

# UAV を用いた浅水底の写真測量のための幾何学的な水面屈折補正法の開発

山口大学 学生会員 ○宮崎 真弘  
 山口大学 生会員 神野 有生  
 山口大学 生会員 赤松 良久  
 山口大学 生会員 乾 隆帝  
 山口大学 生会員 関根 雅彦

## 1. 研究背景

近年、小型の UAV を用いた写真測量が、陸上での簡便かつ高密度な技術として注目されている。しかし、UAV を用いた水面下の空中写真測量は実用にはいたっておらず、その要因として水面屈折の影響で実際よりも浅く推定してしまうことが挙げられる。この問題に対して多くの研究では水面の存在を無視した写真測量(SfM-MVS)で得られる見かけの水深に、水面屈折補正係数 1.34(水の相対屈折率)を掛けるという補正を行っている。しかし水面屈折の影響はカメラ位置によって異なり、補正係数 1.34 には幾何学的根拠がない。幾何学的には測量対象点(座標を推定したい点)の座標と、カメラの位置・向き・内部パラメータが(事前の SfM により)既知であれば、スネルの法則と共線条件に基づいて、正しい座標を直接推定できるはずである。

## 2. 目的

そこで本研究では、UAV を用いた浅水底の写真測量のための幾何学的な水面屈折補正法を提案し、その実用性を検討した。具体的には、画像上での測量対象点の画素座標に含まれる推定誤差の影響、測量対象点が多い場合の適用性を、シミュレーションにより明らかにした。さらに現地実験により、実際の浅水底の座標推定への適用性を検証した。

## 3. 幾何学的な水面屈折補正法

本研究で検討する幾何学的な水面屈折補正は、写真測量の原理である共線条件とスネルの法則から導かれる式(1)が出来ただけ成り立つ( $f_{ij}$ の RMS が最小となる)ように、測量対象点の座標および水位・水面勾配を最適化する方法である。

$$f_{ij}(X_{Tj}, Z_W, n) \equiv X_{Tj} - X_{Ci} - \frac{n_z Z_W - n^t X_{Ci}}{n^t v_{Aij}} v_{Aij}$$

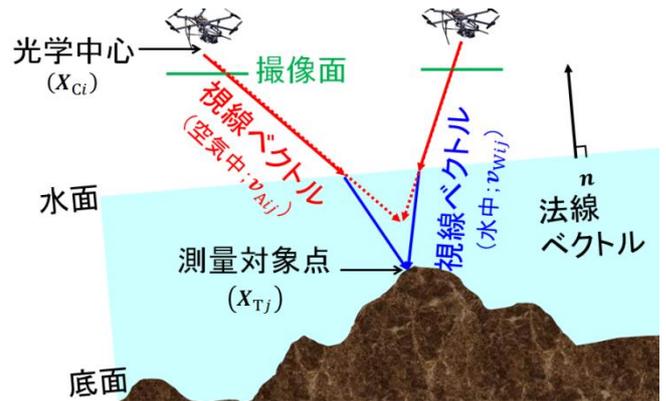


図1 式(1)の記号の図解

$$-\frac{n^t X_{Tj} - n_z Z_W}{n^t v_{Wij}} v_{Wij} = 0 \quad \dots \text{式(1)}$$

ここに、 $i$ は撮影位置の番号、 $j$ は測量対象点の番号、 $X_{Tj}$ は測量対象点の(世界)座標、 $X_{Ci}$ は撮影画像*i*のカメラの光学中心の座標、 $Z_W$ は局所水面を表す平面の切片、 $n^t$ は局所水面を表す平面の単位法線ベクトル、 $v_{Aij}$ は空気中での視線の方向ベクトル、 $v_{Wij}$ は水中での視線の方向ベクトルである。 $X_{Ci}$ および $v_{Aij}$ は事前の SfM により既知になっているものとする(図1)。

## 4. 画素座標の推定誤差に対する頑健性の検討

カメラパラメータ(座標・向き・内部パラメータ)は正確に求められているが、画像上での測量対象点の画素座標に人間の読み取りレベルの誤差(平均 0、標準偏差 0.26 画素の正規誤差; 標準偏差は実験により求めた自身の画素座標読み取り誤差の標準偏差)があるいくつかの条件をシミュレートし、幾何学的な水面屈折補正の誤差を計算した。その結果、図2のように、読み取り誤差に起因する座標推定誤差は、撮影位置・測量対象点の数が現実より非常に少ない場合でも、約 3 cm に留まることが示された。

キーワード スネルの法則, 非線形最適化, SfM-MVS

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台2丁目16-1 山口大学創成科学研究科

TEL 0836-85-9320

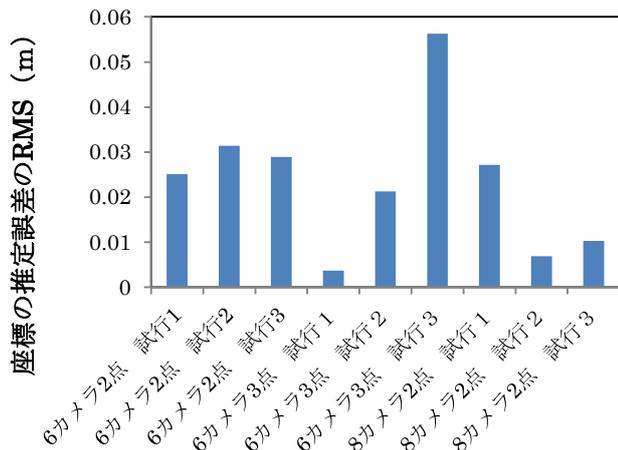


図2 測量対象点の画素座標に誤差がある場合の対象点の座標の推定誤差の RMS

### 5. 測量対象点が多い場合の適用性の検討

撮影位置数を現実に近い値(35)とした上で、測量対象点を水平 10m×10m、水深 2~0 m の範囲で 10 個ずつ増やし、幾何学的水面屈折補正の誤差をシミュレートした。その結果図 3 のように、測量対象点が 30 点までは座標の推定誤差が減少するが、40 点以上では誤差が増加することが明らかになった。40 点以上の場合、式(1)の  $f_{ij}$  の RMS が大きいことから、最適化に失敗していることが考えられる。

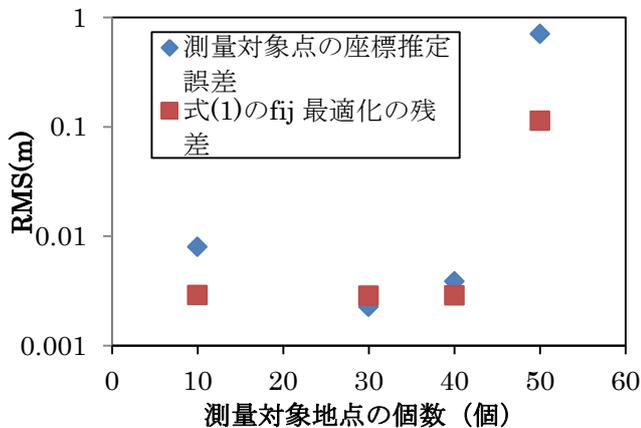


図3 推定誤差・最適化残差の RMS と測量対象点の関係

### 6. 佐波川での現地実験

佐波川の人丸橋下流区間で UAV を用いて空中 42 位置から写真撮影を行い、精度検証用に水面下の対空標識 6 点の RTK-GPS 測量を行った。通常の SfM で得られたカメラパラメータと、目視判読した対空標識の画素座標を入力として、幾何学的水面屈折補

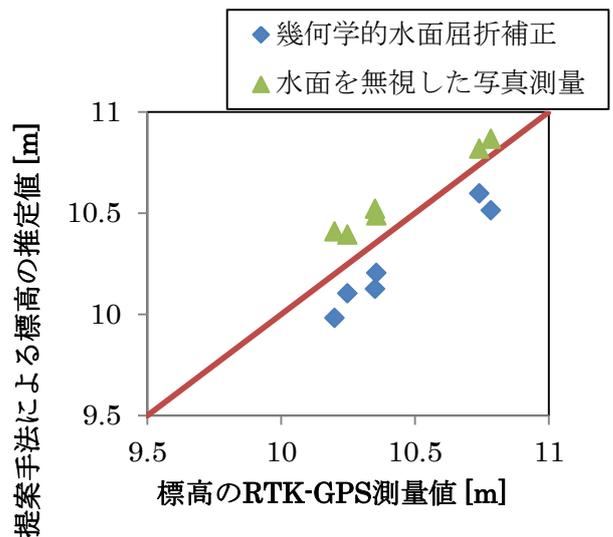


図4 現地実験での河床高の測定精度

正を適用した。また、比較のため、水面を無視した MVS による対空標識の座標推定も行った。

図 4 に、対空標識の標高の推定値と RTK-GPS 測量値の関係を示す。5 での検討結果に基づけば、測量対象点 6 点の場合最適化に問題は生じず十分な精度が出せると考えられるが、現地実験では式(1)の  $f_{ij}$  の RMS が 0.0234 m、座標推定誤差の RMS が約 0.21m と大きくなった。原因として、SfM によって推定されたカメラパラメータに含まれる誤差が挙げられる。水面を無視した場合の結果と比較すると、幾何学的水面屈折補正法では、実際の河床を低く推定し過剰な補正となっていることがわかる。

### 7. 結論

- カメラパラメータを正確に求められていることを仮定すると、画像上での測量点の画素座標に人間の読み取りレベルの誤差があっても座標の推定誤差への影響は小さい (6 カメラ・2 点の場合 RMS 誤差 0.029 m 増)。
- 測量対象点が多すぎると、幾何学的な水面屈折補正における最適化(式(1)の  $f_{ij}$  の RMS の最小化)が成功せず、座標を正確に求めることができない。最適化手法を再検討する必要がある。
- 現地実験では、測量したい地点が少ないにも関わらず最適化の残差が約 0.023m あり、座標推定誤差が 0.21 m と大きかった。これは、カメラパラメータに含まれる誤差に起因するものと考えられる。今後、カメラパラメータの誤差が幾何学的な水面屈折補正に与える影響を検討する必要がある。