論文

簡易空中写真測量法を利用した風の観測システムの開発 (2) — 地上写真測量法の開発と山間部での気流の流跡線測定への試み —

Development of a Wind Observation System Utilizing Simplified Aerial Photogrammetry (2)

— Development of a System Utilizing Terrestrial Photogrammetry and an Attempt to Observe Paths of Particle of Wind Flowing over Mountainous Regions —

小泉俊雄 *1 足立一郎 *2 柴田勝央 *3 鳥山知樹 *4

Toshio KOIZUMI, Ichirou ADACHI, Katsuhisa SHIBATA, Tomoki TORIYAMA

SUMMARY

Several systems to analyze 3-dimensionally the data of wind stream flowing close enough over the surface of the ground utilizing photographs have now been under project with us.

In the previous paper, 2 cigar-shaped kite balloons upon which 35mm still-cameras are installed respectively with an aim of stereophotographing another balloon which is released into air as a tracer are dealt with. With the aid of these balloons, a system to analyze 3-dimensionally the paths of particle of the tracer balloon has been constructed.

In this paper, description is made with adoption of a system developed for stereophotographing the balloons that has been released in air as a tracer by manually settling 4 35mm still-cameras with which simultaneous operation is possible on the ground surrounding the observational area, instead of the kite balloons.

In parallel with the above trial, a system allowing the paths of particle of balloons to be measured 3-dimensionally only with a single leaf of photographs has been developed.

The said 2 systems have been intended to be applied to observation of the paths of particle of wind stream flowing over mountainous regions.

Results effective enough for the survey have been brought about from the above investigation. Especially with the system allowing only a single leaf of photographs to be measured, it is explained that tracing of balloons or operation of equipment and apparatus is considerably easy and the system is quite an effective tool for observation of wind.

-
- * 1 千葉工業大学助教授
Ciba Institute of Technology, Associate Professor
 - * 2 千葉工業大学教授
Ciba Institute of Technology, Professor
 - * 3 (株) 大林組
Obayashi Corporation
 - * 4 千葉工業大学大学院生
Ciba Institute of Technology, Postgraduate Student

1. はじめに

地表付近の風の流れを3次元的にとらえることは風の研究において重要なことである。著者らは簡易写真測量法を用いた風の観測システムを開発している。

その一つとして先に、35mmカメラを搭載した2個の飛行船型係留気球を用いて、トレーサーとして放流した風船をステレオで撮影し、その流跡線を3次元的に解析するシステムを開発し、建物周辺気流の流跡線測定へ応用した¹⁾。しかしこのシステムは強風での観測が困難なことや、撮影装置などに費用が多くかかること、また山間部での使用を考えた場合、気流の状態が悪いことや気球を扱う足場が悪いことなどが考えられ改善の必要があった。

そこで気球に代わって地上においてカメラを手に持って撮影する方法（地上写真測量法）、および2枚の写真を用いるステレオ写真測定と共に、1枚の写真だけを用いる単写真測定の方法についても開発を行った。そしてこの方法を1990年12月に発生した竜巻の発生地点の山間部での地形と風の間関係を調べる観測に試みた。

2. 観測システム

本研究で開発したステレオ写真測定法と単写真測定法は次の通りである。

(1) ステレオ写真測定法

本システムはFig. 1に示すように、観測地域周辺の地上に4台のスティルカメラをある距離離して設置する。これらをインターバロメーターにつなぎ、一定時間ごとに同時シャッターが切れるようにする。観測地域の風上から空気と同じ比重の円形の風船を放流し、その流る様子を一定時間ごとに4台のスティルカメラで追跡し同時に撮影する。撮影された写真をステレオ写真として解析し、風船の3次元位置を求める。その結果風船の3次元的な流跡線図が得られる。

Fig. 1 ステレオ写真測定法のシステムの概要
System Outline of Stereo Photogrammetry

(2) 単写真測定法

写真測量により被写体の3次元位置を求めるためには、一般にステレオで撮影された2枚の写真を必要とする。しかし、直径が既知の球形物体は、直径の値をもとにして、その物体を撮影した1枚の写真だけで被写体の3次元位置を求めることができる。その理論はAppendixに示すが、要約すれば風船の直径が既知であるから遠くのは小さく写り、近くのは大きく写るという原理をもとに風船の3次元位置を求めるものである。Fig. 2に地上写真測量法による流跡線観測のフローを示すが、このフローについての説明と解析理論については先の論文¹⁾を参照されたい。photo. 1に使用したカメラとインターバロメーターを示す。以下このフローに沿って本システムを述べる。

(3) 地上基準点（標定点）の設置および標定点の地上座標の測量

観測対象地域に、後の解析で必要となる撮影したカメラの位置や傾き（姿勢）などを決める標定作業に必要な地上基準点（標定点）を多数設置し、地上座標系におけるその位置（X, Y, Z）を測量する。この作業は先の論文¹⁾における対空標識の設置とその測量に相当するが、

Fig. 2 地上写真測量法による流跡線観測のフロー
Flow of the Observation Utilizing Terrestrial Photogrammetry

Photo. 1 使用したカメラとインターバルメーター
35mm Still Camera and Interval Meter

地上写真測量の場合、カメラは地上において撮影するため対空標識の代わりに写真に写る又は写った電柱、家、樹木などの地物を利用する場合もある。

(4) 風船の放流

風船にヘリウムガスと空気を混ぜて混入させ、大気の比重と同じ比重になるように重りでバランスをとったものを観測対象地域に必要な数だけ放流する。この際、単写真測定の場合には風船は直径が既知の円形のものを使用する必要がある。

(5) 写真撮影

観測地域周辺にステレオ写真が撮影できるようにある距離離して4台のカメラを手にとって配置し、放流された風船をインターバルメーターを用いて一定時間間隔で連続写真撮影をする。ステレオ写真測定法の場合には2台のカメラでステレオ写真は撮影可能であるが、本

研究で4台のカメラを用いたのは、風船の流れをより広い範囲でステレオ写真撮影を行うためである。単写真測定法の場合には、ステレオで撮影をする必要はなかつた放流された風船を一定時間間隔で連続写真撮影を行うだけである。しかし、両者とも一枚の写真面上に少なくとも4点以上の標定点が写るように撮影することが必要である。撮影器材の仕様をTable 1に示す。

(6) 地上基準点の写真座標の計測から流跡線図の作成まで

撮影された写真をもとに流跡線を求める。ステレオ写真を用いて対象物の3次元位置を求める原理は先の論文¹⁾を参照されたい。単写真による3次元位置の測定についてはAppendixに示す方法により求めることができる。なお、本研究においても解析には(社)日本写真測量学会の「一般カメラによる3次元座標計測プログラムPGMAN」を用い、写真上の計測点(トレーサーである風船)の位置はデジタイザーで計測した。

3. 実験および解析

(1) 実験日時、場所

実験は平成4年12月23日から27日までFig. 3に示す千葉県鴨川市と和田町の境の山間部で行った。1990年12月に鴨川市に多くの被害をもたらした竜巻はこの地点周囲で発生した。実験を行った地域は東西に延びる谷と北西に延びる谷の交差しているところで、特に東西方向の谷は西側に標高129mの峠があり、風の流れに地形が大きく影響する場所と推定される。

Table 1 撮影解析器材の仕様
Specifications of Photography and Analytical Equipment

(a) 写真撮影器材	
カメラ	35ミリ一眼レフカメラ・モータードライブ内蔵型ニコンF-801
レンズ	28mm f2.8 (トキナ社製)
シャッター	インターバルメーター使用によるレリーズでの作動
フィルム	Fujicolor Super G ASA100
(b) インターバルメーター	
形式	ニコンMT-2
遠隔操作	リモートコントロールコードとスイッチにより離れた所から電源のON/OFFが可能
(c) デジタイザー	
形式	SUMMAGRID (武藤工業株式会社製)
分解能	0.025mm
(d) コンピューター	
	NECPC9801VX

Fig. 3 実験地と実験結果
Observation Area and Result of Experiment

(2) 撮影

Fig. 4に示すように観測地域周辺の地上に、三脚を使用せずに手に持った4台の35mm小型スティルカメラをある距離離して配置した。これらをインターパロメーターに有線にてつなぎ、一定時間ごとに同時シャッターが切れるようにした。観測地域の風上から大気と同じ比重にした直径が既知の風船を放流し、それらを4台の

Fig. 4 撮影条件
Items of Photographing

カメラで追跡し同時に撮影した。撮影間隔は風船放流後8秒おきとした。

(3) 標定点

観測地域が広範囲にわたるため、観測地付近の電柱などを標定点として利用した。しかしそれだけでは標定点が偏ってしまうため測量用のポールを用いて新たに標定点を9点設置した。

(4) トレーサーとしての風船の放流

トレーサーとしての風船はすべて直径40cmの球形である。風船の色は赤、青、ピンク、緑、オレンジの5種類である。風船は手に持っていっせいに放流した。撮影時の風速としてはFig. 3の・印の地点の地上1mの場所に牧野応用測器研究所社製のマイクロアネモを設置し風向、風速を測定した。風速は10分間の平均風速とし、風向は頻度の多い風向を観測した。

(5) 解析

撮影された写真をサービス版(11.9cm×8.3cm)に引き伸ばし、デジタイザーとパソコンを用いて風船の位置を算出した。解析は撮影した写真のうち、放流後32秒後、1分12秒後、1分52秒後、2分32秒後、3分12秒後の風船について行った。Photo.2, Photo.3に風船放流32秒後の解析に用いた写真を示す。

Photo. 2 解析に用いた風船放流32秒後の写真(単写真, ステレオ写真)
Photograph of Analysis (Balloons were released thirty-two second ago)

撮影地点: カメラ3

(注)矢印は解析に用いた風船の位置を示すだけのもの。右端の4個重なっている風船は解析対象外

Photo. 3 解析に用いた風船放流32秒後の写真(ステレオ写真)
Photograph of Analysis (Balloons were released thirty-two second ago)

撮影地点: カメラ4

(注)矢印は解析に用いた風船の位置を示すだけのもの。右端の4個重なっている風船は解析対象外

4. 結果および考察

解析の結果得られた風船の流跡線に関して、Fig. 5 (a)～(e) に水平方向移動経路図 (X-Z面) を、Fig. 6 (a)～(e) に鉛直方向移動経路図 (X-Y面) を、Fig. 7 (a)～(e) に鉛直方向移動経路図 (Y-Z面) を示す。Fig. 3の流跡線図はFig. 5 (a) の結果を地形図にプロットしたものである。これによると単写真測定の結果のいくつかには、ステレオ写真測定の結果とかけ離れた値をもつものがあるが、ほぼ同じ流跡線が描けていることがわかる。

Fig. 3に示す流跡線より、放流された風船が谷筋に沿って流れていることがわかる。このルートは竜巻の通過ルートとほぼ一致するルートである。

ステレオ写真と単写真, 風船 (赤)

Fig. 5 (a) 流跡線図 (水平方向移動経路図, X-Z面)
(Paths of Particle (Chart of Horizontal Travel Route X-Z))

ステレオ写真と単写真, 風船 (ピンク)

Fig. 5 (b) 流跡線図 (水平方向移動経路図, X-Z面)
(Paths of Particle (Chart of Horizontal Travel Route X-Z))

ステレオ写真と単写真, 風船 (青)

Fig. 5 (c) 流跡線図 (水平方向移動経路図, X-Z面)
(Paths of Particle (Chart of Horizontal Travel Route X-Z))

ステレオ写真と単写真, 風船 (緑)

Fig. 5(d) 流跡線図 (水平方向移動経路図, X-Z面)
(Paths of Particle (Chart of Horizontal Travel Route X-Z))

ステレオ写真と単写真, 風船 (オレンジ)

Fig. 5(e) 流跡線図 (水平方向移動経路図, X-Z面)
(Paths of Particle (Chart of Horizontal Travel Route X-Z))

ステレオ写真と単写真, 風船 (赤)

Fig. 6(a) 流跡線図 (鉛直方向移動経路図, X-Y面)
(Paths of Particle (Chart of Vertical Travel Route X-Y))

ステレオ写真と単写真, 風船 (ピンク)

Fig. 6(b) 流跡線図 (鉛直方向移動経路図, X-Y面)
(Paths of Particle (Chart of Vertical Travel Route X-Y))

ステレオ写真と単写真, 風船 (青)

Fig. 6(c) 流跡線図 (鉛直方向移動経路図, X-Y面)
(Paths of Particle (Chart of Vertical Travel Route X-Y))

ステレオ写真と単写真, 風船 (緑)

Fig. 6(d) 流跡線図 (鉛直方向移動経路図, X-Y面)
(Paths of Particle (Chart of Vertical Travel Route X-Y))

ステレオ写真と単写真, 風船 (オレンジ)

Fig. 6(e) 流跡線図 (鉛直方向移動経路図, X-Y面)
(Paths of Particle (Chart of Vertical Travel Route X-Y))

ステレオ写真と単写真, 風船 (赤)

Fig. 7(a) 流跡線図 (鉛直方向移動経路図, Y-Z面)
(Paths of Particle (Chart of Vertical Travel Route Y-Z))

ステレオ写真と単写真, 風船 (ピンク)

Fig. 7(b) 流跡線図 (鉛直方向移動経路図, Y-Z面)
(Paths of Particle (Chart of Vertical Travel Route Y-Z))

ステレオ写真と単写真, 風船 (青)

Fig. 7(c) 流跡線図 (鉛直方向移動経路図, Y-Z面)
(Paths of Particle (Chart of Vertical Travel Route Y-Z))

ステレオ写真と単写真, 風船 (緑)

Fig. 7(d) 流跡線図 (鉛直方向移動経路図, Y-Z面)
(Paths of Particle (Chart of Vertical Travel Route Y-Z))

ステレオ写真と単写真, 風船 (オレンジ)

Fig. 7(e) 流跡線図 (鉛直方向移動経路図, Y-Z面)
(Paths of Particle (Chart of Vertical Travel Route Y-Z))

5. まとめ

本論文は地上において手に持って撮影した写真をもとに、地上付近の風の観測システムを開発し、山間部での気流の観測に適用させたものである。特に今回はステレオ写真解析のほかに単写真解析を用いての観測を試みた点に意義が大きい。本論文の結果は次のようにまとめられる。

- 1) 本システムはカメラを手に持って行うため装置そのものが簡単であり、操作も簡単で移動物体の追跡が容易である。また、弱風から強風まで対応できるなどメリットが大きいシステムであることが分かった。山間部のような局所地域の風の観測システムに適していると考えられる。

- 2) 単写真での観測は精度の点で改良の余地があるが、ステレオ写真に比べ、

- ①測定物の追跡や操作が格段に容易なこと
- ②同時シャッターが不要なこと
- ③3次元測定 of 解析時にステレオマッチング (ステレオ写真上で、互いの写真に写っている同じ物体の認識をする作業) の必要がないこと

など利点が多く有効な方法であることが確認された。

- 3) 単写真解析における精度向上のための検討課題としては、解析する写真の大きさ、標定点の配置の影響、風船の直径の正しい計測法などいくつかのことが考えられる。これらのことをもとに単写真解析のより有効な方法を開発していくつもりである。

- 4) 現在, 他の方法についてもいくつか開発を進めている。先の気球の方法とも合わせて写真測量を用いた流跡線測定の一連のシステムを構築したいと考えている。

6. 謝 辞

本研究を進めるにあたって千葉工業大学土木工学科の学生諸君に多くの野外実験および解析の助力を受けた。ここに謝意を表したい。

参考文献

- 1) 羽倉弘人, 小泉俊雄: 簡易空中写真測量法を利用した風の観測システムの開発 (1) - システムの開発と建物周辺気流の流跡線測定への試み -, 日本風工学会誌, 第45号, 平成2年10月, pp1~14。

Appendix

Fig. 8に示すように, 球の半径を b としたとき球の中心 R の三次元座標 (X_R, Y_R, Z_R) は次の通り求めることができる。

凡 例

- O : 投影中心(カメラレンズの中心) Y_0 : 点Gの基準面上のY座標
P : 球の見せかけ上の直径をなす点 Z_0 : 点Gの基準面上のZ座標
Q : 球の見せかけ上の直径をなす点 γ : 直線OGと基準面のなす角
R : 球の中心 X_0 : 投影中心OのX座標
P : 球の見せかけ上の直径をなす点 Y_0 : 投影中心OのY座標
Pの像点 Z_0 : 投影中心OのZ座標
q : 球の見せかけ上の直径をなす点 X_p : 像点PのX座標
Qの像点 Y_p : 像点PのY座標
r : 球の中心の像点 Z_p : 像点PのZ座標
 θ : 像点P, Qと投影中心Oとでなす角 X_q : 像点QのX座標
 b : 球の半径 Y_q : 像点QのY座標
G : 直線ORの延長線と基準面との交点 Z_q : 像点QのZ座標
 X_0 : 点Gの基準面上のX座標 Z_R : 球の中心Rと基準面の鉛直距離

- (1) 単写真標定により投影中心Oの座標 (X_0, Y_0, Z_0) を求める。
(2) 球の見かけ上の直線をなす点P, Qの写真座標である像点 $p(X_p, Y_p, Z_p)$ と $q(X_q, Y_q, Z_q)$ を測定する
(3) 直線Op, Oqのなす角 $\angle pOq = \theta$ を下記の式より求める

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{|(X_p - X_0)(X_q - X_0) + (Y_p - Y_0)(Y_q - Y_0)|}{\sqrt{(X_p - X_0)^2 + (Y_p - Y_0)^2 + (Z_p - Z_0)^2} \times \sqrt{(X_q - X_0)^2 + (Y_q - Y_0)^2 + (Z_q - Z_0)^2}} \right) \quad (1)$$

$(0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ)$

- (4) $\angle pOq$ の二等分線と写真面との交点 $r(X_r, Y_r, Z_r)$ を求める。
 $\angle pOq$ の二等分線と写真面との交点を r とする。
このとき ΔpOq において

$$\overline{pr} : \overline{qr} = \overline{Op} : \overline{Oq} \quad (2)$$

の関係式が成り立つ。よって

$$\overline{pr} : \overline{qr} = \overline{Op} : \overline{Oq} = m : n \quad (3)$$

とすれば線分 pq を $m : n$ に内分する写真面上の点 R の座標 (X_r, Y_r, Z_r) は

$$X_r = \frac{mX_q + nX_p}{m+n} \quad (4)$$

$$Y_r = \frac{mY_q + nY_p}{m+n} \quad (5)$$

$$Z_r = \frac{mZ_q + nZ_p}{m+n} \quad (6)$$

と求められる。

- (5) 座標系の原点を求めたXY平面($Z=0$)を基準面と定め, 直線Orと基準面との交点Gの座標 (X_G, Y_G, Z_G) を求める。

直線Orの方程式は(7)式で表される。

$$\frac{X - X_0}{X_r - X_0} = \frac{Y - Y_0}{Y_r - Y_0} = \frac{Z - Z_0}{Z_r - Z_0} \quad (7)$$

ここで

$$X = X_G \quad Y = Y_G \quad Z = Z_G = 0$$

とすると

Fig. 8 単写真解析理論
Analytical theory of Single Photogrammetry

$$X_G = \frac{-Z_0(X_r - X_0)}{Z_r - Z_0} + X_0 \quad (8)$$

$$Y_G = \frac{-Z_0(X_r - X_0)}{Z_r - Z_0} + Y_0 \quad (9)$$

$$Z_G = 0 \quad (10)$$

(6) 基準面と直線 GO とのなす角 γ を求める。

$$\tan \gamma = \frac{Z_0}{\sqrt{(X_0 - X_G)^2 + (Y_0 - Y_G)^2}} \quad (11)$$

$$\text{より} \quad r = \tan^{-1} \left(\frac{Z_0}{\sqrt{(X_0 - X_G)^2 + (Y_0 - Y_G)^2}} \right) \quad (12)$$

(7) 投影中心 O から球の中心 R までの鉛直距離 Z_T を求める。

ΔOPR において

$$OR = \frac{b}{\sin(\theta/2)} \quad (13)$$

より

$$Z_T = \frac{b}{\sin(\theta/2)} \sin \gamma \quad (14)$$

(8) 基準面から球の中心 R までの距離 Z_R を求める。

$$Z_R = Z_0 - Z_T \quad (15)$$

(9) 直線 GO の方程式より球の中心 R の X, Y 座標 X_R , Y_R を求める。

直線 GO の方程式は (16) 式で表される。

$$\frac{X - X_0}{X_G - X_0} = \frac{Y - Y_0}{Y_G - Y_0} = \frac{Z - Z_0}{Z_G - Z_0} \quad (16)$$

ここで $X = X_R$ $Y = Y_R$ $Z = Z_R$ とすれば

$$X_R = \frac{(Z_R - Z_0)(X_G - X_0)}{(Z_G - Z_0)} + X_0 \quad (17)$$

$$Y_R = \frac{(Z_R - Z_0)(Y_G - Y_0)}{(Z_G - Z_0)} + Y_0 \quad (18)$$