



Title	写真測量の情報処理における2つの新しい方法
Author(s)	大場, 良次; Ohba, Ryoji; 近藤, 真一 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 125, 69-75
Issue Date	1985-03-29
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/41905">https://hdl.handle.net/2115/41905</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	125_69-76.pdf



## 写真測量の情報処理における2つの新しい方法

大場良次 近藤真一\* 中川 薫\*\*  
田中敬一 村田和美\*\*\*

(昭和59年11月30日受理)

## New Approaches for Data Processing in Photogrammetry

Ryoji OHBA, Shin-ichi KONDO, Kaoru NAKAGAWA,  
Keiichi TANAKA and Kazumi MURATA  
(Received November 30, 1984)

### Abstract

A pair of new approaches for data processing in photogrammetry are presented. One is the least square locating method using an adaptive model of the object and the other is a locating method utilizing the cross-correlation function of the stereo pair. The former uses no indices in principle but locates an object by adaptively correcting the model in such a way as to minimize a certain cost function defined by both the observed data and the location of the model. While the latter uses trigonometry in principle, but requires no manual operations unlike in the conventional photogrammetric analyses in order to search for the indices in a stereo pair. The results of experimental applications are presented as well as the basic principle and features of each approach.

### 1. 緒 言

パターン認識などの高度な情報処理能力を要するため、従来機械化が難しく全面的に人力に頼りその解決に多大な労力を消費しなければならなかった問題にまで、最近では計算機利用が及んで来ている。しかし写真測量の分野には現在なお計算機利用の面で未解決の問題が多い。最近では気象衛星から送られる地表のステレオ写真から雲の高度分布などを計測する試みもあり、そのような膨大なデータの処理を要する問題には機械によるデータの自動処理の採用が必須の条件となる。一般にステレオ写真の解析には人力による指標の視準と三角法が用いられるが、その方法、殊に指標の視準の機械化・自動化の問題は殆んど解決されていない。このため著者等は写真測量の情報処理の分野に計算機を応用しようとしてほぼ8年前に研究を始めた<sup>1)</sup>。以来この分野の2つのテーマに関して研究を続けて来た。その1つは目標となる指標の視準が困難な場合あるいは指標そのものが存在しない場合に対処し得るもので、原理的に三角法を用いない方法の開発である。すなわち、モデル適応による最小自乗位置決定法 (Least Square Locating Method,

応用物理学科 応用計測学講座

\* 現在 ㈱日立製作所中央研究所

\*\* 現在 東芝㈱

\*\*\* 応用物理学科 応用光学講座

LSLM) である<sup>1)~13)</sup>。もう1つは三角法を用いるが、指標の視準を自動化した相関測距法の開発である<sup>16)~26)</sup>。これらはいずれも原理的に人間の介在を必要とせず測距の自動化を可能にするものである。本論文ではこの2つの新しい方法の基本原理と応用例について述べる。

## 2. 最小自乗位置決定法(LSLM)

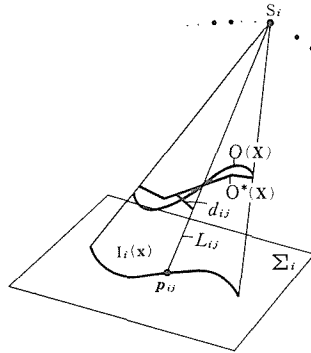


図1 光源  $S_i$  による物体  $O$  の射影  $I_i$  およびモデル  $O^*$  と直線  $L_{ij}$  との距離  $d_{ij}$  の関係

いま図1に示すように、3次元空間中にその位置を計測すべき物体  $O(X)$  が与えられるものとし、点光源  $S_i$  から  $O$  に光を照射した時に平面  $\Sigma_i$  上に生じる射影を  $I_i(x_i)$  とする。ここで  $X, x_i$  はそれぞれ3次元空間内および平面  $\Sigma_i$  内の座標である。写真測量で通常用いられるステレオ写真対はこの射影の一変形で、 $i=1, 2$ 、光源  $S_i$  がカメラレンズの主点、射影  $I_i$  が写真フィルム上の像に相当し、この図では  $S_i-O-I_i$  である配置が、 $O-S_i-I_i$  となったものである。写真測量では、像  $I_1, I_2$  上に共通に含まれる物体  $O$  の射影の一部を指標にして視差を求め三角法の原理によりその位置が決定される。

ここでもし物体の構造や位置  $O(X)$  が予め知られていれば、その平面  $\Sigma_i$  上への光源  $S_i$  による理想的な射影  $\hat{I}_i(x_i)$  を解析的に求めることができる。同様に  $O$  のモデル  $O^*(X)$  を仮定すると、それが与えるであろう理想的な射影  $\hat{I}_i^*(x_i)$  も解析的に求めることができる。モデル  $O^*(X)$  がその構造と位置の両方において物体  $O(X)$  の良い近似の場合は、射影  $\hat{I}_i^*(x_i)$  も  $\hat{I}_i(x_i)$  の良い近似となるはずである。逆に、適当に設定した  $O$  のモデル  $O^*$  の作る射影  $\hat{I}_i^*$  が、すべての  $i$  について実射影  $I_i$  と一致する場合は、実際上  $O$  と  $O^*$  が一致していると考えられる。そこですべての  $i$  について  $\hat{I}_i^*(x_i)$  と  $I_i(x_i)$  が一致するように、モデル  $O^*(X)$  を適応させることにより、 $O^*(X)$  の位置として物体  $O(X)$  の位置を決めることが可能である。著者等はこの考えから出発して最小自乗位置決定法 (LSLM) を開発した<sup>1),9),11),12)</sup>。

### 2.1 LSLM の基本アルゴリズム<sup>1),2),9),12)</sup>

簡単のため物体  $O$  が一本の線分であり、その両端点の像が少なくとも射影  $I_i$  中には含まれていないものとしよう。このとき2点  $X_1, X_2$  を通る直線  $O^*$  でその物体をモデル化することができる。このモデルが物体と全く一致しているとすれば、実射影  $I_i$  上にとった点  $p_{ij}$  と光源  $S_i$  を結ぶ直線  $L_{ij}$  は、この直線  $O^*$  と交差することになる。現実には種々の測定誤差や、モデルと物体の不一致などが原因で、両直線は必ずしも交差せず、最短距離  $d_{ij}$  を残して通過することになる。この距離  $d_{ij}$  は一種の誤差と考えられるが、その中の唯一の系統誤差が物体とモデルの不一致に起因するものとするれば、すべての射影  $\{I_i\}$  上のすべての点  $\{p_{ij}\}$  について求めた誤差  $\{d_{ij}\}$  の自乗の総和

$$T = \sum_i \sum_j d_{ij}^2 \quad (1)$$

を最小にするようにモデル  $O^*$  を適応させることができる。このようにして決まる  $O^*$  の位置は、最小自乗近似の意味で観測データから求められる  $O$  の最適な位置になる。

この例ではモデルの直線  $O^*$  を定義する2点の座標  $X_1, X_2$  が決定すべき未知パラメータとなるが、それらを決定する具体的なアルゴリズムは、 $d_{ij}$  を観測データと  $X_1, X_2$  で表わし、総和  $T$  を最小とする解  $X_1^*, X_2^*$  をシンプレックス法により求める計算機プログラムにより実装される。

## 2.2 応用例

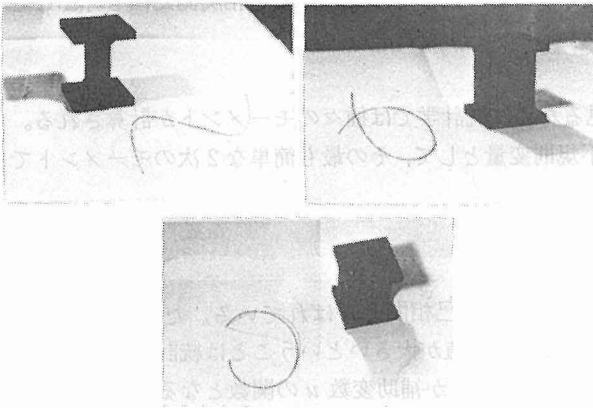


図2 3方向から撮影したら旋状鋼線

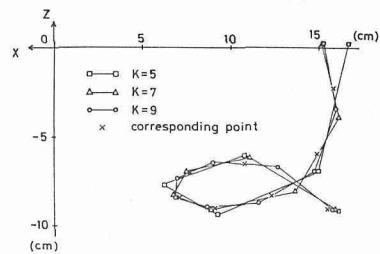


図3 測定結果のZ-X面(鉛直面)への投影

目印のない3次元自由曲線もそれをいくつかの線分を結んだ折線でモデル化することにより、最小自乗位置決定法を適用して精度良く位置決めすることが可能になる。たとえば図2に示すように3方向から撮影した3次元自由曲線の写真を用いてその位置を求めることができる<sup>6),7),11)~13)</sup>すなわち、ら旋状の鋼線を3方向から撮影し、各写真の曲線の像から任意にそれぞれ15点づつ、合計45点の位置を読みとりデータとした。3次元空間の座標は同時に写し込んだH型鋼ブロックの垂直方向と上面の2辺により定めた。曲線を5, 7, 9本の線分からなる折線でモデル化してその位置をこのデータを基に決定した。図3は解析の結果を示したもので、これらは最終的に決定されたモデルをZ-X面上に射影したものである。図中の×印は、較正の目的で予め曲線上に付しておいた標点の三角測量により決定された位置の射影である。

この結果から曲線を9本の折線で近似した場合、曲線全体の68%の部分が $\pm 0.7\text{mm}$ 以下の誤差で、全体の95%が $\pm 1.4\text{mm}$ 以下の誤差で定位されていることが確認されている<sup>12),13)</sup>。この例では普通の35mm一眼レフカメラにより約2m離れて撮影した物体の写真を用いている。従ってレンズの収差、主点位置の測定誤差、フィルムの収縮などの系統誤差がかなり含まれている。これらの誤差を補正するか、写真測量用精密カメラにより撮影した写真を用いれば、より高い精度で位置を測定することも十分期待できる。このモデル適応による最小自乗位置決定法を用いて大型構造物の測定<sup>2),9),12)</sup>やX線ラング写真を用いた結晶中の転位線の位置決定<sup>4)~6),10),12)</sup>なども行われている。

### 3. 相 関 測 距 法

3次元空間に分布する物体OにモデルO\*を適応させて物体の2次元射影である写真からその位置を決定する上述の方法は、原理的に人間の介入を必要としないという長所を持つ反面、Oが単純なものでない限りモデルO\*が必然的に複雑になるため、實際上その適用は難しい。一方従来の三角法の延長として、特定の指標の設置あるいはその目視による視準を必要としない方法も考えられる。この場合指標を使用しないのではなく、従来は人間が目視により行っていたステレオ写真対中の対応点の探索、つまり指標の視準を、機械により自動的に行わせようとするものである。対応点の探索を画像の相関を利用して行うので、以下ではこの方法を相関測距法と呼ぶことにしてその原理と応用例について述べる。

#### 3. 1 相関法による対応点の探索

複数の不規則変量間の統計的な関連を見るために統計学では種々のモーメントが計算される。いま  $x$  と  $y$  をおのおの平均が零の2つの不規則変量として、その最も簡単な2次のモーメントである積  $x \cdot y$  の平均  $m_{xy}$

$$m_{xy} = \langle xy \rangle = \iint xyP(x, y) dx dy \quad (2)$$

は、 $x$  と  $y$  の相互相関、 $m_{xx}$  と  $m_{yy}$  はそれぞれ  $x$ 、 $y$  の自己相関と呼ばれている。ただし  $P(x, y)$  は  $x$  と  $y$  の結合確率密度関数である。この相関の絶対値が大きいうことは統計的に見て変量  $x$  と  $y$  の関連が深いことを意味する。不規則変量  $x$  と  $y$  が補助変数  $u$  の関数となる不規則過程のとき、一定の条件の下で(2)式を変形して得られる、ずらし量  $\sigma$  の関数  $\phi_{xy}(\sigma)$

$$\phi_{xy}(\sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} x(u)y(u+\sigma) du \quad (3)$$

は、 $x$  と  $y$  の相互相関々数と呼ばれ幾つかの特異な性質を有し<sup>14)</sup>、計測の分野で種々応用されている<sup>14),15)</sup>。たとえば  $x \equiv y$  のとき

$$\phi_{xy}(\sigma) = \phi_{xx}(\sigma) \leq \phi_{xx}(0) \quad (4)$$

が成立し、これは不規則過程の自己相関々数がずれ  $\sigma = 0$  で最大値をとることを意味する。ここで  $x$  と  $y$  を、ほぼ同じ視野を撮影した2つの写真とすれば、 $x$  と  $y$  を相対的に少量ずらして重ね合わせるにより両者が殆んど一致する位置を見出すことができる。相互相関々数が最大となる点は、物理的には丁度この両写真が一致する相対的なずらし量に対応している。従って、写真測量で用いるステレオ写真対の一方から、測定対象の近傍の画像を切り出してもう一方の写真に重ね、相対的にずらしながら(3)式により相互相関々数を計算してその最大となる位置から両画像の一致する場所すなわち対応点を探索することができる。

#### 3. 2 相 関 測 距 法

上述の原理と一次元フォトダイオードアレイ (Linear Photo-Diode Array, LPDA) を応用して、測距を行う相関測距法を開発した<sup>16)~19),21),26)</sup>。図4はそのシステム構成を示す模式図である。2つのアレイ LPDA<sub>a</sub>、LPDA<sub>b</sub>が光軸を平行にして水平軸上に距離Dだけ隔てて設置してある。LPDA<sub>a</sub>、LPDA<sub>b</sub>上にはおのおの同一仕様のレンズ系A、Bにより近軸領域の視野の像が結像されるようにしてある。図では光強度分布を便宜上垂直軸方向に表示してある。いま LPDA<sub>a</sub>の光軸上、Aより距離Lの位置に測定対象O(X)が図に示すような光強度分布で存在したとすれば、LPDA<sub>a</sub>とLPDA<sub>b</sub>上にはそれぞれ像O<sub>a</sub>(x<sub>a</sub>)とO<sub>b</sub>(x<sub>b</sub>)が生じる。O<sub>a</sub>とO<sub>b</sub>の間にはレンズ系A、B

の設定条件から次の関係が存在する。

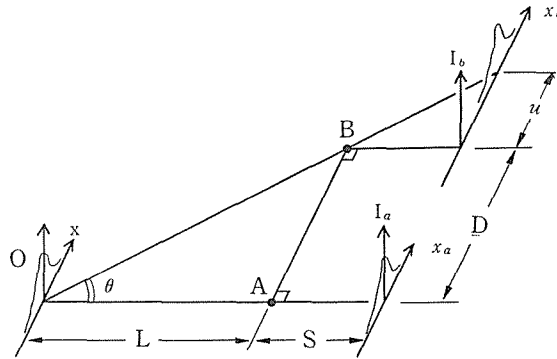


図4 LPDAを用いる相関測距システム

$$O_b(x+u) = O_a(x), \quad (5)$$

$$u = DS/L, \quad (6)$$

$$\theta = \tan^{-1}(u/S) \quad (7)$$

ここで  $S$  はレンズ系 A と LPDA<sub>a</sub> の受光面の間隔、 $\theta$  は視差である。従って  $u$  が求まれば三角法により距離  $L$  が決定できる。

2つの像  $O_a(x_a)$ 、 $O_b(x_b)$  の相互相関々数  $\phi_{ab}(\sigma)$  を(5)式に注意して計算すると、

$$\begin{aligned} \phi_{ab}(\sigma) &= \int_{-\infty}^{\infty} O_a(x) O_b(x+\sigma) dx = \int_{-\infty}^{\infty} O_a(x) O_a(x-u+\sigma) dx \\ &= \phi_{aa}(\sigma-u) \end{aligned} \quad (8)$$

となる  $\phi_{aa}$  は像  $O_a$  の自己相関々数であるから(4)式に示したように  $\sigma-u=0$  で最大となる。従って相互相関々数  $\phi_{ab}$  のピークに対応するずらし量  $\sigma$  として  $u$  が決定される。

この相関測距法を実際に装置化するに当っては、解決すべきいくつかの問題があるが、それらは十分解決可能であり<sup>19)~21)</sup>最終的にはマイクロプロセッサ程度の情報処理能力を組み込んだ装置により携帯用距離計も実現できる<sup>25),26)</sup>。

### 3.3 応用例

相当の距離を隔てて撮影した草地表面の写真は不規則なテクスチャを呈するため、航空写真の草地部分に人間が目視により適当な指標を見出すことは困難である。上述の相関測距法では人間にも視準し得るような明瞭な指標を原理的に必要としない。従ってそのような草地部分を撮影したステレオ写真対の中にも対応点を見出すことが常に可能になる。

図5は札幌市の宮の森ジャンプ台の改造前のランディングバーンを下側から約50m離れて撮影した写真である。相関測距法を適用して草地で覆われた同ランディングバーンのプロファイルの測量を試みた<sup>22)~26)</sup>。実験は普通の35mm一眼レフカメラで撮影したステレオ写真対をもとに、相関測距法により視差を求めることにより行った。その結果、目視による指標の視準を全く要しなくてもかかわらず、角分解能  $5.00 \times 10^{-4}$  rad の精度の測定が行えた。この結果の精度は通常の人間の介在する三角測量の精度より劣っているが、これは上述のように、写真撮影をごく一般のカメラで行うなど精度の維持に特別な配慮を何も払っていないためであろう。本方式の実用化に際して使用機器などの精度維持と系統誤差の補正を行えば、従来の写真測量と同程度以上の精度を

得ることは十分期待できる。

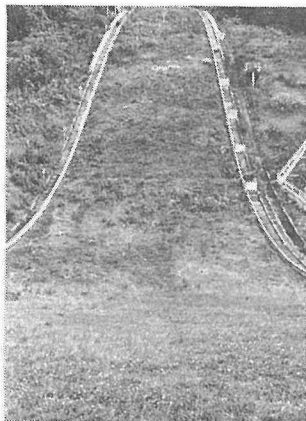


図5 草地に覆われた  
宮の森ジャンプ台  
ランディングバー  
ン全景

#### 4. 結 言

本論文では写真測量における情報処理に関連して行った研究について述べた。従来の写真測量法では不可避であった人間の介在する指標の探索，視準を機械化・自動化するために新しく次の2つの方法を開発した。その1つはモデル適応による最小自乗位置決定法であり，他は指標の視準を自動化する相関測距法である。前者は原理的に三角法を用いておらず，指標そのものを必要としないため，従来の写真測量では測定不可能であるような対象にも適用できる。これらはいづれの方法とも原理的に人間の介入を要しないから，測距の完全な自動化を可能にすると同時に人間の介在により生じる種々の過誤からも免れるため，測定結果の信頼性が向上しよう。本論ではそれらの基本原理と特徴および基礎実験の結果について述べた。

#### 文 献

- 1) 近藤，大場，井戸川：第10回計測制御に関する北海道研究会論文集（1977），p.3.
- 2) 近藤，大場，村田：第17回計測自動制御学会学術講演会予稿集（1978），p.561.
- 3) 近藤，大場，村田：第11回計測制御に関する北海道研究会論文集（1978），p.23.
- 4) 近藤，大場，村田：第18回計測自動制御学会学術講演会予稿集（1979），p.341.
- 5) 近藤，大場，村田：第12回計測制御に関する北海道研究会論文集（1980），p.33.
- 6) 近藤，大場，村田：第19回計測自動制御学会学術講演会予稿集（1980），p.487.
- 7) 近藤，大場，村田：第13回計測制御に関する北海道研究会論文集（1981），p.65.
- 8) 近藤，大場，村田：第20回計測自動制御学会学術講演会予稿集（1981），p.241.
- 9) Kondo, S., Ohba, R. and Murata, K.: Photogrammetric Eng. and Remote Sensing, 48 (1982), 1, p.73.
- 10) Kondo, S., Ohba, R. and Murata, K.: Jpn. J.A.P., 21 (1982), 9, p.1359.
- 11) 大場良次：日本写真測量学会北海道支部第1回学術講演要旨集（1982），p.5.
- 12) 近藤真一：北海道大学学位論文（1983）.
- 13) Kondo, S., Ohba, R. and Murata, K.: Photogrammetric Eng. and Remote Sensing, 49 (1983), 5, p.629.
- 14) 磯部 孝(編)：『相関函数およびスペクトル』，東京大学出版会（1968）.
- 15) Lange, F.H.: "Correlation Techniques," Iliffe Books Ltd. (London) (1967).
- 16) 中川，大場，村田，井戸川：第17回計測自動制御学会学術講演会予稿集（1978），p.569.
- 17) 中川，大場，村田：第11回計測制御に関する北海道研究会論文集（1978），p.21.
- 18) 中川，大場，村田：第12回計測制御に関する北海道研究会論文集（1980），p.63.
- 19) 中川，大場，村田：第19回計測自動制御学会学術講演会予稿集（1980），p.471.

- 20) 中川, 大場, 村田: 第20回計測自動制御学会学術講演会予稿集 (1981), p.669.
- 21) 中川, 大場, 村田: 計測自動制御学会論文集, 18 (1982), 9, p.53.
- 22) 中川, 大場, 村田: 第15回計測自動制御学会北海道支部学術講演会論文集 (1983), p.67.
- 23) 中川 薫: 日本写真測量学会北海道支部第2回学術講演要旨集 (1983).
- 24) 中川, 大場, 田中, 村田: 日本写真測量学会昭和58年度秋季学術講演会論文集 (1983), p.19.
- 25) 中川, 大場, 田中, 村田: 写真測量とリモートセンシング, 24 (1984), 1, p.14.
- 26) 中川 薫: 北海道大学学位論文 (1984).