, これらの値を射影変換式に代入して, 外部標定の初期値を算出した.

式 (3.16) を式 (3.75), (3.76) の地上座標を求める式に書き直す. (添字  $i, j$  は省略する.)

$$\begin{aligned}
X &= (Z - Z_0) \frac{a_{11}x + a_{21}y - a_{31}c}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}c} + X_0 \\
&= \frac{\{a_{11}(Z - Z_0) + a_{13}X_0\}x + \{a_{21}(Z - Z_0) + a_{23}X_0\}y - \{a_{31}(Z - Z_0) + a_{33}X_0\}c}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}c}
\end{aligned} \tag{3.75}$$

$$\begin{aligned}
Y &= (Z - Z_0) \frac{a_{12}x + a_{22}y - a_{32}c}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}c} + Y_0 \\
&= \frac{\{a_{12}(Z - Z_0) + a_{13}X_0\}x + \{a_{22}(Z - Z_0) + a_{23}Y_0\}y - \{a_{32}(Z - Z_0) + a_{33}Y_0\}c}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}c}
\end{aligned} \tag{3.76}$$

測定対象面が平面の場合には，式 (3.77)，(3.78) の射影変換式を用いることができる。

$$X = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{b_7x + b_8y + 1} \tag{3.77}$$

$$Y = \frac{b_4x + b_5y + b_6}{b_7x + b_8y + 1} \tag{3.78}$$

射影変換式は測定対象面が水平面でなく鉛直面や斜面であっても，平面であれば成り立つ。また， $x, y$  は主点を原点とする写真座標である必要はなく任意の座標系でよい。

外部標定要素は測定平面が平面であると仮定し，つまり  $Z = Z_m$  ( $Z_m$  は平均標高) とおいて，式 (3.75) と式 (3.77)，式 (3.76) と式 (3.78) 式を比較することにより式 (3.79) のように求められる。

$$\left. \begin{aligned}
\omega &= \tan^{-1}(cb_8) \\
\varphi &= \tan^{-1}(-cb_7 \cos \omega) \\
\kappa &= \tan^{-1}(-b_4/b_1) \quad (\varphi = 0) \\
\kappa &= \tan^{-1}(b_2/b_5) \quad (\varphi \neq 0, \omega = 0) \\
k &= \tan^{-1}\{- (A_1A_3 - A_2A_4)/(A_1A_2 + A_3A_4)\} \quad (\varphi \neq 0, \omega \neq 0) \\
Z_0 &= c \cdot \cos \omega \sqrt{(A_2^2 + A_3^2)/(A_1^2 + A_4^2)} + Z_m \\
X_0 &= b_3 - (\tan \omega \sin \kappa / \cos \varphi - \tan \varphi \cos \kappa)(Z_m - Z_0) \\
Y_0 &= b_6 - (\tan \omega \cos \kappa / \cos \varphi + \tan \varphi \sin \kappa)(Z_m - Z_0)
\end{aligned} \right\} \tag{3.79}$$

ここで,

$$A_1 = 1 + \tan^2 \varphi$$

$$A_2 = b_1 + b_2 \tan \varphi / \sin \omega$$

$$A_3 = b_4 + b_5 \tan \varphi / \sin \omega$$

$$A_4 = \tan \varphi / (\cos \varphi \tan \omega)$$

$b_1 \sim b_8$ を求めるには, 式 (3.77) および式 (3.78) の分母を払い, それぞれ式 (3.80), (3.81) とし, 最小二乗法を適用する.

$$x_i b_1 + y_i b_2 + b_3 - x_i X_i b_7 - y_i X_i b_8 = X_i \quad (3.80)$$

$$x_i b_4 + y_i b_5 + b_6 - x_i Y_i b_7 - y_i Y_i b_8 = Y_i \quad (3.81)$$

### 3.7.6 改良型バンドル調整法のプログラミングについて

プログラムの流れは次のようになる.

- (1) 機械座標からカメラ座標への変換
- (2) 相互標定によりモデル座標を計算
- (3) 絶対標定により地上座標 (概略値) を計算
- (4) 射影変換式により外部標定要素を計算
- (5) バンドル調整計算

図-3.13 に改良型バンドル調整法プログラムの流れを示す.

図-3.14~図-3.16 に作成したプログラムの操作法を示す.

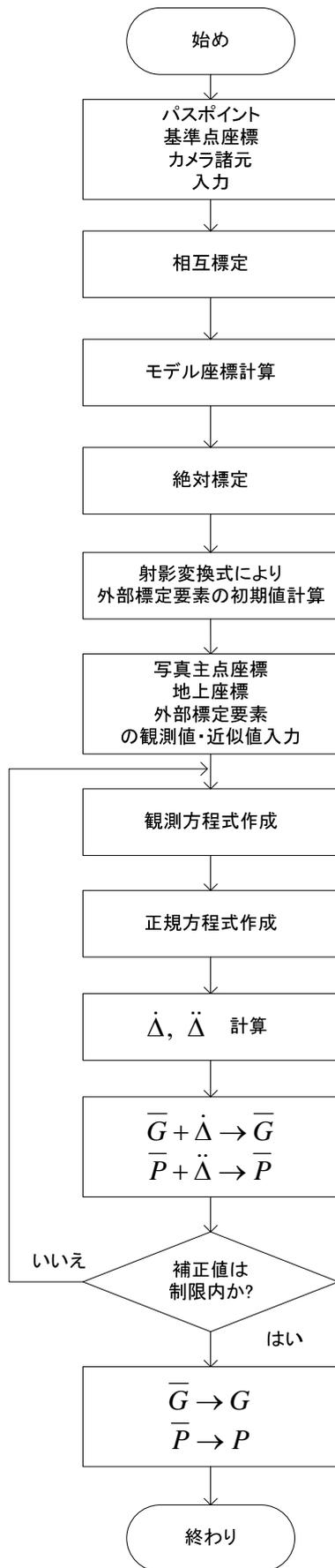


図-3.13 改良型バンドル調整法のプログラムの流れ

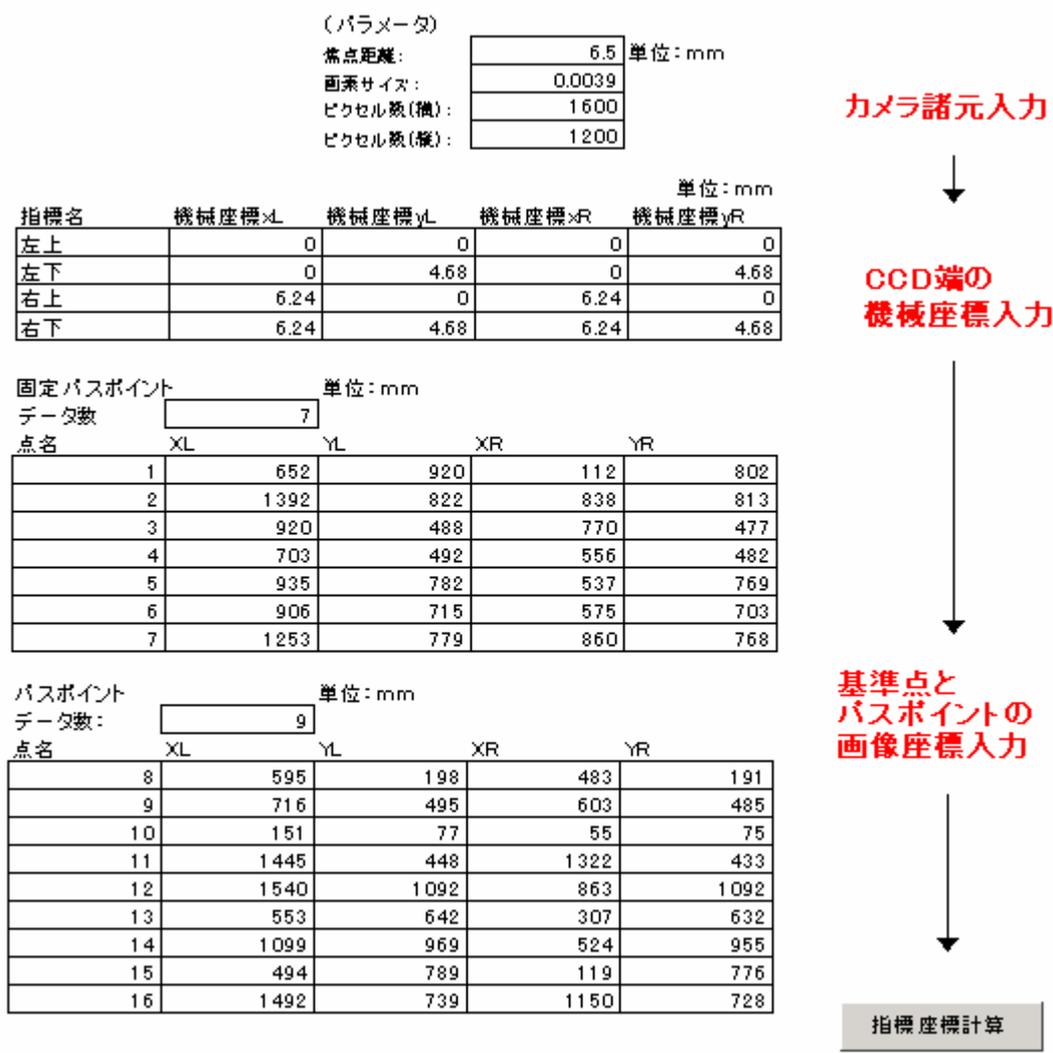


図-3.14 バンドル法プログラム操作法1 (指標座標計算)

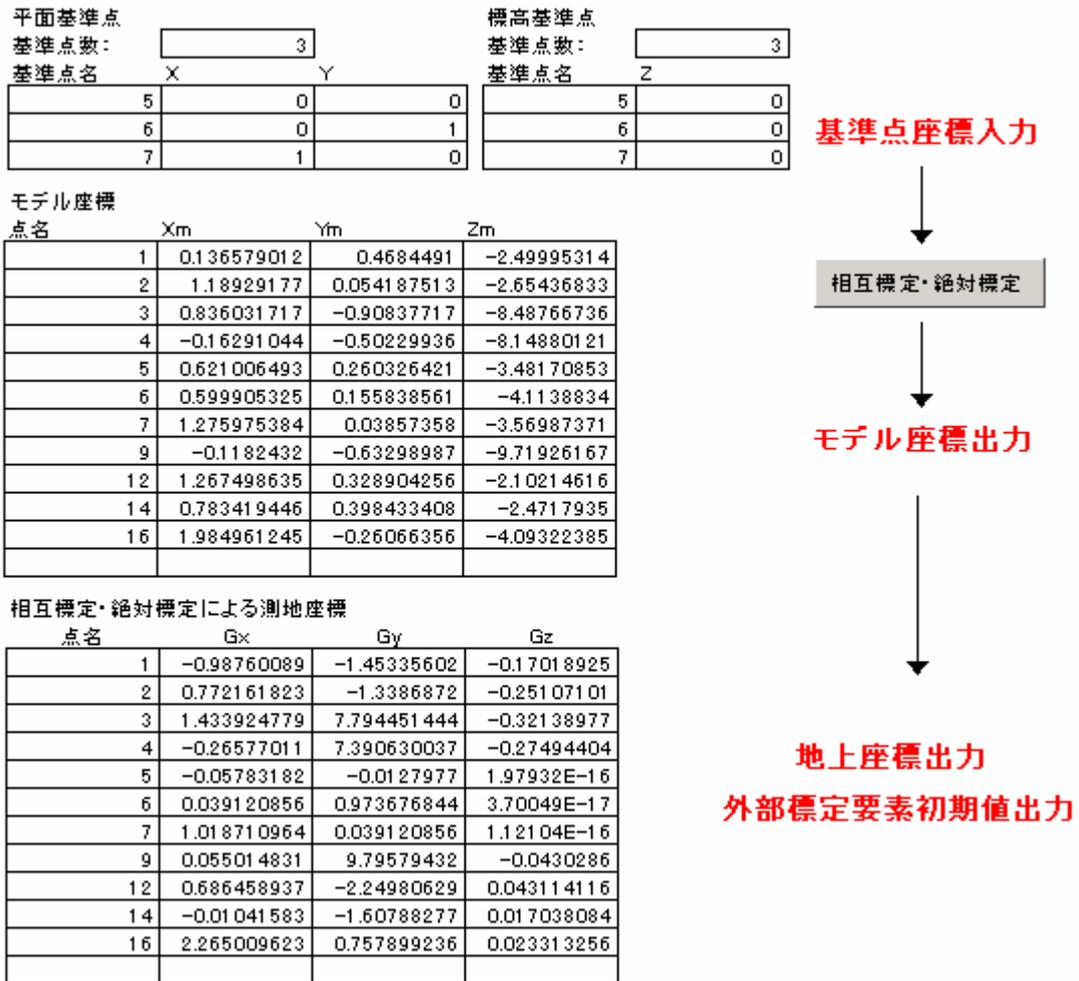


図-3.15 バンドル法プログラム操作法2 (相互標定・対地標定計算)

バンドル法に用いる基準点(標定点データ)

点名	Gx	Gy	Gz
1	-0.98760089	-1.45335602	-0.17018925
2	0.772161823	-1.3386872	-0.25107101
3	1.433924779	7.794451444	-0.32138977
4	-0.26577011	7.390630037	-0.27494404
5	-0.05783182	-0.0127977	1.97932E-16
0			

繰返し回数	現在
20	20

標定点(点名)入力

計算繰返し回数入力

バンドル調整計算

外部標定要素出力

バンドル法結果

	X0	Y0	Z0	$\omega$	$\phi$	K
写真 I	1.066351408	8.736275356	0.887131956	1.833320558	-0.07321203	0.525591622
写真 II	1.154630528	11.2977826	1.595195053	1.791949093	0.120696197	0.124721201

図-3.16 バンドル法プログラム操作法3 (バンドル法計算)

## 参考文献

- 1) 笹川正, 橘菊生: 空中直接定位システム (GPS/IMU) の現状と課題, APA No.82-14, pp. 92-97, 2002.
- 2) 水尾藤久: 教程写真測量, 山海堂, pp. 3-6, 1985.
- 3) Mikhail, E. M. : An Introduction to Non-Topographic Photogrammetry, in Non-Topographic Photogrammetry, ed. by ASPRS, pp. 1-6, 1989.
- 4) Fraser, C. S: 工業計測技術と写真測量, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 29, No. 6, pp. 52-61, 1990.
- 5) Atkinson, K. B. : Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Whittles, 1996.
- 6) 秋本圭一, 服部進, 岡本厚, 井本治孝: CCD カメラを用いた大型構造物の3次元精密計測, 計測自動制御学会講演会 (千葉), 109 C-1, 1998. 7.
- 7) 嘉数清: 航空写真解析によるモズク漁場調査, <http://subtropics.sakura.ne.jp/content/category/6/26/47/>, 2002
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 松岡龍治: 現代測量学 写真測量②, 日本測量協会, pp. 327-377, 1985.
- 11) 村井俊治: 解析写真測量, 日本写真測量学会, 1983.
- 12) 村木広和, 田中成典, 古田均: デジタル測量入門, 森北出版, 2000.
- 13) 矢口彰: 現代測量学 写真測量①, 日本測量協会, p. 402, 1983.

## 第4章 写真測量による沿岸域測量システムの有効性の検証

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・内野, 1973)。 (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)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・E. Guelch, 1987)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)。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・山口, 1977, 黒澤・田中, 2001)はあるが、測深を目的とする利用や研究はあまり進んでいないのが現状である。

本研究においては、デジタルカメラで撮影した浅海域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。4.2節では、陸上に標定点を設置した場合で、一般の写真測量とほぼ同じ技術であるが、海水の屈折率を考慮した点や、浅海域測量に斜め写真を用いる場合に考慮すべき点について述べる。次に、4.3節では、標定点を全く設置しない場合で、3.7節の考えにもとづき外部標定要素を求めた結果と、図化の詳細について述べる。

### 4.1 内部標定と外部標定

図化作業までの順序は、以下に示すように、内部標定、外部標定の順序で行う。

#### (1) 内部標定

まず、使用したカメラの内部標定は、写真-4.1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(中田・近津, 2000)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る。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、式(3.6)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。このようにして算出したディストーション係数を表-4.1に示す。

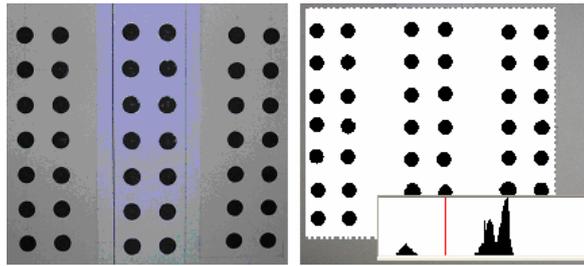


写真-4.1 内部標定用ターゲットと二値化の状態

表-4.1 ディストーション係数

1次	2次	3次
$-8.123 \times 10^{-5}$	$3.897 \times 10^{-6}$	$-4.755 \times 10^{-8}$

## (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-4.1は外部標定要素の初期値を求める概念図である。

標定点を設置しない場合は、標定点の初期値を陸上に関しては1/25,000地形図より読取り、海底は海上保安庁が沖縄県石垣島吉原海岸で実施したレーザー測深のデータから読取った。図-4.2、図-4.3は、それぞれ陸上と海底の標定点の初期座標取得の概念図である。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、反復計算を行った。

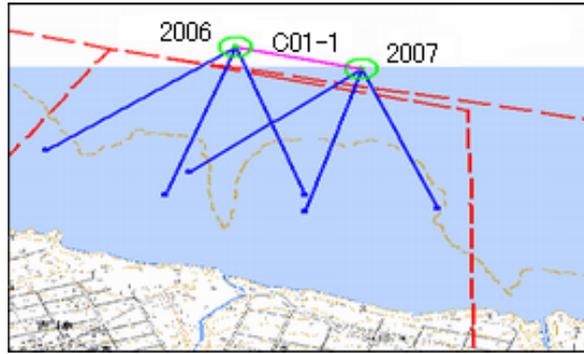


図-4.1 図化機のグラフィカルな機能で外部標定要素の初期値を求める概念図



図-4.2 陸上における標定点の初期座標の取得の概念図(1/25,000 地形図より読定)

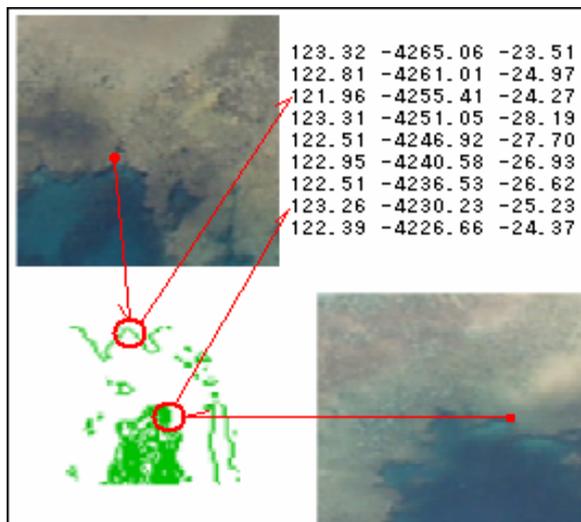


図-4.3 海底における標定点の初期座標の取得の概念図 (レーザー測深データより読定)

## 4.2 陸域の現地基準点データがある場合の写真測量

### 4.2.1 現地調査

撮影地域である鹿児島県奄美市土盛海岸の付近には、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 とされているが、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も実施した。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。なお、計算処理はバンドル法による収束計算を行い、収束計算前後における写真座標の平均二乗誤差が  $1 \mu\text{m}$  以下になった時点で収束したとみなした。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、制約条件等を確認した(日本写真測量学会, 1983 参照)。

### 4.2.2 データ解析

図-4.4 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 3 次元測量 (3D 計測) した点を記入してある。また、図-4.5 は 3D 計測の状況を示している。

以下に、3D 化の手順を示す。

- (a) カメラの内部標定要素を調べる。
- (b) 2 枚の写真に共通な標定点を選点し、標定計算を行う。
- (c) 3D 計測。
- (d) 不等三角網 (TIN) の作成。
- (e) TIN を元に等高線描画。
- (f) 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-4.2 および表-4.3 に示す。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、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  $33.6^\circ$  , 潮位+30cm であった.

なお, 海水による屈折の補正(図-4.6)については, 式 (4.1), (4.2) に示す Meijer の式 (佐藤・内野, 1973) を用いて行うことが可能である.

$$h = Fh' \quad (4.1)$$

$$F = \frac{\frac{B}{H+h'}}{\frac{s}{\sqrt{(n^2-1)d_1^2 + (H+h')^2 n^2}} + \frac{t}{\sqrt{(n^2-1)d_2^2 + (H+h')^2 n^2}}} \quad (4.2)$$

ただし,

$h$  : 補正後の水深,  $h'$  : 見かけの水深,  $F$  : 補正係数,  $B$  : 撮影基線長,  $H$  : 撮影高度,  $n$  : 海水の屈折率,

$d_1, d_2$  : 撮影位置 I, II と測定点までのそれぞれの水平距離,

$s$  : 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,

$t$  : 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,

$C'_1, C'_2$  : 屈折点

である.

また, 水平分解能  $\Delta XY$  と奥行分解能  $\Delta Z$  は, 次式で求めた.

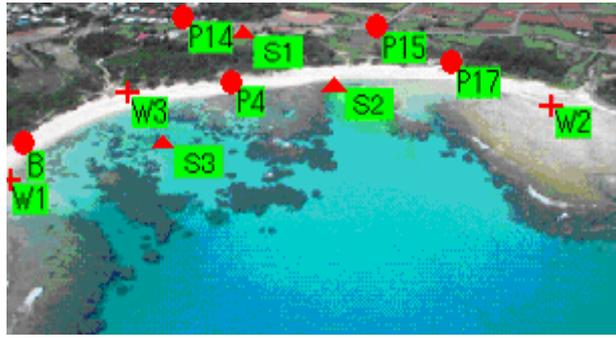
$$\Delta XY = (L/c) \times \Delta p \quad (4.3)$$

$$\Delta Z = (L/B) \times \Delta XY \quad (4.4)$$

ここで,

$L$  : 撮影距離,  $c$  : 焦点距離,  $\Delta p$  : 画像分解能,  $B$  : 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-4.4 標定点および計測点

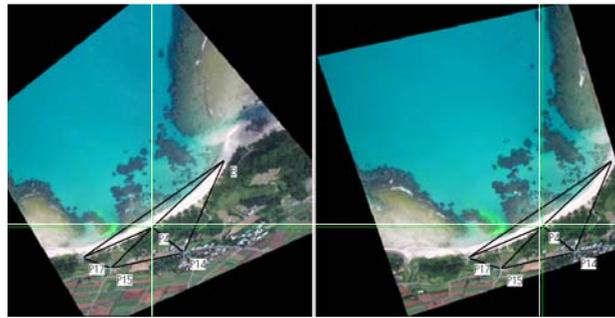


図-4.5 3D 形状計測の様子

表-4.2 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-4.3 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

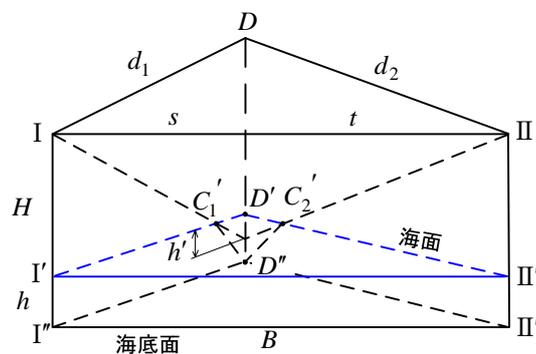


図-4.6 海水による屈折の補正

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-4.4 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、式 (4.5)、(4.6) により算出したものである。

$$D = (e/q)c \quad (4.5)$$

$$H = D \cos \theta \quad (4.6)$$

ここで、

$D$  : 主点と被写体との距離,  $H$  : 撮影高度,  $\theta$  : 鉛直方向からのカメラの傾き,

$c$  : 焦点距離,  $q$  : 1画素の大きさ,  $e$  : 水平分解能  
である.

表-4.4 カメラの角度と撮影高度の関係 (水平分解能 0.1m)

$\theta^\circ$	H(m)
0	229.5
20	215.7
40	175.8
60	114.8
80	39.9

#### 4.2.3 図化

図-4.7 は作成した 3D モデルである. また, 図-4.8 は, オルソ画像上に被写体表面の等高線 (主曲線間隔 1 m) を自動発生させたものであが, 基準点が少ないために大まかな等高線となっている.

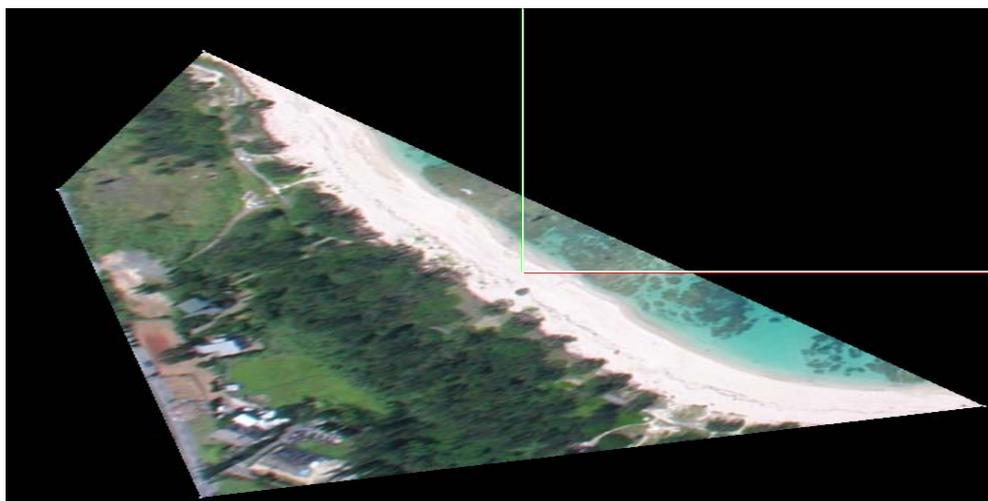


図-4.7 3D モデル

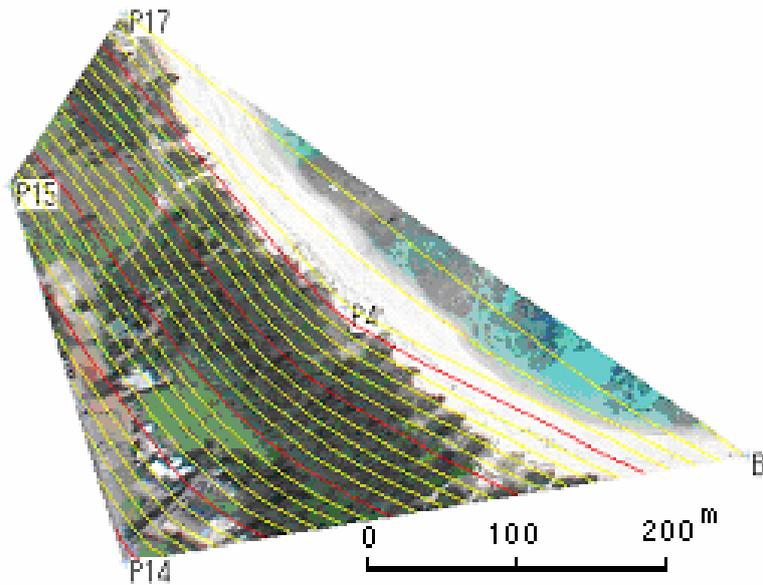


図-4.8 被写体表面の等高線とオルソ画像

#### 4.2.4 考察

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。しかし、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-4.2 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ついても検討する必要がある。

#### 4.3 陸域の現地基準点データが無い場合の写真測量

##### 4.3.1 現地調査

本研究における測量対象海域である沖縄県石垣島吉原海岸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（大田・高津，1987）が行われている。写真-4.2 は撮影高度約 600m の上空からデジタルカメラで撮影した 1 対の写真であるが、1/3 がサンゴ礁に覆われており、標定点の設置は危険を伴う困難な海域である。

##### 4.3.2 データ解析

図-4.9 に本手法のフローチャートを示す。また、表-4.5 にバンドル調整計算結果を示す。なお、表-4.6 は標定点の残差であり、この場合の収束までの繰返し回数は 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、垂直方向誤差 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 地形図の読取り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。

海水による屈折の補正については、Meijer の式を用い補正係数を算出し、図-4.10 には、算出した撮影位置と補正係数の関係を示す。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（中村，1982）することが必要である。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。

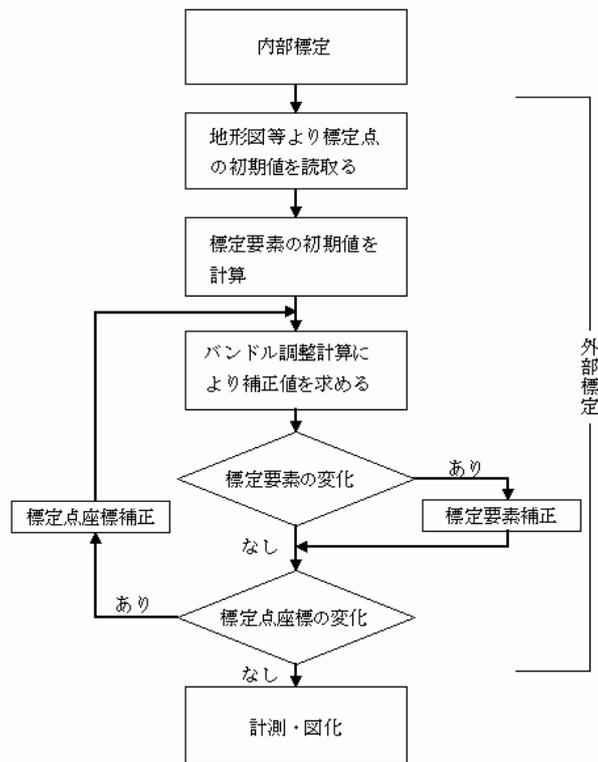


図-4.9 本手法の流れ

表-4.5 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
$\kappa$	2.988	3.186	3.053	2.916
$\phi$	0.000	0.133	0.000	0.067
$\omega$	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-4.6 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

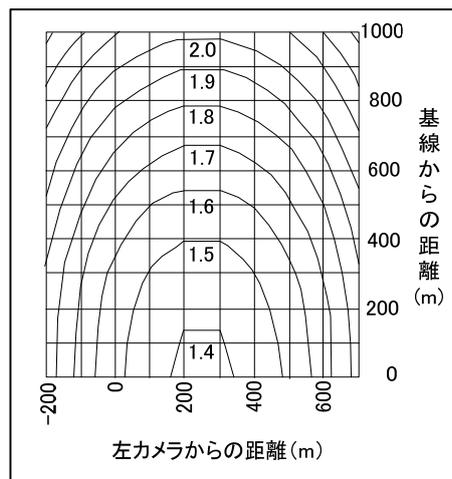


図-4.10 撮影位置と補正係数Fの関係

#### 4.3.3 図化

図-4.11は、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。

また、図-4.12は、図-4.11におけるA-A'、B-B'、およびC-C'測線の断面図である。本研究に

使用した写真では、撮影縮尺の関係で1mまでの高低差の測定は可能であったが、それ以上の微小な凹凸は表現できていない。しかしながら、沖縄海域で見られるサンゴ礁地形の典型的なパターン（高橋，1991）である，浜，後方礁原，礁池，前方礁原，礁斜面が本図から認識可能である。



写真-4.2 ヘリコプターから撮影した斜め写真

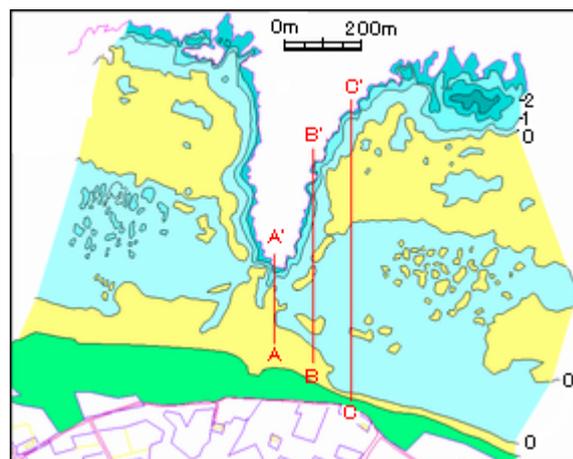


図-4.11 等深線（1m 間隔）の図化

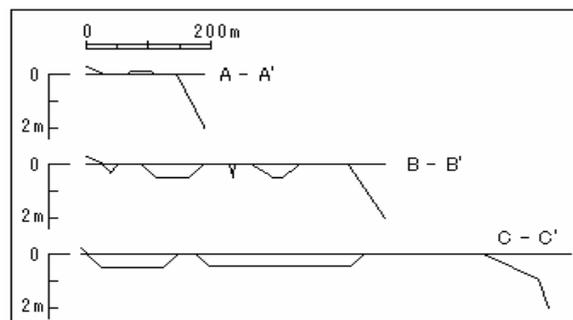


図-4.12 断面図

#### 4.3.4 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差異がなかった。これは、レンズのディストーションが小さいということと、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実施方法そのものに問題があった可能性も考えられる。

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は、メスマーク（実体観測をしながら対応する地物の位置を定める場合の目印）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かった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分かり、何らかの改善が必要である。

さらに本手法において、標定計算において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中でテーラー展開式を用い、2次以上の項を省いて処理していることが主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。

このように、沿岸域で標定点がとりにくい、あるいは、全く設置しない場合でも、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。

## 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) 中田隆司, 近津博文: 民生用デジタルカメラを用いた3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.
- 8) 日本写真測量学会: 解析写真測量, 日本写真測量学会, 1983.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 高橋達郎: サンゴ礁, 古今書院, pp. 142-172, 1991.

## 第5章 結論

従来の地形測量においては、点と線群による地形図作成に主眼が置かれていた。しかし、コンピュータの発達した現在では、例えば、地理情報システム（GIS : Geographic Information System）に見られるように、単なる地理的位置だけでなく、位置に関する情報を持ったデータ（空間データ）を用いて高度な分析や迅速な判断を可能にするため、視覚的に表示するためのデータの需要が高まっている。つまり、空間分解能の高い測量が必要とされており、陸上においては、写真測量や、リモートセンシング技術により、必要なデータの取得が可能になっている。しかしながら、海上においては、海水という不透明な覆いが測量の妨げとなって、特に浅海域の測量は岩礁などが障害物となり、測量の困難地域ともなっている。

本研究においては、これまで述べたように、水深 5m 程度までの測深を目標として、比較的安価で、手軽に測量できる技術として、民生用デジタルカメラで撮影された斜め写真を用いて、写真測量法の開発を行った。斜め写真は垂直写真と異なり、自由な撮影姿勢で手軽に撮影できる反面、撮影位置とカメラの回転の情報（外部標定要素）を求めることが難しく、これまで地形図作成や正射投影写真（オルソフォト）に利用されることはほとんどなかった。このことは、逆に外部標定要素を求める方法が確立されれば、斜め写真が大いに利用されることを意味する。

本研究で用いた写真はヘリコプターから撮影したものである。ヘリコプターのチャーター料金等が安価であるかどうかの議論に対し、コストの計算は行ってはいないが、他の測量手法で行った場合の必要器材、作業人数、情報量、そして危険性など考慮すると、コストの軽減になっていると考えられる。さらに、民生用デジタルカメラについては、他の光学式・電子式測量機に比べると格段に安価である。

本研究では、まず相互標定で隣接写真の相互の位置関係を規正し、次に絶対標定（対地標定）で地上基準点とモデル上の対応点を一致させた。この段階までは、アナログ図化機における機械的標定と同じような考え方である。アナログ図化機の場合は、ここから図化作業を始められるが、デジタル図化機の場合は、カメラの外部標定要素が必要であり、さらに射影変換することによりカメラの外部標定要素を算出した。射影変換は、撮影地域が平坦であることを前提とした変換であるので、計算には平均標高を用いるが、それゆえ、算出された外部標定要素は、まだ誤差が大きく、完全ではない。この誤差を消去するために、バンドル法を用いて最終的な解を求めた。さらに、標定点が全くない（地形図などから近似座標を読取る）場合の外部標定計算にも、一般逆行列を用いたフリーネット解法により対応させた。

外部標定要素が求められれば、後は、図化機による図化である。第4章において、標定点を設置した場合と、全く設置しない場合について、浅海域における写真測量の応用について述べたが、要点をまとめると次のようになる。

- 1) 標定点を設置する場合、測量地域を取り囲むような配置が必要である。
- 2) 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。
- 3) 陸上の写真測量では、標定点が多い場合、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を行うことができるが、海上では、標定点を多く取り難いので、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。
- 4) 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ー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。
- 5) 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。
- 6) 標定点が全くない場合において、水深の測定は、標定誤差の大きい部分や写真周縁部では測定が困難であったが、海底部は水深5mぐらいまでの測定は可能であった。
- 7) 砂地や海底の地物に高さを合わせるのは、メスマークの接地状態が判り難く熟練を要する。

本研究の意義は、測量困難な浅海域測量の手法として、民生用デジタルカメラで撮影した斜め写真を用いて写真測量の開発を行ったことである。また、その中で、計算処理としては煩雑であるが、相互標定、絶対標定、射影変換による初期値計算、一般逆行列を取り入れたバンドル調整法と、一連の計算処理を行うというユニークな方法で、斜め写真の標定計算を可能にした点にある。

今後の課題として、より高精度の測定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ので、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、奥行分解能が水平分解能よりかなり落ちるので、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、距離に関する重みに関しても検討する必要がある。

## 謝辞

本研究を遂行し、まとめるにあたり、多くの方々にお世話になりました。ここに感謝の意を述べさせていただきます。

まず、鹿児島大学大学院理工学研究科博士後期課程への入学と本研究のきっかけを与えていただき、終始一貫して深い知識と洞察力と熱意をもって研究の方針や内容についての事細かな御指導を賜りました鹿児島大学水産学部准教授（前鹿児島大学工学部助教授）西隆一郎先生に、心より感謝し御礼申し上げます。

西先生が鹿児島大学水産学部へ異動された後、鹿児島大学工学部海洋土木工学科教授 佐藤道郎先生に指導教員主査としてご指導ご鞭撻を賜りました。佐藤先生には研究に向かう姿勢や研究に関する困難克服のための具体的な方策まで、ていねいに教えていただきました。心より感謝申し上げます。

佐藤先生が予備審査の後、急に体調を崩されたので、鹿児島大学工学部海洋土木工学科教授 河野健二先生が主査として学位論文審査の労をお執りくださいました。先生には度重なる機会において多大なる御指導、貴重な御助言をいただきました。心より感謝申し上げます。

鹿児島大学工学部海洋土木工学科教授 北村良介先生と鹿児島大学工学部海洋土木工学科教授 浅野敏之先生には副査としてご指導いただきました。心より感謝申し上げます。

大学院理工学研究科に在学中、研究活動や学生生活において公私にわたり暖かく支えていただき、多くの楽しく貴重な経験を与えていただきました皆様に、心より感謝申し上げます。

さらに、本論文で用いた沿岸域の空中写真は、第10管区海上保安本部、第11管区海上保安本部所属のヘリコプターにより撮影されたものであり、加えて、標定点補正に用いたレーザー測深データは、第6管区海上保安本部で測深したものを利用させていただきました。関係諸氏に紙面を借りて誠意を表させていただきます。

また、鹿児島大学大学院理工学研究科博士後期課程に在職のままで入学することを許可くださいました学校法人川島学園 川島英和理事長に心から感謝します。

最後に、本論文をまとめるにあたり、時間を与えてくれ、こころの支えになってくれた妻津代子、論文の完成に向けて応援をしてくれた長男龍聖、長女絵梨佳、次男耕作、そして励ましてくれた母と天国の父に感謝します。

2008年3月12日

## 付録 A

### 発表論文

1. 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. 911-916, 2006.
2. 田中龍児, 西 隆一郎, 佐藤道郎, 高江洲剛 : サンゴ礁海域を対象とした写真測量(測深)法の開発, 海洋開発論文集 第 23 巻, pp. 543-547, 2007.

## 付録B

### B.1 一般逆行列を取り入れたバンドル調整法について

正規方程式の係数から作られる行列  $N = A'A$  は正則でなければならない。しかし、 $|N| = 0$  であれば、 $N^{-1}$  は求められないから正規方程式の解が得られず、バンドル調整された未知のパラメータがもつ精度、分散-共分散行列も得られない。標定点を全く用いない場合は、 $|N| = 0$  のケースであり、この問題は一般逆行列の理論により解くことができる。第3章で述べた改良型バンドル調整法のプログラムは一般逆行列を取り入れており、基準点のあるなしに関係なく外部標定要素を求めることが可能になっている。

線形化された共線条件式は、式 (B.1) のように表すことができる。

$$A_1x_1 + A_2x_2 = e \quad (\text{B.1})$$

または、これらをまとめて、式 (B.2) のように表す。

$$Ax = e \quad (\text{B.2})$$

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、 $A = (A_1 \ A_2)$ ,  $x = (x_1' \ x_2')$  である。

係数行列  $A$  が正則であれば、式 (B.2) の最小二乗解は、式 (B.3) で与えられる。

$$x = (A'A)^{-1}A'e \quad (\text{B.3})$$

しかし、標定点を設置しない場合、 $A$  にランク落ちが生じ、 $A'A$  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。例えば、 $m \times m$  の正方行列  $A$ （正規方程式における  $A'A$ ）のランク  
が  $m$  であるとき、式 (B.4) を満足する  $A^{-1}$  が存在する。

$$AA^{-1} = A^{-1}A = I_m \quad (\text{B.4})$$

これに対して、 $A$  が正則でない方程式に解があるならば、それらの数多くの解の1つを、式 (B.5) と表したとき、 $A^-$  を  $A$  の一般逆行列という。

$$x = A^- A^t e \quad (\text{B.5})$$

## B.2 一般逆行列の性質

一般逆行列には次のような性質がある。

- 1)  $A$  が  $n \times m$  の行列なら  $A^-$  は  $m \times n$  の行列である。
- 2)  $A^- A = A^0$  とおくと  $A^0$  は巾等行列である。
- 3)  $AA^0 = A$ 、また、 $\text{rank}A = \text{rank}A^0 = \text{trace}A^0$  である。
- 4)  $AX = 0$  の一般解は、 $X = (I - A^0)M$  で、 $M$  は  $X$  と同じ大きさの任意のベクトルである。
- 5) 4) をさらに一般化して、次の定理が得られる。

方程式  $AX = L$  が解をもつならば、式 (B.6) で一般解を表すことができる。

$$X = A^- L + (I - A^- A)M \quad (\text{B.6})$$

解をもつための条件は、 $AA^- L = L$  である。

なぜならば、斉次方程式  $AX = 0$  の一般解が、 $X = (I - A^- A)M$  なることは、式 (B.7) で明らかである。

$$AX = (A - AA^- A)M = 0 \quad (\text{B.7})$$

次に、非斉次方程式の一般解は、その特殊解  $X = A^- L$  ( $AA^- L = L$ ) と斉次方程式の一般解  $(I - A^- A)M$  との和で表される。すなわち、式 (B.6) は、 $AX = L$  の一般解になっている。

## B.3 一般逆行列の作り方

$A$  を任意の行列とすると、 $AA^- A = A$  を満足する  $A^-$ 、すなわち、一般逆行列は必ず存在するが一意的ではなく、いろいろな種類の一般逆行列を作ることができるが、ここでは、正規方程式の

一般逆行列を求める場合について述べる。つまり、 $|A'A|=0$  の場合である。

$A$  の下と右に  $A$  と直交する行列  $D$  および  $C$  を図-B.1 のように付け足して正方行列  $U$  を作る。

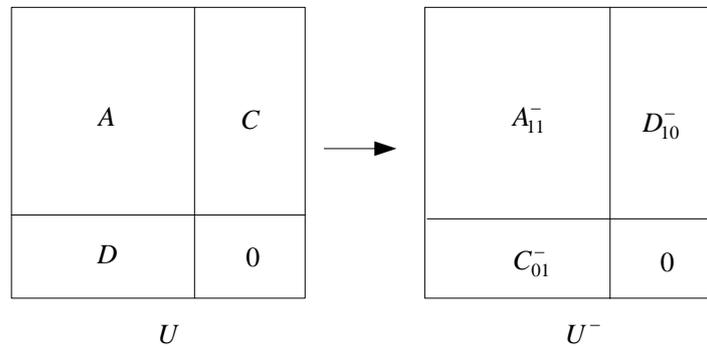


図-B.1 一般逆行列のつくり方

$$U = \begin{pmatrix} A & C \\ D & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{B. 8})$$

ただし、 $A^t C = 0$ ,  $AD^t = 0$ ,  $C^t C \neq 0$ ,  $DD^t \neq 0$  である。

次に、式 (B.9) を計算する。

$$U^{-1} = (U^t U)^{-1} U^t \quad (\text{B. 9})$$

式 (B.9) の右辺を式 (B.10) のようにおくと、 $A_{11}^-$  は、 $U$  における  $A$  を  $U^{-1}$  において転置した位置にある部分行列である。

$$U^{-1} = \begin{pmatrix} A_{11}^- & D_{10}^- \\ C_{01}^- & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{B. 10})$$

$A_{11}^-$  を計算する式としては、 $|AA^t + CC^t| \neq 0$  として、式 (B.11) のように求められる。

$$A_{11}^- = A^t (AA^t + CC^t)^{-1} \quad (\text{B. 11})$$

または、 $|A'A + D'D| \neq 0$ として、式 (B. 12) のように求められる。

$$A_{11}^- = (A'A + D'D)^{-1} A' \quad (\text{B. 12})$$

式 (B. 11), (B. 12) は、 $A$ に直交する行列として無数に多くの $C$ および $D$ を選ぶことができるが、 $A_{11}^-$ はユニークに決定される。

式 (B. 11) と式 (B. 12) を比較して重要なことは、 $A_{11}^-$ は $C$ や $D$ の選び方に関係なくユニークに存在することである。

#### B. 4 一般逆行列 $A_{11}^-$ の性質

次に一般逆行列  $A_{11}^-$  の性質を挙げる。

- 1)  $AA_{11}^-A = A$
- 2)  $A_{11}^-AA_{11}^- = A_{11}^-$
- 3)  $AA_{11}^- = (AA_{11}^-)'$
- 4)  $A_{11}^-A = (A_{11}^-A)'$

$A_{11}^-$  は任意の行列  $A$  について必ず存在し、かつユニークである。 $A_{11}^-$  をムーア・ペンローズ型一般逆行列 (Moore-Penrose inverse) (田島・小牧, 2001) という。

#### B. 5 特異値分解

ランク  $r$  の  $n \times m$  行列は、式 (B. 13) の形に分解される。

$$A = U\Sigma V' \quad (\text{B. 13})$$

ここで、 $U$  は  $n$  次直交行列、 $V$  は  $m$  次直交行列、 $\Sigma$  は式 (B. 14) で表される。

$$\Sigma = \begin{pmatrix} D & 0_{r,m-r} \\ 0_{n-r,r} & 0_{n-r,m-r} \end{pmatrix} \quad (\text{B. 14})$$

ここで、 $D = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$ ,  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > 0$  である。

特異値分解を利用する方法は、最小ノルム解 (正規方程式の解  $X$  の中で、ノルムが最小であるも

の) (秋本・服部, 1997) を与える. ノルムは, 式 (B. 15) で表される.

$$\|x\| = \sqrt{(|x_1|^2 + |x_2|^2 + \dots + |x_m|^2)} \quad (\text{B. 15})$$

正規方程式を特異値分解を用いて書き換えると, 式 (B. 16) になる.

$$\Sigma' \Sigma V' X = \Sigma' U' L \quad (\text{B. 16})$$

これより,

$$X = V \Sigma^+ U' L = A_{11}^{-1} L \quad (\text{B. 17})$$

ただし,

$$\Sigma^+ = \begin{pmatrix} D^{-1} & 0_{r,n-r} \\ 0_{m-r,r} & 0_{m-r,n-r} \end{pmatrix}$$

## B. 6 一般逆行列を斜め写真測量の標定計算に用いることについて

一般逆行列を用いると, 外部標定要素を求める場合, 実際に標定点を置かなくても, 地形図から座標を読取った座標を概算値 (初期値) として, 正規方程式を解くことができ, 観測のみの精度を反映した未知量の平均点分散 (mean point variance)  $\bar{\sigma}^2$  を求めることができる.  $\bar{\sigma}^2$  が最小となる観測がベストと評価される.

手持ちカメラで斜め写真を撮影する場合は, 鉛直空中写真と異なり, 外部標定要素の初期値 (カメラの位置, 回転角が全く未知) の誤差が, 調整計算で発散する原因となっている. したがって, 標定計算の前処理計算として一般逆行列を用いて初期値を求めることにより効率的に調整計算を進めることが可能になる. なお, 測地分野では与点を未知点として扱う場合は, 自由網平均 (free network adjustment) (坪川ら, 1982) とよび, 大地の変動や変形の調査などに用いられる.

## 参考文献

- 1) 田島稔, 小牧和雄: 最小二乗法と測量網平均の基礎, 2001.
- 2) 秋本圭一, 服部進: 岡山職業能力開発短期大学校紀要第 11 号, 1997. 3.
- 3) 坪川家恒, 須川力, 角田忠一, 田島稔, 中川一郎, 坂口瑛: 現代測量学 第 1 卷 測量の数学的基礎, 日本測量協会, pp. 204-267, 1982.