

UAV 写真測量の正しい実施のために：

原理・仕組みと見落とししがちな注意点

神野 有生

1. はじめに

UAV 写真測量は、UAV (ドローン) で撮った写真を用いた 3 次元測量である。近年、自律飛行が可能な小型 UAV や、SfM (Structure from Motion), MVS (Multi-View Stereo) と呼ばれる自動解析処理を実装したソフトが発達・低廉化し、これらを用いた UAV 写真測量が多くのユーザーを獲得した。例えば、200 m 四方の領域を、20 分程度の飛行で撮影すれば、数百枚の画像が得られる。それらの画像を解析することで何百・何千万点の座標を推定できるとともに、対象領域の表面高のマップ、オルソ合成画像、3D モデルなどの有用な派生物を作ることできる。

このような簡便な UAV 写真測量は、100 万円以下の初期投資で、高度な操縦技術や専門知識がなくとも実施可能である。実際、写真測量を専門とする企業のみならず、地域のコンサルタントや各分野の研究者によって、広く用いられるようになってきている。水環境分野でも、河川や海岸を対象とした適用例が増えている。例えば河川では、堤防の天端の亀裂や沈下から、河道の土砂堆積・川幅縮小まで、様々な変状の検出が可能である¹⁾。

しかし、現状では残念ながら、UAV 写真測量は適切に実施されていないことが多い。筆者も当初「とにかくドローンを飛ばして解析回せばいいのでしょうか？」と甘く考えていたが、間違いであった。確かに飛行・撮影は自動でできるし、解析ソフトのおかげで SfM, MVS の専門知識もさほど要らないが、最低限の原理や仕組みを知らなければ、2 cm になるべき測量誤差も簡単に 20 cm, 2 m となり得る。小アジのサビキ釣りに高度なスキルは必要なくとも、釣りの原理を知らずに「とにかく海に針落とせば釣れるのでしょうか？」と口より大きい針を垂れていては、ほとんど釣れないのと同じである。

また、UAV 写真測量の精度は原理的に、撮影・解析方法のみならず、対象領域や天候などの多くの条件に依存する。ところが世間では、筆者も当初そうであったが、精度を「見えやすい条件」であるカメラや解析ソフトに安易に結びつけがちである。サビキの釣果が、そこにいるアジの数、食いつき、針を落とす深さ、仕掛けなど諸々の要因に依存するにも関わらず、「見えやすい」竿だけを取り上げ、「今日釣れないのはこの竿だからだ」「この竿とあの竿どちらが釣れるだろうか」ひいては「この竿のアジゲット力」などと論じているようなものである。

UAV 写真測量を支える SfM, MVS 処理の細部は複雑で、また商用の解析ソフトでは非公開の部分が多いため、ブラックボックスとせざるを得ない。一方、UAV 写真測量の原理や大まかな仕組みなら比較的容易に理解可能であり、それ

コメント [AK1]:

本稿は、水環境学会誌 2019 年 5 月号の特集「水環境研究におけるドローン・リモートセンシング技術活用の最前線」に掲載された解説記事の著者最終原稿に、その後の校正同様に修正したものです。著作権規定に違反しないことを確認の上で Web 掲載しています。

掲載後、1 点不備が見つかったため、2019 年 7 月 16 日に、不備やわかりにくい点にコメントを加えました。学会関係の方々と読者の方々には、お詫び申し上げます。

によって基本的な間違いを避けられるようになる。UAV 写真測量自体に、対象領域や天候に依存するという賭けの要素があることは否めないが、基本を押さえるだけで、勝率は大幅にアップすると考えられる。サビキがカゴに入れた撒き餌の拡散に頼っているという原理を理解すれば、撒き餌を凍ったままカゴに押し込むというミスはしなくなり、そもそもその時その場所にアジがいるかという完全には予測できない要素は別として、子どもでも大抵釣れるようになるのと似ている。

そこで本稿では、UAV 写真測量を3年ばかり勉強した筆者が、正しいユーザーとなるために最小限必要と思われる基礎を解説する。はじめに2.で、写真測量とSfMの原理を図解する。次に3.で、廉価な(=高精度な撮影位置・向き)の計測装置を搭載しない小型UAVを用いた写真測量の一般的な流れと仕組みを概観し、最後に4.で、そこから自然に導かれるが見落とされがちな注意点を列挙する。その際、河川・海岸での注意点にも触れている。本稿は具体的な実施手順や注意点を網羅するものではないため、そのような情報に関しては、国土地理院のマニュアル案²⁾の第3編、筆者の研究室の技術ノート³⁾やそこに掲載の「随時更新型マニュアル」などを参照されたい。

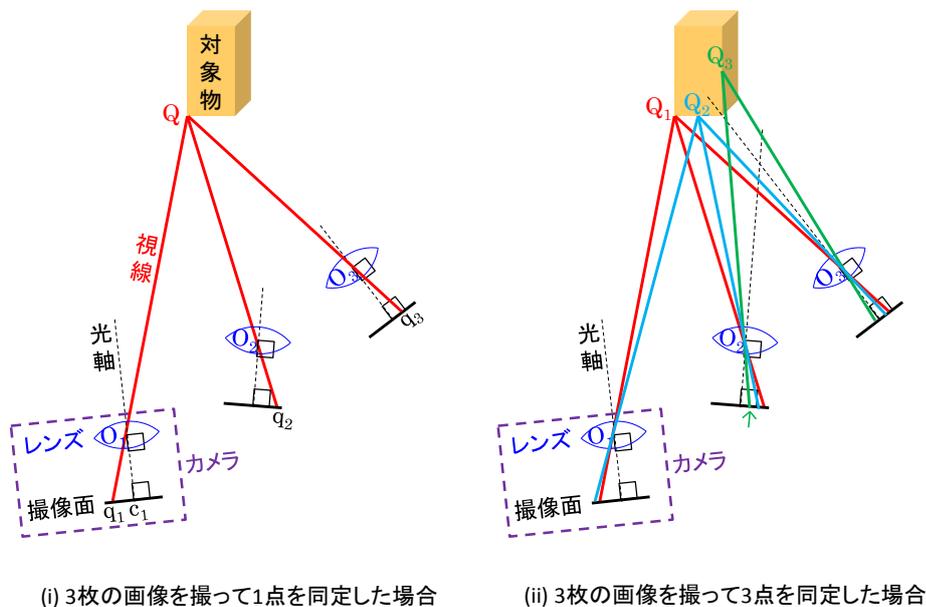


図1 対象物上の点を3位置から撮影した状況の模式図。

2. 写真測量とSfMの原理

2. 1. 写真測量による座標推定の原理

写真測量のゴールは、対象物上または対象領域表面の、多数の点の座標を推定することである。その原理の説明のため、図1(i)に、対象物上の1点Qを、3つの撮影位置から撮影した状況を示す。カメラの最低限の要素として、レンズ

と、その後ろに平行に置かれた撮像面（センサ面とも言う）を描いている。撮像面は長方形であるが、ここでは真上または真横から見たかのように、1次元の線分で描いている。カメラとは3次元の現実空間を、レンズを通して撮像面に投影する装置であり、撮像面に写った像が画像である。例えば撮影位置（レンズ中心；光学中心）が点 O_1 の画像では、現実空間の点 Q が、点 q_1 に投影されている。カメラを目に喩えれば、 q_1O_1 は点 Q を見る視線と言える。

もし、現実空間における撮影の位置 O_1 、向き（光軸つまりレンズの中心軸の向き）、およびレンズと撮像面の距離（画面距離） O_1c_1 が既知ならば、点 q_1 の位置を画像から読み取ることで、視線 q_1O_1 の方程式が決まる。同様に、撮影位置 O_2 の画像から視線 q_2O_2 の方程式が求まれば、両視線の交点として、点 Q の3次元座標が求まる。言い換えれば、3点 q_1, O_1, Q と、3点 q_2, O_2, Q がそれぞれ一直線上にあるという拘束条件（共線条件）によって、点 Q の位置が決まる。

現実には、視線 q_1O_1 が O_1 で折れ曲がったり、レンズと撮像面が完全には平行でなかったり、光軸と撮像面の交点（主点） c_1 が画像の中心とずれていたりする。これらのいわゆる「歪み」や、撮像面の解像度の有限性、既知情報に含まれる誤差などによって、視線 q_1O_1 と q_2O_2 は厳密には交わらない。したがって点 Q の座標は、歪みの影響を考慮しつつ、両視線が最も近づくあたりに推定される（正確に述べれば、直線 QO_1, QO_2 と各撮像面の交点が、 q_1, q_2 とできるだけ一致するような位置に推定されるのが一般的であるが、視線の最近接点というイメージの方が理解しやすいと思われる）。よって、さらに視線 q_3O_3 も用いるなど、より多くの画像を使って推定した方が、点 Q の座標は正しく求まる。

ここで既知と仮定した、各画像の撮影の位置・向き、画面距離・歪み（全画像に共通つまりカメラに固有と考えることが多い）を合わせて、カメラパラメータという。カメラパラメータが既知の状況では、点 Q のような、画像上で同定可能な（周囲と区別して認識できる）現実空間の任意の点の位置を、それが複数の画像上に同定された位置に基づいて推定できる。これが写真測量の原理である。

なお、撮影位置 O_1, O_2 の画像を使って点 Q の座標を求める原理の別の解釈として、三角形 QO_1O_2 を考えたとき、底辺の長さ（基線長）とそれを挟む2底角を用いて頂点 Q の位置を求めているとも言える。したがって、2枚の画像から点の座標を求める作業は、カメラを測角器として使った三角測量でもある。3枚以上の画像を用いる場合の標準的な処理は、三角形のイメージよりも、上述のような視線の交点を求めるイメージに近いものであるが、これすらも三角測量 (triangulation) と呼ばれることがあり、本稿でも単に点の座標を求める処理を指してこの語を用いる。

2. 2. SfMによるカメラパラメータ推定の原理

SfM の定義は省略するが、UAV 写真測量における SfM の役割は、対象物上の多点の三角測量を行う準備として、それに必要なカメラパラメータを、多数の画像から推定することである。2. 1. では図 1 (i) を用いて、3 画像のカメラ

パラメータが既知のとき、3 視線の交点として点 Q の座標が求まることを述べた。一方、カメラパラメータが未知の状況を想定してこの図を見れば、撮像面上のある点から発した視線が現実空間の固定点で交わるという事実が、カメラパラメータに関する幾何的な拘束条件、つまり手がかりとなる。

いま、図 1 (ii)のように、より多くの点を 3 画像上で同定した場合を考える。各画像について、撮像面上で 3 点 Q_1, Q_2, Q_3 が写った位置は、既知であり固定されている。例えば、撮影位置 O_2 の画像について、点 Q_3 が撮像面の右端から $1/3$ の矢印の位置に写ったという事実は動かさない。これらの計 9 点の「撮像面上の位置」と、9 視線が曲がらずに 3 本ずつ 3 点で交わるという条件を守ったまま、未知である各画像の撮影位置・向き、あるいは全画像共通の画面距離を動かせるであろうか。3 点 Q_1, Q_2, Q_3 の位置も未知なので動かしてよい。しかし、図全体を平行移動・回転するか、カメラ以外（撮像面の大きさを既知とすれば）を縦横等倍に拡大縮小する以外に、動かす方法はないであろう。すなわち、これらの拘束によって、絶対的な撮影位置や空間のスケールなどは決まらないが、ある画像を基準とした他の画像の相対的な撮影位置・向きや、カメラの画角に関する画面距離は決まるのである。この図では無視しているが、十分な数の画像が適切な配置で撮られれば、歪みに関するパラメータも求まる。これが SfM によるカメラパラメータ推定の原理である。

コメント [AK2]:

190716 修正:

図 1 ではタイポイントが 3 点しか描かれていないため、他の動かし方も可能となってしまいます。より多くのタイポイントがあると想像して考えてください。

3. 廉価な小型 UAV を用いた写真測量の流れと仕組み

3. 1. 現地作業

図 2 に、UAV 写真測量の標準的なフローを示す。はじめに現地作業として、①複数の標定点・検証点の設置・地上測量、②小型 UAV による空撮、を行う。標定点は、解析において絶対座標系（本稿では、3 次元点群などの成果物に使用する 3 次元座標系の意；例：平面直角座標系、UTM 座標系、適当な基準点を原点とする直交座標系）における座標が既知の点として用いる点であり、現地に置いた対空標識（画像上で判読できるパターンをもつ標識板；図 2 の①の写真では、黒字に白丸のパターン）の中心に定義する。

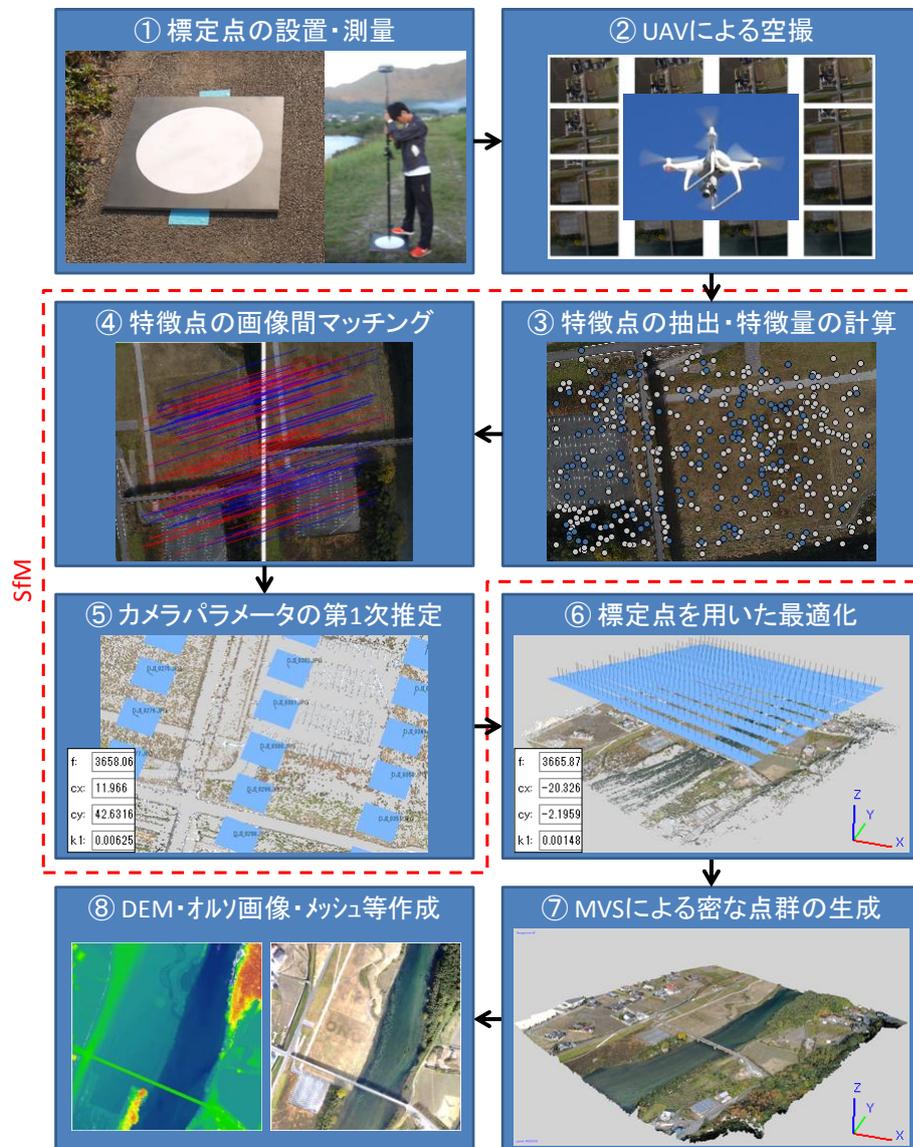


図2 UAV写真測量の一般的な作業フロー。各ステップの図はイメージ図であり、特徴点やマッチングの数は、実際ははるかに多い。

3. 2. SfMによるカメラパラメータの推定

2. 1. で述べた通り、写真測量のゴール：三角測量には、カメラパラメータが必要である。ところが、廉価な小型 UAV に搭載されている GNSS・IMU などでは、三角測量に使えるほどの精度で撮影の位置・向きを測ることができ

ない。さらに小型 UAV に搭載のカメラに関しては、画面距離や歪みの安定性が保証されておらず、飛行前後に別途測定（カメラキャリブレーション）したとしても、その結果を三角測量に直接使わずに、画像を使って最適化（セルフキャリブレーション）することが推奨されている。以上の理由から、解析のはじめに SfM によって、画像から全カメラパラメータを自動推定することになる。なお、RTK-GNSS に基づく撮影位置の高精度測位が可能な UAV も、比較的廉価となってきたが、その場合にも他のカメラパラメータの推定のために、SfM は必要である。

SfM では、まず各画像から何百～何万の特徴点（同定しやすい特徴のある点）を抽出し、各特徴点について、それを特徴づける変量（特徴量）を計算する（図 2 の③）。特徴量としては、単純な RGB 値ではなく、照明の変化や回転に対して変化が小さいように設計されたものが使われる。特徴点は特定の 1 画素に対応するわけではなく、その画素座標（画像の左上から数えて何画素右に、何画素下にあるか）は 1 画素より小さな刻みで定義されるほか、大きさも様々である。

次に、重なりのある複数の画像間で、特徴点のマッチング、つまり特徴量が似ている特徴点を対応付ける作業を行う（図 2 の④）。この画像間の対応、つまり、「この画像でここに写った特徴点がこの画像ではここに写った」という観測事実は、2. 2. で述べた通り、カメラパラメータに関する幾何的な拘束条件となる。図 1 (ii) では 3 点のみの「画像間で対応付けられた特徴点」（タイポイント）が生む拘束を説明したが、通常は何桁も多いタイポイントを使ってカメラパラメータの推定が行われる（図 2 の⑤）。なおこの推定に、UAV が測った撮影の位置・向きの情報や、（この段階で準備できている場合は）標定点の絶対座標を、それらの精度に応じた重みで援用することも可能である。

SfM の実装には、誤ったマッチングの影響を抑える工夫、誤った局所解に陥ることを回避する工夫など、カメラパラメータの推定精度を上げるための工夫が各所に入っている。特徴点の検出、特徴量の計算、マッチングに関するアルゴリズム・内部設定は、商用の解析ソフトでは一般に非公開であり、ブラックボックスとなる。

3. 3. 標定点に基づくジオリファレンス・カメラパラメータの最適化

2. 2. で述べたように、SfM で得られる撮影の位置や向きは、ある画像を基準とした相対的なものでしかないほか、スケールが不定である。最終的な成果物を絶対座標系で得るためには、どこかの段階で、絶対座標が既知の標定点を利用して、スケールや撮影の位置・向きを絶対座標系に合わせて置く必要がある。この作業がジオリファレンスであり、最少 3 点の標定点を必要とする。

標定点が豊富にあるならば、ジオリファレンスのみならず、SfM によるカメラパラメータの推定誤差を矯正する目的にも動員できる。SfM で利用したタイポイントが作る拘束と、新たに標定点の絶対座標が生む拘束を組み合わせ、これらをできるだけ満たすようにカメラパラメータを最適化（バンドル調整）する作業である。これが図 2 の⑥であるが、ジオリファレンスやバンドル調整の前準備として、標定点が写った各画像において標定点（対空標識の中心に定義）

を同定, その画素座標を計測するとともに, 地上測量した絶対座標と紐付けておく必要がある。この準備作業も, 用いた対空標識のパターンと大きさ, 解析ソフトによっては, ほぼ自動化できる。

3. 4. MVSによる高密度な三角測量

SfMにおける特徴点の画像間マッチングでは, カメラパラメータが未知のため, 画像A上の特徴点が, 画像B上のどのあたりの特徴点と対応する可能性があるか, 分からなかった。一方, カメラパラメータが既知となったいま, 「画像Aのこの画素は, 画像Bではこの線(エピポーラ線)のあたりに写るはずだ」という探索範囲の絞り込みができるため, SfM時点より簡単で効率のよい, 従って高密度な画像間マッチングが可能となる。MVSは, この高密度なマッチングを行い, 複数の画像上で対応付けられた各点の絶対座標を, 三角測量によって推定する自動処理である(図2の⑦)。SfM同様, 自動的なマッチングには誤りも多分に含まれ, 誤った点はアウトライア(周囲から外れた点)となるため, MVSにはそれらを除外する工夫も組み込まれている。

MVSで得られた密な点群の用途は, 目的次第で多様である。何らかの処理・品質管理を経て点群自体が最終成果物となることもあれば, その後, DEM(デジタル標高モデル; 必ずしも地面の標高を測っていないことから, DSM: デジタル表面高モデルとも呼ばれる)と呼ばれる標高マップに変換したり, さらにオルソ画像を作ったり(図2の⑧), あるいはメッシュ化の後テクスチャを貼ったりして, 成果物とすることもある。

4. UAV写真測量の見落としがちな注意点

以上を踏まえれば, UAV写真測量の様々な注意点が自然に導かれる。以下は, そのような注意点のうち, 国土地理院のマニュアル案²⁾に記載がないなどの理由で, 現状では認知度が低いと考えられるものである。原理・仕組みの理解の意義を感じていただく趣旨のものであって, 最重要の注意点を精選したものではないため, ご注意願いたい。

- SfMの精度(カメラパラメータの推定精度)が悪い場合, 高品質な成果物を得ることは, 原理的にできない。MVSに進む前に, SfMの精度を検証するべきである。
- SfMは原理的にタイポイントの存在と不動性に依存する。すなわち対象領域表面に, 視点が変わっても同じように見えて同定でき, かつ動かない点が必要である。のっぺりと一様に写る領域はSfMに役立たず, 風に揺れる植生や水面は時として有害である。水面の有害性は, 太陽や空からの光を反射して視点ごとに異なる像を映すこと, 浅い場合には水底の像も見えるが, 水面における視線の屈折により視点によって像が動くこと, 波が水底の像を揺らすこと, 波によって水底に動く光の模様(コースティクス)ができること, など多岐にわたる。有害な領域は, たとえMVSで点群を作る予定でも, SfMの段階では画像上でマスクすることが望ましい。
- 同じ理由で, 水面ばかりが写った画像の撮影位置・向きは正確に求まらないので, そのような画像が生じないような高度から撮る必要がある。

- 海岸や大河川の水底を対象とする場合、陸が写らなくなるほど水際線から離れた領域は、いかに遠浅で水が透明でも、UAV 写真測量の対象として無理がある。
- SfM の精度は、画像の配置（撮影の位置・向きを組み合わせ）と、画像間を結ぶタイポイントの数・（各画像上の）位置精度・信頼性で決まる。後者は、撮影方法やカメラ・解析ソフトのみならず、対象領域表面の「見た目」「動き」に、複雑に依存している。対象領域の広範囲に模様を塗ったり、風を止めたりはできない以上、UAV 写真測量にはどうしても賭けの要素が付きまとう。経験豊富なプロがマニュアル通り行えば、精度が保証されるという類のものではない。
- 河川や海岸付近の浅い水底も、水が透明で波が小さければ UAV 写真測量の対象となり得るが、上記のような水面・波の影響により、陸上より賭けの要素が強い。この場合、水面に映った空や太陽の像が MVS の障害にならない点において、空の広い範囲に色ムラのないような曇天が、1つの理想的条件である。
- MVS は水面での光の屈折を考慮しないため、水底上の点は実際より浮かび上がった位置に推定される。この効果は事後に補正する必要がある。
- 全画像を同じ向き（例：鉛直下向き）で撮る「平行撮影」を用いてはならない。例えば図 1 (ii) で各画像の撮影の向きを調整し、3 画像すべてが真上向きになるようにすると、2. 2. の拘束を満たしたまま、図全体を上下に伸縮できるようになる。つまり、平行撮影では幾何的に、SfM によって画面距離が求まらない。鉛直下向きの撮影を基本にするとしても、少し傾けた撮影を加えるべきである。
- この「平行撮影」の落とし穴は、未だ十分に認識されていない重要な注意点である。現実には平行撮影を計画しても、実際の撮影時に生じるジンバルの向きのわずかなバラつきと、標定点の高低差によって画面距離を正しく推定できることもあるが、わざわざ賭け要素を増やすべきではない。さらに平行撮影は、歪みの推定にも不利である⁴⁾。
- 標定点が 3 点しかない場合、ジオリファレンスを行うのがやっつとであるから、カメラパラメータの最適化 (⑥) に用いるべきではない。
- 標定点はほぼ一直線上に並べることは、ジオリファレンスのみを考えても不適切である。海岸付近の水底を対象とするときにも、水際付近に 1 列に置くのではなく、内陸側にもう 1 列加えるべきである。
- ⑥における標定点の精度向上効果は、標定点の数だけでなく、各標定点が同定された画像の数、画素座標の計測精度、絶対座標の地上測量精度に依存する。前 2 者を確保するため、対空標識は十分に大きいものを用いるべきである。
- ⑥においては、タイポイントが作る拘束と、標定点の絶対座標が作る拘束の、相対的な重みの設定が、精度に大きな影響を与える。

5. おわりに

私たち現代の技術者・研究者は、多くの複雑な技術を扱っている。すべてを基礎から勉強して理解する余裕はない一方で、何も知らないまま使えば痛い目

コメント [AK3]:

190716 加筆:

このことは、図 1 でタイポイントがいくら多くても言えます。

を見る。さらに、多くの人が急ぎ過ぎて誤用・誤解すれば、その技術自体が誤った評価を受けることになる。現在しばしば聞かれる「写真測量よりレーザー測量の方が精度がよい」「このソフトよりあのソフトの方が精度がよい」といった議論は、そのような例であろう。私たちは新しい技術のユーザーとなるとき、自らの状況・適性を踏まえて、「どこまでを理解し、どこはブラックボックスにするか」を適切に判断することを求められている。

本稿は UAV 写真測量に少し首を突っ込んだユーザーである筆者が、それほど時間をかけられないユーザー向けに、この程度に原理と仕組みを理解すれば効率がよいのではないかと判断したところを簡潔にまとめたものである。その程度が適切であったなら幸いであるが、図や説明が足りないと感じられた読者には、筆者の研究室の技術ノート³⁾やそこに掲載の「随時更新型マニュアル」にある、より詳しい説明を参照願いたい。

参考文献

- 1) 野間口芳希, 秋田麗子, 炭田英俊, 山崎崇徳, 2018. 河川管理における新技術の活用に関する一考察. 河川技術論文集 24, 251-256.
 - 2) 国土地理院, 2017. UAV を用いた公共測量マニュアル (案). URL. <http://www.gsi.go.jp/common/000186712.pdf> (2019年2月時点).
 - 3) 神野有生, 2019. 空中測量研究室の技術ノート. URL. <https://ameblo.jp/rs-algorithm-designer/> (2019年2月時点).
- James, M. R. & Robson, S., 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms* 39(10), 1413-1420.