

Ⅱ-17 デジタルカメラとGPSを用いた計測手法による 3次元データの取得に関する基礎研究

村木 広和* 田中 成典** 古田 均** 北川 悦司**
Hirokazu Muraki Shigenori Tanaka Hitoshi Furuta Etsuji Kitagawa

【抄録】

本研究では、デジタルカメラとGPSを使用した効率的な3次元データの取得を目的とした計測手法を考案した。そして、基準点1点を配置する計測手法によるシステムを構築し検証を行った。観測条件としては、最低3ヶ所以上の撮影位置と計測対象の手前に基準点1点を設置し、その座標をGPSを用いて求め既知点とした。解析手順は、撮影位置の観測と基準点設置、デジタル写真画像計測、デジタル写真測量の順に行い、デジタル写真と計測対象の関係を求めた。そして、空間探査面積相関法を用いて3次元データの自動取得を行った。

【キーワード】 GPS, デジタルカメラ, 自動計測, 空間探査面積相関法

1. はじめに

我が国では、自然災害による被害が多発しており、特に地震や豪雨などによる災害が発生し、その度に多くの損失を被っている。また、地震によって崩壊した都市部構造物や山岳部は、余震を含むわずかな外力や基準以下の降雨などの誘因による2次災害が発生しやすい状態にある。災害を未然に防ぐためには、災害危険箇所の詳細な3次元データが必要となる。

本研究では、デジタルカメラとGPSを用いて、速やかに直接計測不可能な形状の状態を詳細に把握する手法いわゆる効率的な3次元データを取得する技術を確立することを目的とする。

2. 計測手法

従来の写真測量において、GPSおよび地上測量データを組み合わせた解析については、既報¹⁾で研究されている。GPSを用いた3次元データ処理についても既報²⁾で体系化されている。

従来の写真測量においては、基準点を設置せずに計測対象の3次元データを取得する方法はあるが、既存の地形データとの整合を取るのが困難であった。そのため、複数の基準点を計測対象に設置する必要があった。ただし、崩壊などの危険な場所では、基準点を設置するのは実質上不可能である。

本研究では、既報^{1) 2)}の考え方をベースに、基準点1点による効果的な計測手法についての理論を確立する。それは、計測対象の手前に基準点1点を設置し、デジタルカメラで撮影した位置をGPSを用いて観測した後、ディファレンシャル測位法を用いて位置を割り出すものである。ディファレンシャル測位法は、機材がコンパクトであり、単独測位のリアルタイム性を有し、精度面でも位置誤差±0.5m

～1.5mを確保することができる利点がある。撮影条件は、視点の異なった3ヶ所以上から行うものとする(図1参照)。そして、3次元データの取得は、計測対象にM*Nのメッシュを発生させ、空間探査面積相関法を用いてメッシュ交点の奥行きをデジタル写真上で自動解析し、定められたX,Yメッシュに対するZ値を取得する手法を検討する。

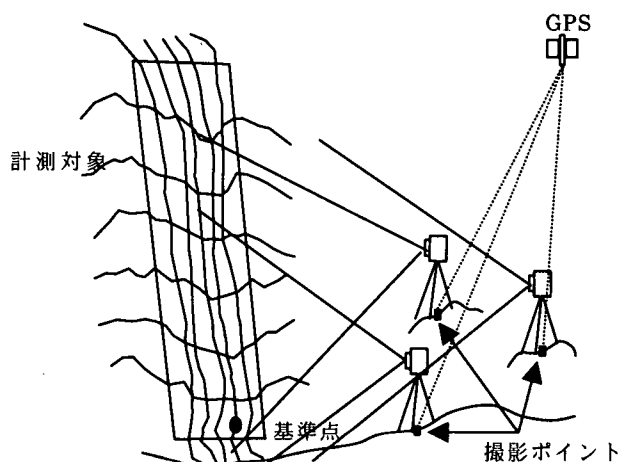


図1 計測イメージ図

本手法は、従来の研究^{3) 4)}によるステレオマッチング方法において不可能であったエピポララインを構成した画像を使用せずに計測ができる点、また、計測幅が均一となったデータを取得できる点、そして、撮影方法についても自由度を持たせる点に特徴がある。

3. 撮影位置の観測と基準点設置

本研究では、基準点1点による3次元計測手法についての理論を確立する。図1に示すように、計測

* 〒564-1095 大阪府高槻市霊仙寺2-1-1 関西大学大学院総合情報学研究科 (TEL) 0726-90-2404 (FAX) 0726-90-2491

アジア航測株式会社 関西情報システム部 (〒564-0063 大阪府吹田市江坂町2-1-11)

** 〒564-1095 大阪府高槻市霊仙寺2-1-1 関西大学総合情報学部 (TEL) 0726-90-2404 (FAX) 0726-90-2491

対象の手前または、左右などの危険の少ない場所に1点基準点を設置し、3ヶ所以上の撮影位置と基準点の関係から三角測量法を用い新設基準点の座標を求める。新設基準点位置(c)は、撮影位置の座標(a)と、デジタル写真画像上に写っている基準点の写真座標(b)から正弦定理を用いてP1,P2,P3の位置を求める。

正弦定理に用いる角度 $\Delta p1o1q1$, $\Delta p2o2q2$, $\Delta p3o3q3$ は、(b)で観測した写真座標より算出する。

(a) 既設点座標 (撮影ポイントと基準点)

$$\begin{aligned} O1 &= (X_{01}, Y_{01}, Z_{01}) \\ O2 &= (X_{02}, Y_{02}, Z_{02}) \\ O3 &= (X_{03}, Y_{03}, Z_{03}) \\ Q1 &= (X_{03}, Y_{03}, Z_{03}) \end{aligned} \quad (1)$$

単位(m)

(b) 写真座標観測値 (基準点のデジタル写真画像上)

$$\begin{aligned} q1 &= (x_1, y_1) \\ q2 &= (x_2, y_2) \\ q3 &= (x_3, y_3) \end{aligned} \quad (2)$$

単位(mm)

(c) 新規基準点座標 (新規基準点)

$$\begin{aligned} P1 &= (X_1, Y_1, Z_1) \\ P2 &= (X_2, Y_2, Z_2) \\ P3 &= (X_3, Y_3, Z_3) \end{aligned} \quad (3)$$

単位(m)

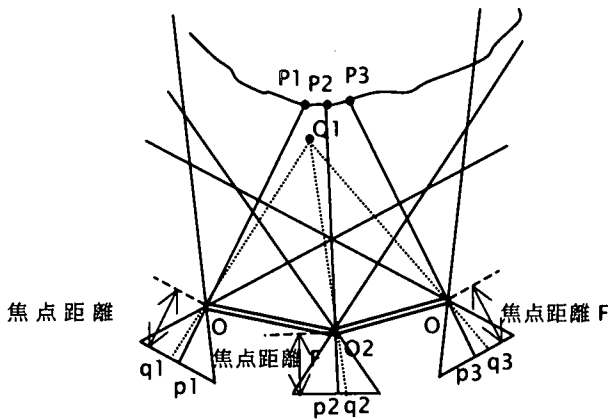


図2 基準点設置と新設基準点

複数の撮影ポイントから撮影したデジタル写真画像上には、互いの投影中心と計測対象面の交点(p1,p2,p3)が写っているため、この点を新規の基準点と考え、それをデジタル写真測量で用いた。

4. 画像計測法

画像計測では、デジタルカメラで撮影されたデジタル写真画像上において、精細に基準点及び新規基準点を測るために、画像を拡大し計測を行った。拡大の方法としては、既報^{6) 7)}による3種類の内挿法を用いた。特に、方法(f)は、(d)や(e)に比べ拡大

内挿した画像の基準点及び新規基準点を認識しやすいため、本研究ではこの方法(f)を活用した。

(d) 最近隣内挿法(nearest neighbor interpolation)

求める拡大画像データの点から、その点に対応する元画像の点座標に0.5を加算した点情報に置き換える方法で、位置誤差は、カラム、ライン数に0.5を加算して求めるため半画素分ずれる。

(e) 共1次内挿法(bi-linear interpolation)

求める拡大画像データの点から、その点に対応する元画像の点座標のまわり4点の画像情報をその距離に応じた重みを乗算して求める。

(f) 3次たまたみ込み内挿法(bi-cubic interpolation)

求める拡大画像データの点から、その点に対応する元画像の点座標のまわり16点の画像情報を以下の関数による内挿を行う。

$$Q=(f(y_1),f(y_2),f(y_3),f(y_4)) \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f(x_1) \\ f(x_2) \\ f(x_3) \\ f(x_4) \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、 $f(x)=\sin \pi x / \pi x$

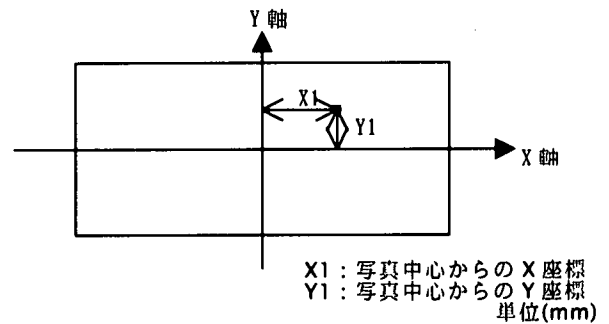


図3 画像座標計

5. デジタル写真測量

標定の手法としては、単写真標定の基本式である共線条件式(5)と(6)から、カメラの傾き(K, Φ , ω), カメラ位置(X_0, Y_0, Z_0)と観測対象物(X,Y,Z)との幾何関係を考慮する。

$$F_{xij}=F(x_{ij},X_0,Y_0,Z_0,\omega,\Phi,K,X,Y,Z)=(-c-A1-x_{ij}-C1)/C1 \quad (5)$$

$$F_{yij}=F(y_{ij},X_0,Y_0,Z_0,\omega,\Phi,K,X,Y,Z)=(-c-B1-y_{ij}-C1)/C1 \quad (6)$$

ここで、

$$A1=a_{11}(X-X_0)+a_{12}(Y-Y_0)+a_{13}(Z-Z_0)$$

$$B1=a_{21}(X-X_0)+a_{22}(Y-Y_0)+a_{23}(Z-Z_0)$$

$$C1=a_{31}(X-X_0)+a_{32}(Y-Y_0)+a_{33}(Z-Z_0)$$

また,

X, Y, Z	: 計測対象物の地上座標
X_0, Y_0, Z_0	: カメラ投影中心の地上座標 (レンズ中心)
C	: 画面距離 (焦点距離)
x_{ij}, y_{ij}	: 計測対象物の写真座標 (画素位置をミリ 単位の写真座標にアフィン変換式で変換し た値)
a_{ij}	: 回転行列(K, Φ, ω)

$a_3 = \partial F_x / \partial Z_0$	$a_8 = \partial F_x / \partial Y$
$a_4 = \partial F_x / \partial \omega$	$a_9 = \partial F_x / \partial Z$
$a_5 = \partial F_x / \partial \Phi$	
$b_1 = \partial F_y / \partial X_0$	$b_6 = \partial F_y / \partial K$
$b_2 = \partial F_y / \partial Y_0$	$b_7 = \partial F_y / \partial X$
$b_3 = \partial F_y / \partial Z_0$	$b_8 = \partial F_y / \partial Y$
$b_4 = \partial F_y / \partial \omega$	$b_9 = \partial F_y / \partial Z$
$b_5 = \partial F_y / \partial \Phi$	

式(5)と(6)は, 単写真標定の共線条件式である。撮影ポイントの異なる複数枚の写真を用いて解析を行う場合, バンドル調整法を用いて各写真の傾きとカメラ位置を求める必要がある。本研究では, 撮影点と基準点1点分の座標値を確定値とし調整計算を行った。

6. バンドル調整法

バンドル調整法は, 多項式調整法や独立モデル法と比べ, ステレオ写真を必要とせず, 撮影の自由度がある。また, 調整能力が高いという特徴を保持しており, 各デジタル写真上で計測された基準点, 観測点を用いて, これら観測された計測値における残差の二乗和を最小となるように各写真の外部標定要素及び地上座標値を決定できる。

バンドル法の理論的展開を以下に示す。バンドル法では, 式(5)と(6)の共線条件式は一般に次のように表現できる。

$$F_{xij} = F(x_{ij}, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \Phi, K, X, Y, Z) = 0 \quad (7)$$

$$F_{yij} = F(y_{ij}, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \Phi, K, X, Y, Z) = 0 \quad (8)$$

ここで, (x_{ij}, y_{ij}) : 写真 i の点 j の写真座標
 $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \Phi, K)$: 写真 i の外部標定要素
 (X, Y, Z) : 点 j の地上座標

写真座標 x と y に関する共線条件式は, 外部標定要素と地上座標の合計 27 個の未知数の関数として表現できる。式(7)と(8)は, 未知の外部標定要素や地上座標に対して線形でないことから, テーラ展開を用いて近似値のまわりに展開して線形化し, 最小二乗法により補正量を求め, 近似値を補正しながら収束解を求める。式(7)と(8)をテーラ展開により線形化すると次式が得られる。

$$F_{xij} + v_{xij} - \partial F_x \cdot \Delta X_0 / \partial X_0 - \partial F_x \cdot \Delta Y_0 / \partial Y_0 - \partial F_x \cdot \Delta Z_0 / \partial Z_0 - \partial F_x \cdot \Delta \omega / \partial \omega - \partial F_x \cdot \Delta \Phi / \partial \Phi - \partial F_x \cdot \Delta K / \partial K - \partial F_x \cdot \Delta X / \partial X - \partial F_x \cdot \Delta Y / \partial Y - \partial F_x \cdot \Delta Z / \partial Z = 0 \quad (9)$$

$$F_{yij} + v_{yij} - \partial F_y \cdot \Delta X_0 / \partial X_0 - \partial F_y \cdot \Delta Y_0 / \partial Y_0 - \partial F_y \cdot \Delta Z_0 / \partial Z_0 - \partial F_y \cdot \Delta \omega / \partial \omega - \partial F_y \cdot \Delta \Phi / \partial \Phi - \partial F_y \cdot \Delta K / \partial K - \partial F_y \cdot \Delta X / \partial X - \partial F_y \cdot \Delta Y / \partial Y - \partial F_y \cdot \Delta Z / \partial Z = 0 \quad (10)$$

ここで, $a_1 = \partial F_x / \partial X_0$ $a_6 = \partial F_x / \partial K$
 $a_2 = \partial F_x / \partial Y_0$ $a_7 = \partial F_x / \partial X$

式(9)と(10)を単純化するために行列式を用いて表すと次のようになる。

$$\begin{bmatrix} V_{xij} \\ V_{yij} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 & -a_3 & -a_4 & -a_5 & -a_6 \\ -b_1 & -b_2 & -b_3 & -b_4 & -b_5 & -b_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \\ \Delta \omega \\ \Delta \Phi \\ \Delta K \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -a_7 & -a_8 & -a_9 \\ -b_7 & -b_8 & -b_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{xij} \\ F_{yij} \end{bmatrix} \quad (11)$$

また, 次のように表すことができる。

$$V_{ij} + \alpha_{ij} \cdot \partial i + \beta_{ij} \cdot \Delta j = F_{ij} \quad (12)$$

式(11)および式(12)は, 計測された写真座標に対する線形化された観測方程式である。複数の写真に複数の点がある場合には次式を用いる。

$$V + \alpha \cdot \partial + \beta \cdot \Delta = F \quad (13)$$

ここで, 式(13)の行列サイズを明記する。

V	: (2mn, 1)	A	: (2mn, 6m)
∂	: (6m, 1)	β	: (2mn, 3n)
Δ	: (3n, 1)	F	: (2mn, 1)
m : 列数(写真枚数) n : 行数(全ての観測点数)			

また,

V	: 写真座標の残差ベクトル
A	: 外部標定要素に対する偏微分係数行列
∂	: 外部標定要素の補正ベクトル
β	: 地上座標に対する偏微分係数行列
Δ	: 地上座標の補正ベクトル
F	: 写真座標値の計測値と修正値の差

したがって, バンドル調整法を用いて, 各カメラの傾き(K, Φ, ω), カメラ位置(X_0, Y_0, Z_0)と観測対象物(X, Y, Z)との幾何関係を求める。

7. 空間探索面積相関法

バンドル調整法により求めた各写真の外部標定要素(K, Φ, ω, X₀, Y₀, Z₀)を用い, 計測対象に発生させた M*N のメッシュ上において, 各メッシュ交点の奥行きを写真 2 枚を用いて式(14)の空間探索面積相関法により計測手法の精度検証を行った。

$$r = \sigma_{12} / \sqrt{\sigma_1 \cdot \sigma_2} \tag{14}$$
$$\sigma_{12} = \sum (e_1 - \bar{e}_1)(e_2 - \bar{e}_2)$$
$$\sigma_1 = \sum (e_1 - \bar{e}_1)^2$$
$$\sigma_2 = \sum (e_2 - \bar{e}_2)^2$$

ここで, r : 相関係数
e₁, e₂ : 相関ウインド内の画素値
ē₁, ē₂ : 相関ウインド内の画素値平均値

空間探索幅と相関係数値の関係を図 4 に示す。これは、左写真と右写真で多段階相関係数の変化を表したものであり、実線は最も粗い第 1 段階で概略の位置を求め、その後、破線、1 点破線、2 点破線と段階を経て、最終位置を決定する様をグラフ化したものである。

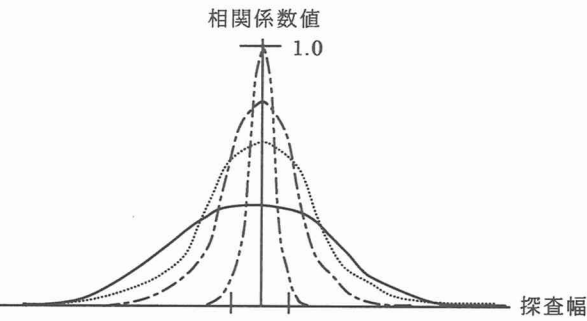


図 4 探索幅と相関係数値

8. 計測結果検証

本研究では、ディファレンシャル測位法により求められた撮影ポイント位置及び新設基準点位置の精度検証を行った。今回は、鉛直写真をデジタルカメラで撮影し、既設の国家三角点よりトラバース測量を行い、斜面上に基準点 5 点を設置し、地上写真測量カメラで撮影を行い、解析図化機を用いて形状データを取得した。ディファレンシャル測位法の結果では、検証位置と比較すると相対位置誤差（表 1，2 参照）が多少生じたが、形状取得の面からは計測可能であることが分かった。空間探索面積相関法に関しては、斜面画像を用いて検証を行い、従来のマッチング手法^{3) 4)} と比べ、比較的類似した自動計測結果を得ることができた。

表 1 相対位置誤差結果

点名	改算値(H)	標高値(H)	残差(H)
101000	9.34	7.971	1.369
101400	8.76	7.766	0.994
100900	6.85	7.966	-1.116
101300	7.1	7.765	-0.665
100800	8.95	7.939	1.011
100500	9.48	7.945	1.535

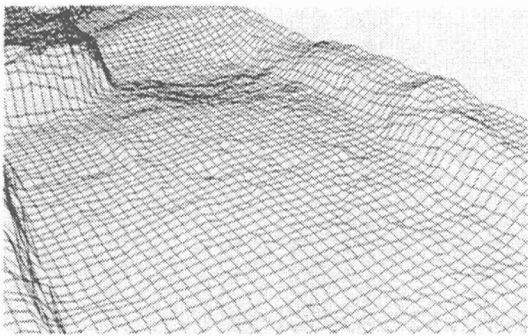


図 5 3 次元データの結果

9. あとがき

著者らは、如何に早く有効な防災情報を取得するかの研究を行ってきた。本論文では、近年急速に普及してきたデジタルカメラと GPS を組み合わせる事により、簡単に 3 次元情報を取得する手法を構築した。ただし、空間探索面積相関法について、計測対象毎に探索幅の調整を必要とする問題点がある。今後、空間探索面積相関法の探索幅の調整を自動化し、取得した形状情報を用いて、適切な防災対策を行う手法について研究を行う必要があると考える。

参考文献

1) 日本写真測量学会・解析写真測量委員会：解析写真測量（改訂版），1997。
2) 中根勝見：GPS 時代の最小 2 乗法測量データの 3 次元処理，東洋書店，1994。
3) 森 忠次，服部 進，内田 修：面積相関法による空中写真のステレオマッチングの改善，土木学会論文集，No.356／VI-3，pp.61-70，1985。
4) 服部 進，森 忠次，内田 修，藤原重雄：空中写真のステレオマッチングのための多段階相関法の改良（II）－画像の狭帯域フィルタリングによるマッチングの安定化－，写真測量とリモートセンシング，Vol.25，No.2，pp.24-38，1986。
5) 森 忠次，服部 進，内田 修，田辺広志：面積相関を使った空中写真からの等高線自動図化の一方法－偏位修正と標高ファイルの作成－，写真測量とリモートセンシング，Vol.21，No.2，pp.4-14，1982。
6) 日本リモートセンシング研究会：画像の処理と解析，共立出版，1986。
7) 監修 高木幹雄，下田陽久：画像解析ハンドブック，東京大学出版会，1998。